

Zeitschrift: Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft = Bulletin de la Société Botanique Suisse
Herausgeber: Schweizerische Botanische Gesellschaft
Band: 54 (1944)

Artikel: Morphologische, chemische und kolloidchemische Untersuchung subalpiner Weide- und Waldböden der Rendzina- und der Podsolserie : ein Beitrag zur Humusklassifizierung
Autor: Frei, Erwin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-38520>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Morphologische, chemische und kolloidchemische Untersuchung subalpiner Weide- und Waldböden der Rendzina- und der Podsolserie.

Ein Beitrag zur Humusklassifizierung.

Von *Erwin Frei*.

(Mitteilung aus dem Agrikulturchemischen Institut der
Eidgen. Techn. Hochschule in Zürich.)

(Vorstand: Prof. Dr. H. *Pallmann*.)

Eingegangen am 15. April 1944.

Inhaltsübersicht :

| | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| I. Einleitung und Problemstellung | 269 |
| II. Methodische und theoretische Beiträge zur Bodenuntersuchung . . . | 272 |
| A. Das Bodengefüge | 272 |
| 1. Die Baueinheiten des Bodens und die Konstruktion des Boden- gefüges | 272 |
| 2. Definitionen einiger bodenkundlicher Begriffe | 276 |
| B. Humus und Systematik | 279 |
| 1. Einleitung | 279 |
| 2. Unterteilung des Gesamthumus | 281 |
| 3. Eingliederung der Humusbildungen in die Humussystematik . . | 282 |
| a) Die Humusgruppen | 283 |
| b) Die Humus-Untergruppen | 283 |
| c) Die Humusfazies | 284 |
| d) Die Humusformen | 285 |
| e) Systematische Nomenklatur-Beispiele | 286 |
| C. Allgemeiner experimenteller Teil | 288 |
| 1. Zusammenstellung der für die Profiluntersuchungen benutzten Methoden | 288 |
| 2. Die morphologische Untersuchungsmethodik | 290 |
| 3. Chemische Untersuchungsmethoden und Besprechung methodi- scher Ergebnisse | 291 |
| a) Bestimmung der austauschbaren Wasserstoffionen durch Per- kolation | 291 |
| b) Die Bestimmung der Pufferungszahl | 292 |
| c) Die Bestimmung der austauschbaren basischen Kationen und der Anionen | 293 |
| Der Austausch mit Salzsäure | 293 |
| Die Verdrängung mit Salzlösungen | 293 |
| Der Austausch durch Elektrodialyse | 295 |
| Die Bestimmung der Umtauschkapazität | 298 |
| Die Pflanzennährstoff-Verhältnisse des Bodens | 299 |
| d) Die Bestimmung des Gesamthumus | 301 |

| | Seite |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 4. Die Beziehung zwischen dem pH-Wert wäßriger Bodensuspensionen und der Menge austauschbarer H-Ionen | 303 |
| III. Untersuchungen an Muttergesteinen und Bodenprofilen der subalpinen Rendzinaserie | 305 |
| A. Neue Analysen von Dolomiten des Schweizerischen Nationalparks | 305 |
| B. Subalpiner Wald-Humuskarbonatboden des Mugeto-Ericetum | 306 |
| 1. Lage der Profilstelle und Vegetation | 306 |
| 2. Das Bodenprofil und seine Morphologie | 308 |
| a) Das Profil | 308 |
| b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchungen | 309 |
| 3. Physikalische Eigenschaften | 310 |
| 4. Chemische Untersuchungsergebnisse | 311 |
| a) Der Humus | 311 |
| b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte | 312 |
| c) Die austauschbaren Ionen | 313 |
| C. Subalpiner Wiesen-Humuskarbonatboden des Trisetetum flavescens | 314 |
| 1. Lage der Profilstelle und Vegetation | 314 |
| 2. Das Bodenprofil und seine Morphologie | 315 |
| a) Das Profil | 315 |
| b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchung | 316 |
| 3. Physikalische Eigenschaften | 317 |
| 4. Chemische Untersuchungsergebnisse | 317 |
| a) Der Humus | 317 |
| b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte | 319 |
| c) Die austauschbaren Ionen | 319 |
| IV. Untersuchungen an Bodenprofilen der subalpinen Podsolserie | 319 |
| A. Subalpines Humuspodsol des Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum | 321 |
| 1. Lage der Profilstelle und Vegetation | 321 |
| 2. Das Bodenprofil und seine Morphologie | 322 |
| a) Das Profil | 322 |
| b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchung | 323 |
| 3. Physikalische Eigenschaften | 324 |
| 4. Chemische Untersuchungsergebnisse | 325 |
| a) Der Humus | 325 |
| b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte | 327 |
| c) Die austauschbaren Ionen | 328 |
| B. Podsolierte sekundäre Braunerde des Nardetum subalpinum | 329 |
| 1. Lage der Profilstelle und Vegetation | 329 |
| 2. Das Bodenprofil und seine Morphologie | 330 |
| a) Das Profil | 330 |
| b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchung | 331 |
| 3. Physikalische Eigenschaften | 332 |
| 4. Chemische Untersuchungsergebnisse | 333 |
| a) Der Humus | 333 |
| b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte | 334 |
| c) Die austauschbaren Ionen | 334 |
| V. Der Übergang von Wald in Weide | 336 |
| 1. Sukzessionsursachen | 336 |
| 2. Bodenveränderungen beim Übergang von Wald in Weide | 336 |
| a) Profilmorphologische Veränderungen | 336 |
| b) Bodenphysikalische Veränderungen | 337 |

| | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| c) Chemische Veränderungen | 338 |
| d) Biologische Veränderungen | 339 |
| e) Lokalklimatische Unterschiede | 340 |
| VI. Zusammenfassung | 341 |
| A. Methodik und Begriffsbildung | 341 |
| B. Untersuchungen an dolomitischen Gesteinen und subalpinen Boden- profilen | 343 |

I. Einleitung und Problemstellung.

Die wissenschaftliche Bodenkunde erkennt die *Bodenklassifikation* (d. h. die Eingliederung der verschiedenen Böden bestimmter Profilausbildung in ein natürliches System) als eine ihrer wichtigen Aufgaben. Ermöglicht wird diese Klassifizierung erst durch umfassende analytische Beschreibung möglichst vieler gut gekennzeichnete Bodentypen, Untertypen und Varietäten. Die Grundlage der Bodenforschung ist also eine gut ausgebaute, vielseitige *Untersuchungsmethodik*, durch deren Anwendung der zu beschreibende Boden möglichst vollständig charakterisiert werden kann.

Die vorliegende Arbeit möchte einen Beitrag zur Bodenforschung leisten, indem Vorschläge zur Lösung einiger methodischer und theoretischer Probleme der Bodenuntersuchung gemacht werden, ferner durch morphologische, physikalische, chemische und kolloidchemische Beschreibung von vier pflanzensoziologisch und bodentypologisch gut definierten Böden der Podsol- und der Rendzinaserie.

Die *morphologische Untersuchung* des Bodenprofils gliedert sich in die Beschreibung der *Bodenhorizonte* und in die der *Krümelaggregate*, der *Krümel* und der *Bodeneinzelteilchen*. Dazu bedarf es neben makroskopischen unbedingt auch mikroskopischer Methoden. — Bei diesen morphologischen Bodenuntersuchungen erwies sich der Mangel an klar definierten bodenkundlichen Begriffen als besonders störend. Die Notwendigkeit drängte sich auf, zuerst einige Begriffe wie Bodengefüge, Krümel, Humus usw. zu definieren. Die Humussystematik mußte erneut diskutiert werden; ein konkreter Klassifikationsvorschlag liegt als Ergebnis dieser Arbeit vor. Er wurde nach eingehenden Untersuchungen an zahlreichen Humusbildungen ausgearbeitet.

Physikalische Bodenuntersuchungen können entweder an Bodeneinzelteilchen oder an ungestörten Bodenproben ausgeführt werden. Die physikalische Analyse befaßt sich daher sowohl mit den niederen Baueinheiten¹ des Bodens als auch mit den höheren. In letzterem Fall versucht sie durch die Bestimmung des Boden- und Hohlraumvolumens, der Wasserkapazität, der Krümelgestalt, der Krümelbeständigkeit usw. indirekt Einblick ins komplexe Bodengefüge zu erhalten.

¹ Vgl. Definition S. 276.

Zur weitgehenden Kennzeichnung der Böden sind *chemische Untersuchungsergebnisse* unentbehrlich, wie z. B. die Angabe von Säuregrad, Art, Menge und Dissoziationsfähigkeit der austauschbaren Ionen, Gehalt an organischem Kohlenstoff, Stickstoffgehalt, Bauschemismus der Tone und des übrigen Bodengerüsts, Menge der leicht dispergierbaren Gele usw.

Neben dem Generalklima ist das *Lokalklima* sehr oft maßgebend für die Ausbildung des Bodenprofils und dessen zugeordnete Pflanzengesellschaft. Während die « wirksame » Bodentemperatur heute befriedigend bestimmt werden kann^{2, 3}, sind einfache, kontinuierliche Bestimmungen der Bodenfeuchtigkeit, der Bodenluft-Zusammensetzung usw. immer noch ungelöste methodische Probleme.

Die *Bodenbiologie* bietet eine Fülle reizvoller und dringlicher Probleme. Den vielfältigen Wechselwirkungen zwischen der Bodensubstanz und den lebenden Bodenorganismen kann kaum zu große Bedeutung beigemessen werden; es sei z. B. nur an die Umformung organischen Bodenmaterials, an die Produktion von organischen Säuren und von Kohlensäure erinnert; wie auch an die mechanisch durchmischende, zerkleinernde, formende, abbauende und aufbauende Wirkung des Edaphons. Es ist wahrscheinlich, daß eine gewisse, mit dem Bodentyp oder der Bodenvarietät in Zusammenhang stehende *Soziologie* des Edaphons vorhanden ist^{4, 5, 6}; unsere Kenntnisse hierüber sind noch recht lückenhaft. Die integrale Wirkung der Bodenlebewesen äußert sich unter anderm in der Abbauintensität des organischen Materials im gewachsenen Boden. Durch quantitative Abbauversuche mit Zellulose- und Eiweißkörpern kann die biologische Aktivität bestimmter Bodenhorizonte einigermaßen zahlenmäßig festgelegt werden⁷.

In der subalpinen Stufe der Schweiz belegt die *Podsol-* und die *Rendzinaserie* den flächenmäßig größten Teil der mit Pflanzengesellschaften bestockten Bodenflächen. Die mannigfaltigen, innerhalb dieser

² H. Pallmann, E. Eichenberger und A. Hasler: Eine neue Methode der Temperaturmessung bei ökologischen oder bodenkundlichen Untersuchungen. Berichte d. Schweiz. Botan. Gesellsch. 1940, Bd. 50, 337—362.

³ H. Pallmann und E. Frei: Beitrag zur Kenntnis der Lokalklimate einiger kennzeichnender Waldgesellschaften des Schweizerischen Nationalparkes. Ergebnisse der wissensch. Untersuchungen des schweiz. Nationalparkes, Bd. 1 (Neue Folge), Heft 10, 1943, 437—464.

⁴ A. Starc: Mikrobiologische Studien einiger podsoliger Böden Kroatiens. Poljodjelska Znanstvena Smotra Revisio Scientifica agriculturae, Zagreb 1941, Heft 4, S. 83—192.

⁵ H. Gisin: Ökologie und Lebensgemeinschaften der Collembolen im schweizerischen Exkursionsgebiet Basels. Revue Suisse de Zoologie 50, 1943, S. 131.

⁶ H. Franz: Bildung von Humus aus pflanzlichem Bestandesabfall und Wirtschaftsdüngern durch Kleintiere. Bodenk. u. Pflanzenernährung 32, 1943, S. 336—351.

⁷ H. Pallmann u. F. Richard: Publikation folgt demnächst.

Serien vorhandenen Bodenbildungen (Bodentypen, -untertypen und -varietäten) können in ihrem profilmorphologischen Aspekt und in ihren Eigenschaften als Pflanzenstandort sehr unterschiedlich ausgebildet sein. Zunächst aus rein wissenschaftlichen, dann aber auch aus praktischen Gründen ist eine *genaue Kenntnis dieser verschiedenen Bodenprofile erwünscht*. Sie ermöglicht erst :

Den weiteren Auf- und Ausbau der Bodensystematik.

Die Feststellung zeitlicher Veränderungen bestimmter Bodenbildungen, wie Degradation, Verbraunung, Podsolierung, Marmorierung usw. bzw. Veränderungen, die nach Meliorationen eintreten, z. B. bei Entwässerung, Bewässerung, Schälen, Brennen, Übersandung, Aufforstung, Rodung, landwirtschaftliche Zwischennutzung von Wäldern.

Die Erforschung des Wurzelortes und der speziellen Standortsansprüche der verschiedenen Pflanzen und Pflanzengesellschaften, z. B. in bezug auf austauschbare Ionen, Wasserhaushalt, Bodengefügeverhältnisse, Gasregime, mikrobielle Aktivität.

Die Abklärung der Bindungsamplitude bestimmter Pflanzen- und Edaphongesellschaften auf bestimmten Bodentypen bzw. ihrer Varietäten.

Innerhalb der subalpinen *Podsolserie* sind schon zahlreiche Bodenprofile chemisch, kolloidchemisch und makromorphologisch gründlich untersucht worden ^{8, 9, 10}. Unsere Analysenresultate des *Humuspodsols* bestätigten im allgemeinen nur jene Untersuchungen; sie werden aber noch durch eine eingehende mikromorphologische Beschreibung ergänzt. Eine bisher noch wenig untersuchte Variante innerhalb der subalpinen Podsolserie ist die *podsolierte sekundäre Braunerde*, die aus dem Humuspodsol entstehen kann, sobald sich die subalpine Borstgrasweide an Stelle der Alpenrosen-Heidelbeeren-Gesellschaft installiert hat. Die Bodenveränderungen bei diesem Übergang können kurz als *Verbraunung des Podsols* bezeichnet werden, mit allen ihren Konsequenzen : Abbau der Humusaufgabe, Erodierung des Bleicherdehorizontes, Diffuswerden des Anreicherungs-horizontes, Zunahme des pH-Wertes, Änderungen im Bodengefüge usw.

Die *Rendzinaserie* ist in der Schweiz und im Ausland bedeutend weniger gut untersucht ^{11, 12, 13} als die Podsolserie; sowohl Analysen

⁸ H. Pallmann u. P. Haffter: Pflanzensoziologische und bodenkundliche Untersuchungen im Oberengadin. Berichte d. Schweiz. Botan. Gesellsch. 1933, Bd. 42, Heft 2, S. 357—466.

⁹ A. Schmuziger: Über die Verteilung und den Chemismus der Humusstoffe in den Profilen einiger schweizerischer Bodentypen. Diss. ETH 1935.

¹⁰ H. Pallmann, A. Hasler u. A. Schmuziger: Beitrag zur Kenntnis der alpinen Eisen- und Humuspodsole. Bodenkunde und Pflanzenernährung 9./10. (54./55.), 1938, S. 94—122.

¹¹ W. Kubiena: Beiträge zur Bodenentwicklungslehre: Entwicklung und Systematik der Rendsinen. Bodenkunde u. Pflanzenern. 29. 1943, S. 108—119.

¹² Siehe Anm. 9.

¹³ M. Gracanin: Ein Beitrag zur Morphologie und Genesis der Rendzinaböden Kroatiens. Poljodjelska Znanstvena Smotra. Revisio Scientifica agriculturae. Heft 4, 1941, S. 22—43.

von Bodenprofilen wie solche ihrer Muttergesteine sind noch spärlich. Die vorliegende Arbeit bringt einige *neue Analysen häufiger Muttergesteine* von Rendzinen des schweizerischen Nationalparks (Dolomite und Kalke der ostalpinen Trias). Die extreme Silikatarmut dieser Gesteine, welche bis 95% Erdalkalikarbonate enthalten, ist die Ursache des besonderen Charakters der Humuskarbonatböden der subalpinen Rendzinaserie.

Die aus dieser Bodenserie gewählten Profile werden chemisch, kolloidchemisch und morphologisch eingehend beschrieben. Der subalpine *Wald-Humuskarbonatboden* ist an das Vorkommen der Bergföhren-Erica-Bestände gebunden (Mugeto-Ericetum caricetosum humilis Br.-Bl.). Charakteristisch sind ferner die meist bis zur Erdoberfläche vorhandenen Kalk- oder Dolomitbrocken, der hohe Gehalt an Mullhumus in den obersten Horizonten und die ausgesprochene Armut an anorganischen Bodenkolloiden. — Besiedelt an Stelle des Waldes eine Gramineenassoziation (z. B. Trisetetum oder Seslerieto-Semperviretum) diesen Humuskarbonatboden, so treten Anzeichen der *Verbraunung* ein (d. h. eine gegen den Braunerdetyp gerichtete Bodensukzession). Die Verbraunung ist hier allerdings viel weniger augenfällig als beim analogen Vorgang in der Podsolserie; solange im Profil Erdalkalikarbonate bis zur Oberfläche vorkommen, ist sie nur tendenzmäßig und besteht hauptsächlich in der Abnahme des Humusgehaltes, der Verengerung des C/N-Verhältnisses, einer schwachen Zunahme des Tonanteils sowie in Gefügeveränderungen, bedingt durch die Beweidung, die veränderte Pflanzendecke und die bedeutend größere biologische Aktivität innerhalb der Humushorizonte.

II. Methodische und theoretische Beiträge zur Bodenuntersuchung.

A. Das Bodengefüge¹⁴.

1. Die Baueinheiten des Bodens und die Konstruktion des Bodengefüges.

Würde man mit geeigneten Verfahren beispielsweise einen gut gekrümelten Braunerdeboden in seine Einzelteilchen¹⁵ aufdispergieren und diese nachher verlustlos mengen, so wäre damit der ursprüngliche, natürliche Boden nicht wieder hergestellt. Das entstandene Einzelteilchengemenge unterscheidet sich vom ursprünglichen Boden durch sein einfaches, primitives¹⁶ Gefüge. Man bezeichnet das Gefüge eines Bodens in natürlicher Lagerung als um so höher entwickelt, je verschiedener es von jenem theoretischen, dichtgepackten, in « Einzelkornstruktur » vorliegenden Teilchengemenge ist. Das Bodengefüge kann also verschiedene

Definitionen von ¹⁴ S. 277, sub e). ¹⁵ S. 276, sub b). ¹⁶ S. 277, sub f).

*Entwicklungsgrade*¹⁷ innehaben. Der Entwicklungszustand des Gefüges ist nicht absolut stabil, er kann durch Änderungen in der Umtauschgarnitur, im Humusgehalt, durch Bodenbearbeitung, Beweidung, Änderungen im Wasserregime, durch Düngen usw., einen höheren Entwicklungsgrad erreichen oder aber zu einem einfacheren Gefüge führen.

Die praktischen Auswirkungen solcher Gefügeänderungen können z. B. sein :

Lockerung oder Verdichtung von Bodenhorizonten, im Zusammenhang damit stehen Änderungen im Bodenhohlraumssystem und im *Luft- und Wasserhaltevermögen* des Bodens. Sie führen weiter zu einer verminderten oder verbesserten *Einsickerung* des auf die Bodenoberfläche treffenden Wassers. Mit verändertem Bodengefüge geht oft die *Erosionsbereitschaft* parallel. Gefügeveränderungen des Bodens können rückwirkend Umschichtungen in seiner *Fauna und Mikroflora* und schließlich auch in seiner *Vegetationsdecke* bedingen, wodurch die Bodenfruchtbarkeit entschieden beeinflusst wird.

Am Aufbau des Bodengefüges nehmen verschiedene *Baueinheiten*¹⁸ teil. Die niedersten sind die Einzelteilchen des Bodens von verschiedenster Dispersität. Die Einzelteilchen treten häufig zu ziemlich stabilen *Vielfachteilchen*¹⁹ zusammen, die nach ihren Dimensionen in *Feinkoagulate*²⁰, *Krümel*²⁰ und *Klumpen*²⁰ unterteilt werden.

Die *Krümelung*²¹ des Bodens ist ein komplexer Begriff. Bei ihrer Beurteilung sind auseinanderzuhalten : der relative Mengenanteil der gekrümelten Bodensubstanz am Gesamtboden; die Krümelgestalt und die Krümelstabilität²².

Die *Fähigkeit eines Bodens, Krümel zu bilden*, ist ersichtlich aus dem Verhältnis der gekrümelten zur nicht gekrümelten Bodensubstanz. Sie ist abhängig vom %-Gehalt des Bodens an Kolloiden, von deren stofflicher Art, vom Basen- und Anionenanteil in der Umtauschgarnitur, von der Art und Menge der Bodentiere (speziell vom Vorkommen des Regenwurms) und auch vom momentanen Wassergehalt des Bodens.

Die *Krümelgestalt* ist durch Form und Größe der Krümel gegeben. Die *Form* der Krümel oder anderer Vielfachteilchen kann sein :

1. kuglig oder rundlich,
2. polyedrisch
 - a) kubisch
 - b) kurzprismatisch $\left\{ \begin{array}{l} *) \text{ scharfkantig} \\ **) \text{ weichkantig} \end{array} \right.$
 - c) plattig
 - d) stenglig,
3. blättrig.

¹⁷ Vgl. Skala für die Beurteilung des Entwicklungsgrades von Bodengefügen S. 290, Anm. 90.

Definitionen von ¹⁸ S. 276, sub a). ¹⁹ S. 277, sub c).

²⁰ Vgl. Definition S. 277, sub c), Absatz 2.

²¹ Vgl. auch Beurteilungs-Skala S. 289, Anm. 88.

²² Vgl. Definition S. 278, sub i).

Die *Krümelgröße* kann definitionsgemäß²³ zwischen 0,2 mm und 20 mm Krümeldurchmesser schwanken, wobei diese Grenzen nicht zu streng gehandhabt werden dürfen. Nikiforoff²⁴ redet z. B. von 5—10 cm und größeren Krümeln. Solche dürften aber Ausnahmen bilden; gewöhnlich handelt es sich bei so großen Gebilden um Krümelaggregate oder um sogenannte Klumpen. In russischen Versuchen von Kwasnikow²⁵, aus dem Jahre 1926, hat sich als optimale Krümelgröße in Tschernosemen im Sinne einer günstigen Wirkung auf den Pflanzenertrag (Nitratbildung und Nährstoffmobilisation) ein Krümeldurchmesser von 2—3 mm erwiesen. K. Helmich²⁶ konnte diese Feststellung bestätigen, wobei er in leichten Böden ein stärkeres Vorherrschen der kleinen Krümel von 0,25—1 mm fand. Da solche Untersuchungen noch ziemlich vereinzelt sind, sollte man sich vor einer zu starken Verallgemeinerung der Resultate hüten.

Die *Stabilität* oder die Dauerhaftigkeit der Krümel gegen dispergierende Einflüsse ist um so größer:

Je mehr kolloide Bindesubstanz vorhanden ist (auch Chemismus und Struktur derselben haben einen Einfluß);

je mehr Koagulatoren, besonders Ca- und PO₄-Ionen, an den Bodenoberflächen adsorbiert sind;

je intensiver die Lebendverbauung²⁷ der Krümel durch Mikroorganismen und Feinwurzeln ist.

Eine befriedigende direkte Methode zur Bestimmung der *Krümelstabilität*²⁸ existiert bis heute nicht. Man ist immer noch auf die Unterteilung in wasserbeständige und in Wasser zerfallende Krümel angewiesen^{29, 30, 31}.

Die Vielfachteilchen treten in Böden mit gut entwickeltem Gefüge wieder zu neuen, relativ lockeren Aggregaten, den *Vielfachteilchen-Aggregaten*³² zusammen, die als höhere Baueinheiten des Bodens anzu-

²³ Vgl. Definition S. 277, sub c).

²⁴ Nikiforoff: Morphological classification of soil structure. Soil Science 52, 1941, 190—212.

²⁵ M. Krause: Russische Forschungen auf dem Gebiete der Bodenstruktur. Landw. Jahrbücher, Berlin 73, 1931, 603—690.

²⁶ K. Helmich: Zur Kenntnis der Bodengare. Bodenkunde u. Pfl. 24, 1941, 207—232.

²⁷ F. Sekera u. A. Brunner: Beiträge zur Methodik der Gareforschung. Bodenk. u. Pflanzenernährung 29, 1943, 169—212.

²⁸ Definition siehe S. 278, sub i).

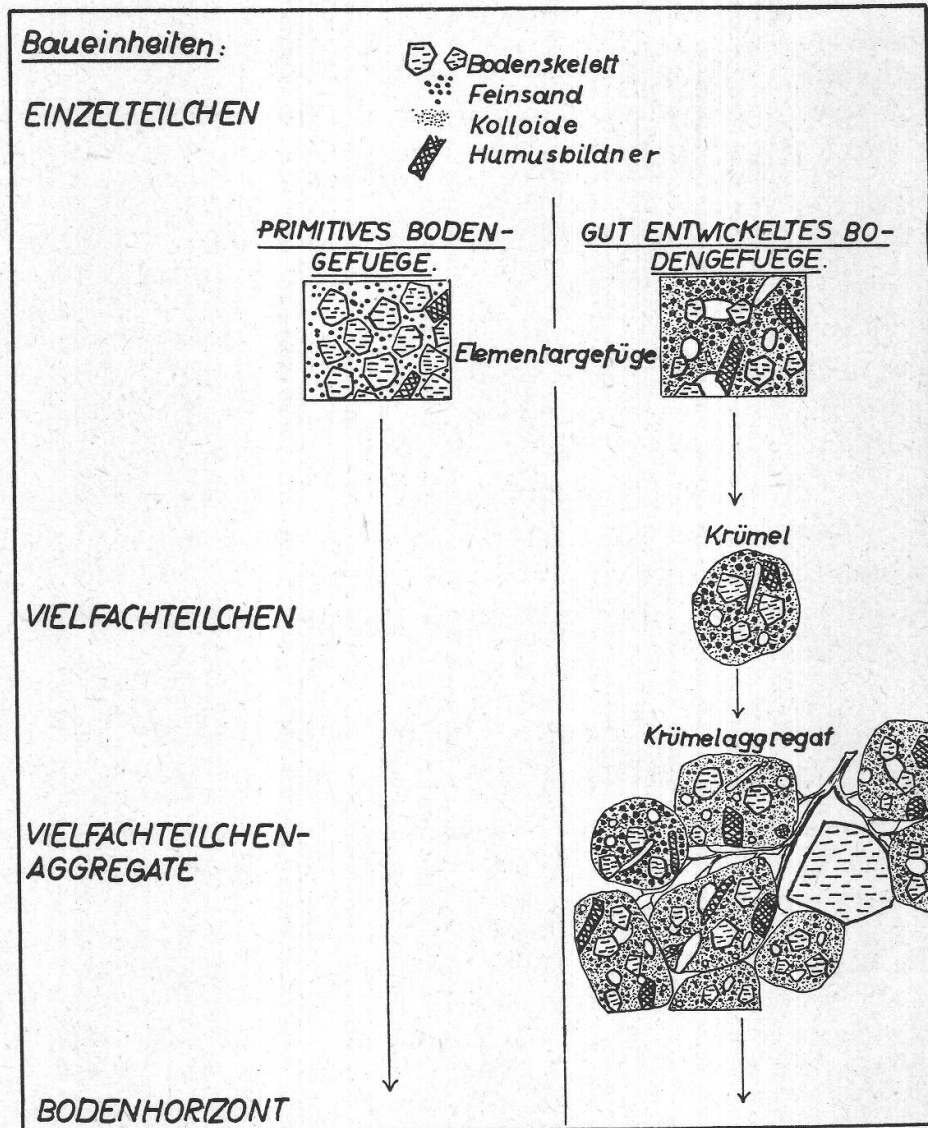
²⁹ L. Meyer u. U. v. Rennenkampff: Neuer Apparat und Methode zur automatischen Durchführung der Krümelanalyse. Bodenk. u. Pfl. 43, 1936, 268—280.

³⁰ H. Dittrich: Untersuchungen über die Bodengare. Bodenk. u. Pfl. 16, 1940, 16—50.

³¹ J. B. Peterson: A microscopic method for determining the waterstable aggregates in soils. Soil Science 50, 1941, 331—338.

³² Vgl. Definition S. 277, sub d).

sprechen sind. Zwischen den *Krümelaggregaten*³³ treten zahlreiche große, gaserfüllte Hohlräume auf, die auch in tonreichen, feuchten Böden eine genügende Luftführung und guten Gasaustausch gewährleisten.



Figur 1.

Baueinheiten des Bodens und Konstruktion des Bodengefüges.

Das Gesamtgefüge des Bodens läßt sich in das Elementargefüge und in das Sekundärgefüge gliedern. Das *Elementargefüge*³⁴ ergibt sich aus der *räumlichen Lagerung der Bodeneinzelteilchen* und der durch diese gebildeten Hohlräume. In der Anordnung dieser Bauelemente ist ein für das betreffende Elementargefüge typisches *Bauprinzip* erkennbar

³³ Vgl. Figur 1.

³⁴ Vgl. Definition S. 278, sub g).

(Elementargefügeart nach K u b i e n a ³⁵. Dabei spielt die Art der räumlichen Verteilung der kolloiden Bindesubstanzen zwischen den gröberdispersen Bodenteilen eine Hauptrolle. Die kolloide Phase kann z. B. :

- a) eine gleichmäßig dichte oder poröse Grundmasse bilden (in Tonen, Lehmen usw.);
- b) an den gröberdispersen Bodenteilen niedergeschlagen sein, dieselben also mit einer mehr oder weniger lückenlosen und dicken Hülle umgeben (B_s -Horizont der Podsole);
- c) in den Bodenhohlräumen in Form von Feinkoagulaten separat gelagert sein (unentwickelte Rendzina);
- d) Brücken bilden, durch welche die gröberdispersen Bodenteile zu einem lockeren Gefüge verbunden werden (Braunerde, Tschernosem, entwickelte Rendzina).

Bei der Betrachtung des *Sekundärgefüges* ³⁶ wird die Aneinanderfügung der einzelnen Vielfachteilchen zu Vielfachteilchen-Aggregaten (Krümelaggregate z. B.) und die dadurch gebildeten Hohlräume sowie die Vereinigung der Vielfachteilchen-Aggregate zum *Bodenhorizont* oder zu einer Bodenschicht beobachtet. Das Sekundärgefüge kann beispielsweise dadurch gekennzeichnet sein, daß die einzelnen *Vielfachteilchen* entweder schütter, zusammenhaltlos und möglichst dicht und gleichmäßig gelagert sind, oder daß sie eine bestimmte Anordnung zeigen, indem z. B. engporige, stabile Krümelaggregate und dazwischen große Bodenhohlräume vorkommen.

2. Definitionen einiger bodenkundlicher Begriffe ³⁷.

a) Die verschiedenen Baueinheiten des Bodens.

| | |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Angströmdisperse Baueinheiten : | Atome, Ionen, Molekel. |
| Niedere Baueinheiten : | <i>Einzelteilchen</i> kolloider oder grober Dispersität (Einzelkristalle, feste Kristallverbände, Grobsand usw.). |
| Mittlere Baueinheiten : | <i>Vielfachteilchen</i> (Feinkoagulate, Krümel, Klumpen). |
| Höhere Baueinheiten : | <i>Vielfachteilchen-Aggregate</i> (Krümelaggregate, Klumpenaggregate, Feinkoagulat-Aggregate). |
| Höchste Baueinheiten : | <i>Bodenschichten</i> , <i>Bodenhorizonte</i> . |

b) Unter *Einzelteilchen* versteht man kristalline ³⁸, kryptokristalline ³⁹ oder amorphe ⁴⁰, kompakte ⁴⁰ oder lockere ⁴¹ feste disperse Phasen,

³⁵ W. K u b i e n a: Über das Elementargefüge des Bodens. Bodenkundl. Forschung IV. 1935. 380—412.

³⁶ Definition S. 278, sub h).

³⁷ Begriffsbildungen des Agrikulturchemischen Institutes der ETH Zürich.

³⁸ z. B. Montmorillonit-, Calcitkristalle.

³⁹ z. B. Humussäuren.

⁴⁰ z. B. Lignin, SiO_2 -Gel.

⁴¹ Lignin-Eiweiß-Komplexe.

deren Bausteine (Atome, Molekel, Kristalle, Zellen usw.) durch Hauptvalenzen ³⁸ oder van der Waals'sche Kräfte ⁴² mit *großer* integraler Bindefestigkeit zusammengehalten werden; sie verhalten sich nach außen als Individuen und lassen sich nur durch starke chemische ⁴³ und physikalische ⁴⁴ Eingriffe weiter zerteilen.

c) Unter *Vielfachteilchen* versteht man Zusammenlagerungs- (= Aggregations)-Produkte mehrerer, durch Hauptvalenzen oder van der Waals'sche Kräfte mit *geringer* integraler Bindefestigkeit untereinander verbundener Einzelteilchen; sie lassen sich durch Zusatz von Dispersionsmitteln ⁴⁵, durch geeignete Peptisationsmittel ⁴⁶ oder durch schwache physikalische Einwirkungen ⁴⁷ in ihre Einzelteilchen zerlegen.

Die Vielfachteilchen werden je nach ihrer Dispersität unterteilt in :

Feinkoagulate : Der Äquivalentdurchmesser der Teilchen ist kleiner als 0,2 mm.

Krümel : Der Äquivalentdurchmesser der Teilchen liegt zwischen 0,2 mm und 20 mm.

Klumpen : Ihre Äquivalentdurchmesser sind größer als 20 mm.

d) *Vielfachteilchen-Aggregate* entstehen durch vorwiegend mechanisch ⁴⁸-physikalischen ⁴⁹, häufig lockeren Zusammenschluß zahlreicher Vielfachteilchen. Man unterscheidet Feinkoagulat-Aggregate, Krümel- und Klumpenaggregate.

e) Das *Bodengefüge* ist durch die *räumliche Anordnung* der BodenkompONENTEN ⁵⁰ gegeben.

f) Der *Entwicklungsgrad des Bodengefüges* (vgl. Schätzungsskala S. 290, Anm. 90).

Das *Bodengefüge ist primitiv* (= niederster Entwicklungsgrad), wenn :

vorwiegend *nicht* koagulierte Einzelteilchen (Ton, Sand usw.) vorhanden sind; die Bodenteilchen (Einzelteilchen, Feinkoagulate, Klumpen) den Boden statistisch gleichmäßig und in dichtester Packung erfüllen (sog. Einzelkornstruktur);

und wenn die Porositätsverhältnisse gleichförmig ⁵¹ sind.

⁴² Zellulosemizelle, intakte Pinusnadel, Wurzelfaserstück, Gesteinssplitter usw.

⁴³ Spezielle Lösungsmittel, Säureaufschluß, Sodaschmelze.

⁴⁴ Zermahlung, elektrische Zerstäubung usw.

⁴⁵ Dispergierung von Tonen in Wasser.

⁴⁶ z. B. Dispergierung von Humussäureflocken mit Na₂CO₃.

⁴⁷ Schütteldispergierung, leichtes Drücken.

⁴⁸ Vernetzung durch Wurzelfasern, Pilzhyphen usw.

⁴⁹ Verklebung durch gemeinsame Hydratationshüllen, lose Sorptionen z. B. durch mikrogene Kittsubstanzen.

⁵⁰ Einzelteilchen, Vielfachteilchen, Vielfachteilchen-Aggregate, gas- oder wassererfüllte Bodenhohlräume.

⁵¹ Extremes Überwiegen der lufthaltenden Weitporen in Sand- oder Kiesböden oder der wasserhaltenden Feinporen in verschlammten Tonböden.

Das *Bodengefüge* ist sehr gut entwickelt (höchster Entwicklungsgrad), wenn :

die Einzelteilchen koaguliert und vorzugsweise in Krümelform vorhanden sind;
diese Krümel weiter zu lockeren Aggregaten zusammentreten;
die Krümel- und Aggregatbeständigkeit gegen Wasser oder rein mechanische Einwirkungen (Druck usw.) groß ist;
und wenn die Eng- und Weitporenanteile des Bodens von ähnlicher Größenordnung sind, so daß keine extremen Luft- und Wasserkapazitäten entstehen.

g) Das *Elementargefüge* umfaßt die räumliche Anordnung der festen Bodenteilchen und des Hohlraumsystems innerhalb der niederen⁵² und mittleren Baueinheiten⁵³ des Bodens.

h) Das *Sekundärgefüge* umfaßt die räumliche Anordnung der festen Bodenteilchen und des Hohlraumsystems im Bereiche der höheren⁵⁴ und der höchsten⁵⁵ Baueinheiten des Bodens.

i) Die *Krümelstabilität* wird aus dem Widerstand gemessen, den die Krümel dispergierenden Einwirkungen⁵⁶ entgegensetzen.

k) Die *biologische Aktivität* des Bodens entspricht der *Intensität aller biologisch-physikalischen und biologisch-chemischen Vorgänge* im Boden, die durch die Tätigkeit der Pflanzenwurzeln⁵⁷, der Mikroflora⁵⁸, der Mikrofauna⁵⁹ und der größeren Bodentiere⁶⁰ (Würmer, Käfer, Mäuse usw.) bewirkt werden.

Methodisch wird sie gemessen an der CO₂- oder der Nitratproduktion des Bodens, durch den Reißtest von Zellulose- und Eiweißfäden⁶¹,

⁵² z. B. primitive Bodengefüge von einseitigen Sanden bzw. verschlämmten Tonböden.

⁵³ z. B. Gefüge der einzelnen Krümel.

⁵⁴ z. B. Gefüge des Krümelaggregates, wie es durch die Aneinanderlagerung mehrerer Krümelindividuen gegeben ist.

⁵⁵ z. B. das durch die räumliche Anordnung vieler Krümelaggregate gegebene « Makrogefüge » einer Bodenschicht.

⁵⁶ *Physikalische Dispergierung* durch leichtes Drücken, Beregnen, Schütteln in Wasser usw. — *Kolloidchemische Dispergierung* durch Peptisationsmittel, wie z. B. LiCO₃, NH₄-Oxalat, NaF. — *Chemische Zerteilung* z. B. durch Einwirkung verdünnter Säuren auf Ca-Humat-Krümel.

⁵⁷ Chemische Wirkung von Ausscheidungsprodukten der Pflanzenwurzeln, z. B. Säuren, Gerbstoffe.

⁵⁸ Fermentative Umsetzungen durch Bakterien- und Pilzfermente (Zelluloseabbau, Eiweißabbau, Harnstoffvergärung, Pektinabbau usw.).

⁵⁹ Mechanische Zerkleinerung der Humusbildner durch Bodentiere. Chemische Umwandlung der aufgenommenen organischen Stoffe in ihrem Verdauungstrakt.

⁶⁰ Mechanische Verlagerung von Bodenschichten durch größere Bodentiere. Vermengung basenreichen Untergrundmaterials mit den Oberhorizonten. Chemische Veränderung der den Verdauungstrakt passierenden Humusbildner, dabei bei Mineralerde aufnehmenden Tieren innige Vermengung des organischen mit anorganischem Material. Bodenlockerung.

⁶¹ Vgl. Anm. 7, S. 270.

durch die Bestimmung der Keim- oder Kleintierzahlen und die Ermittlung der durch Mäuse oder Regenwürmer an die Erdoberfläche verlagerten Bodenmengen; sie wird geschätzt aus der Art und Menge der vorhandenen Bodentier-Exkremente, aus der Geschwindigkeit des Laub- oder Nadelstreueabbaus und aus der Morphologie⁶² der biogenen Bodenhorizonte.

B. Humus und Systematik.

1. Einleitung.

Die organische Bodensubstanz ist zunächst ein physikalisch und chemisch heterogenes Gemenge. In den Humusdefinitionen und Humus-Klassifizierungsversuchen der verschiedenen Forscher ist bis heute noch keine Einigung zustande gekommen. Eingehende und übersichtliche Erörterung erfährt das Humusproblem bei W a k s m a n⁶³ und bei M a i w a l d⁶⁴, wo auch das reichliche Schrifttum angegeben ist. Wegweisende Arbeiten für die neuere Humusforschung wurden auch von R o m e l l⁶⁵, H e i b e r g und C h a n d l e r⁶⁶, W. K u b i e n a⁶⁷, H. P a l l m a n n⁶⁸, U. S p r i n g e r⁶⁹, F. S c h e f f e r⁷⁰, A. Th. T y u l i n⁷¹, L. M e y e r⁷² u. a. veröffentlicht.

Mit P a l l m a n n und S c h m u z i g e r⁷³ verstehen wir unter *Gesamthumus* den gesamten organischen Bodenanteil. Dieser wird nach

⁶² Fraßspuren an Humusbildnern, Mengenanteil der Humusbildner und der Humusstoffe am Gesamthumus usw.

⁶³ S. A. W a k s m a n: Humus origin, chemical composition and importance in nature. Baltimore, the Williams & Wilkins Company, 1936.

⁶⁴ K. M a i w a l d: Beschaffenheit des organischen Bodenanteils. Handbuch der Bodenlehre, I. Ergänzungsband 1939, 377—439.

⁶⁵ L. G. R o m e l l and S. O. H e i b e r g: Types of humus layer in the forests of northeastern United States. Reprinted from Ecology, Vol. XII, No. 3, July 1931.

⁶⁶ S. O. H e i b e r g and R. F. C h a n d l e r: A revised nomenclature of forest humus layers for the northeastern United States. Soil Science 52, 1941, 87—99.

⁶⁷ W. K u b i e n a: Die mikroskopische Humusuntersuchung. Fortschritte der landwirtschaftlichen-chemischen Forschung 1941, Sonderheft 17 des Forschungsdienstes, S. 62—70.

⁶⁸ H. P a l l m a n n: Dispersoidchemische Probleme in der Humusforschung. Kolloid-Zeitschrift, Bd. 101, Heft 1 (1942).

⁶⁹ U. S p r i n g e r: Der heutige Stand der Humusuntersuchungsmethodik mit besonderer Berücksichtigung der Trennung, Bestimmung und Charakterisierung der Huminsäuretypen und ihre Anwendung auf charakteristische Humusformen. Bodenk. u. Pflanzenernährung 6, 1938, 312—373.

⁷⁰ F. S c h e f f e r: Agrikulturchemie, Teil c): Humus und Humusdüngung. Sammlung chemischer und chemisch-technischer Vorträge, neue Folge, Heft 35, 1941.

⁷¹ Th. T y u l i n: Herkunft, Struktur und Eigenschaften organomineralischer Bodenkolloide. Bodenk. u. Pflanzenernährung 21/22, 1940, 544—567.

⁷² L. M e y e r: Tonhumuskomplexe als Träger der Bodenfruchtbarkeit. Forschungsdienst, Berlin, 11, 1941, 344.

⁷³ A. S c h m u z i g e r: loc. cit. S. 271. W i e g n e r - P a l l m a n n: Anleitung zum quant. agrikulturchemischen Praktikum, 2. Aufl., S. 227. Berlin, Gebr. Bornträger, 1938.

dem Destruktionsgrad des pflanzlichen Zellverbandes, dem Grad der chemischen Veränderung gegenüber dem lebenden Ausgangsmaterial, seiner Farbe und seiner Umwandlungsbereitschaft in *Humusbildner*, *Humoide* und *Humusstoffe* unterteilt (vgl. Tab. 1). Zwischen diesen bestehen kontinuierliche Übergänge. In den natürlichen Humusbildungen der verschiedenen Bodentypen und ihrer Varianten kommen meist Humusbildner, Humoide und Humusstoffe nebeneinander vor, wobei sich deren Anteile je nach dem Umwandlungszustand der organischen Bodensubstanz verschieben.

Der Gesamthumus innerhalb der Bodenhorizonte wird gemäß chemischen und morphologischen Merkmalen nach Humusgruppen, -untergruppen, -fazies und Humusformen klassifiziert (vgl. Tab. 2). Die *Humusgruppen* werden mit den in der Literatur bisher ziemlich einheitlich⁷⁴ verwendeten Ausdrücken *Mullhumus* und *Morhumus* benannt. Unsere Definitionen⁷⁵ von Mullhumus (« Milder Humus ») und von Morhumus (« Saurer Humus ») sind sinngemäß synonym mit jenen von P. E. Müller⁷⁶, Romell⁷⁷, Heiberg und Chandler⁷⁸.

Die *Humus-Untergruppen* umfassen die Humusbildungen *gleicher Entstehungsart* innerhalb der Humusgruppen. Besteht der Gesamthumus vorwiegend aus angehäuften Pflanzenteilen mit erhaltener Zellstruktur (Humusbildner), so wird er als *Rohhumus* bezeichnet. « *Koprogen* » Humus hat seine Eigenschaften vorwiegend durch die Tätigkeit der Bodentiere erhalten. Er wird in deren Darmtrakt zerkleinert, chemisch umgewandelt und äußerlich geformt. Erhält der Humus seine Eigenschaften vorwiegend durch rein chemische oder kolloidchemische Reaktionen, so wird er « *chemogen* » genannt.

Innerhalb der Humus-Untergruppen unterscheidet man die *Humusfazies*. Mineralerdefreie Humusbildungen, die ganze Bodenhorizonte aufbauen, werden in die *holorganische Fazies* eingereiht; ist der Humus innerhalb des Horizontes in mehr oder weniger engem Kontakt mit Mineralerde, so gehört er in die *hemorganische Humusfazies*.

Die *Humusformen* werden nach der *morphologischen Ausbildung*, d. h. nach den Dispersitäts- und Gestaltsmerkmalen der Humus-Einzelteilchen unterschieden (z. B. kolloid, grobkörnig, feinfaserig).

⁷⁴ Einzig Hesselman 1926 braucht «Mor» speziell für lockere, unvernetzte Humusbildungen, d. h. in unserem Sinn eigentlich für eine Humusform.

⁷⁵ Siehe S. 283, sub a).

⁷⁶ P. E. Müller: Studien über die natürlichen Humusformen und deren Einwirkung auf Vegetation und Boden. Berlin, Verlag J. Springer, 1887.

⁷⁷ L. G. Romell and S. O. Heiberg: loc. cit. S. 279, Anm. 65.

⁷⁸ S. O. Heiberg and R. F. Chandler: loc. cit. S. 279, Anm. 66.

2. Unterteilung des Gesamthumus.

Der *Gesamthumus* (organischer Bodenanteil) umfaßt alle morphologischen und chemischen Umwandlungsstufen der in und auf der mineralischen Verwitterungsschicht vorhandenen organischen Substanzen pflanzlicher und tierischer Herkunft.

Er besteht je nach seinem Abbaugrad aus verschiedenen großen Anteilen *Humusbildnern*, *Humoiden* und *Humusstoffen*; diese drei Umwandlungsstufen des « Gesamthumus » sind durch stetige Übergänge miteinander verbunden.

Tabelle 1.

Die 3 wichtigen Umwandlungsstufen innerhalb des Gesamthumus.

| Humusbildner | Humoide | Humusstoffe |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Pflanzliche und tierische Ausgangsstoffe</i> inklus. mikrobielle Substanz, Stärke, Glykogen, Pektin usw. | <i>Morphologisch und chemisch mehr oder weniger stark veränderte organische Bodenteile</i> , die aber noch nicht als eigentliche Humusstoffe angesprochen werden können. | <i>Unstöchiometrisches Gemenge</i> vorwiegend amorph, teils kryptokristalliner organischer Verbindungen hauptsächlich kolloider Dispersität, von hohem Wasser- und Ionenbindungsvermögen. |
| <i>Zellverband erhalten</i> ; teilweise von Kleintieren zerhackt. | <i>Zellverband erhalten</i> ¹ od. <i>völlig aufgelöst</i> ² . | <i>Zellverband immer völlig aufgelöst.</i> |
| <i>Chemisch</i> gegenüber dem lebenden Material <i>nicht</i> oder <i>nur wenig verändert</i> . Mehr oder weniger löslich in Acetylbromid. | <i>Chemisch mäßig verändert</i> . Mehr oder weniger löslich in Acetylbromid. | <i>Chemisch stark verändert</i> . Mehr oder weniger unlöslich in Acetylbromid. |
| <i>Umwandlungsbereitschaft</i> meist groß; Hauptenergiequelle für Mikroorganismen und herbivore Bodentiere ³ . | <i>Umwandlungsbereitschaft</i> mittel; Nebenenergiequelle für Mikroorganismen und herbivore Bodentiere. | <i>Umwandlungsbereitschaft</i> gering; nur ausnahmsweise von Mikroorganismen verwertbar. |
| <i>Farbe hell, hellbraun.</i> | <i>Farbe braun bis dunkelbraun.</i> | <i>Farbe dunkelbraun bis schwarz.</i> |

¹ z. B. bei Rotteprodukten, Substanzen mit extrem großem C/N-Verhältnis, subhydrische Bildungen usw.

² z. B. bei normalem Abbau organischer Substanzen mit engerem C/N-Verhältnis in basischer Mineralerde.

³ Wenn deren Tätigkeit nicht durch saure Reaktion, anaerobe Bedingungen usw. gehemmt ist.

3. Eingliederung der Humusbildungen in die Humussystematik.

Tabelle 2 vermittelt einen Überblick über die neu vorgeschlagene Humussystematik.

Tabelle 2.

Humussystematik.

| Systematische Einteilung | Einteilungsmerkmale | | | | | | |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Humusgruppe G. | Sättigungsgrad | Mullhumus (« Milder Humus ») G. 1 | | | Morhumus (« Saurer Humus ») G. 2 | | |
| Humus-Untergruppe U. | Entstehungsart | Milder Rohhumus G. 1/U. 1 | Koprogenes Mullhumus G. 1/U. 2 | Chemogenes Mullhumus G. 1/U. 3 | Saurer Rohhumus G. 2/U. 1 | Koprogenes Morhumus G. 2/U. 2 | Chemogenes Morhumus G. 2/U. 3 |
| Humusfazies F. | Wechsellagerung mit anorganischen Feinerdekomponenten im Horizont und dessen Gefüge | <p>.../F. 1 Holorganisch</p> <p>a) schütter b) verfilzt *) durch Wurzeln verfilzt **) durch Pilzhyphe verfilzt c) gelartig</p> <p>.../F. 2 Hemorganisch</p> <p>a) locker gemengt b) innig gemengt c) komplex verbunden</p> | | | | | |
| Humusform M. | Morphologie der Humuseinzelheiten (Dispersität und Gestalt) | <p>.../M. 1 Kolloid</p> <p>a) suspensoid b) geformt c) koagulierte</p> <p>.../M. 2 Körnig .../M. 3 Fasrig .../M. 4 Blättrig</p> <p>{ a) grob b) mittel c) fein</p> | | | | | |

a) Die Humusgruppen.

Sämtliche vorkommenden Humusbildungen werden den beiden Humusgruppen: *Mullhumus* oder *Morhumus* untergeordnet. Die Unterscheidung gründet sich auf den *Sättigungsgrad* ⁷⁹ der negativen Oberflächenorte des Humus, mit austauschbaren basischen Kationen.

G. 1 = *Mullhumus* besitzt mittleren bis hohen Sättigungsgrad, der V-Wert ist immer größer als 25 %, oft aber größer als 50 %.

G. 2 = *Morhumus* ist schwach gesättigt bis ungesättigt, er besitzt V-Werte, die kleiner als 25 % sind.

Bei der Abgrenzung der Humusgruppen durch den Sättigungsgrad seiner Umtauschgarnituren darf nicht zu starr an der Zahl festgehalten werden. Im Unsicherheitsgebiet kann man von mullartigem Morhumus oder von morartigem Mullhumus sprechen.

b) Die Humus-Untergruppen.

Die Humusgruppen werden in *Humus-Untergruppen* aufgeteilt, diese klassifiziert man nach der *Entstehungsart* der Humusbildungen. Man unterscheidet folgende Humus-Untergruppen:

U. 1 = *Rohhumus*: Mangelnde Abbauintensität und schwacher zoogener Angriff bedingen die Anhäufung von Humusbildnern und Humoiden mit erhaltenem Zellverband. Er kann der Mull- ⁸⁰ oder der Morhumusgruppe angehören.

z. B.: A₀-Horizont von Podsolen, nicht desorganisierte Humusmassen in Hoch- und Niedermoores, Nadelstreu- oder Morschholzschieben in Piceeten.

U. 2 = *Koprogener Humus*: Durch Bodentiere (Lumbriciden, Arthropoden usw.) zerkleinerte und im Darmtrakt mehr oder weniger chemisch umgewandelte und geformte Humusbildner, Humoide und Humusstoffe.

z. B.: Braunerde-Mull, Arthropoden-Humus saurer initialer Humussilikatböden.

U. 3 = *Chemogener Humus*: Vorwiegend kolloiddisperse Humusstoffe, deren Eigenschaften weitgehend durch Oxydation, Reduktion, Peptisation, Koagulation und Adsorption bedingt sind.

⁷⁹ Sättigungsgrad = Mval. basischer Kationen in Prozent der Umtauschkapazität = V-Wert.

⁸⁰ H. M. Galloway: Ursprung und Eigenschaften des alkalischen Rohhumus. Soil. Sc. 49, 1940, 295—300.

c) Die Humusfazies.

Die Humus-Untergruppen werden nach dem *Vorhandensein anorganischer Bodenkomponenten* innerhalb des betrachteten Profilhorizontes und nach der Wechsellagerung der organischen mit den anorganischen Komponenten in *Humusfazies* unterteilt. Daneben wird bei mineralerdefreien Humusbildungen auch die Art des Horizontgefüges berücksichtigt.

1. *Holorganische Humusfazies*: Die Substanz des betreffenden *Profilhorizontes* besteht zum überwiegenden Teil aus organischen Stoffen. Der *Aschegehalt* der Trockensubstanz bleibt *unter 20 %* und besteht vorwiegend aus der ursprünglichen Pflanzenasche und den sorptiv gebundenen Ionen (Na, K, Ca, Fe usw., PO_4 , SO_4 , CO_3 usw.).

Das Horizontgefüge der holorganischen Humusbildungen kann sein:

a) *Schütter*; die den Horizont bildenden Humusteile (Nadeln, Blätter, Moosstengel, Arthropodenexkreme usw.) sind ohne wesentliche gegenseitige Bindungen.

z. B.: A_0 -Horizont des subalpinen Wald-Humuskarbonatbodens im Bergföhren-Erica -Wald, feinkörniger Humus im A_1^2 -Horizont des Humuspodsols.

b) *Verfilzt*; die Humuskomponenten sind unter sich filz- oder netzartig verflochten oder mechanisch durch Pilzhyphen, Pflanzenwurzeln usw. zusammengehalten.

z. B.: A_1 -Horizont des Wald-Eisenpodsols.

c) *Gelartig*; die Humuskomponenten bilden mehr oder weniger zusammenhaltende, klumpige oder gallertige, knetbare, verquollene Massen.

z. B.: Niedermoor-Humus z. T., Hochmoor-Humus z. T.

2. *Hemorganische Humusfazies*: Hier beeinflussen die mehr oder weniger großen Gehalte an anorganischen Begleitstoffen die Eigenschaften der organischen Bodensubstanz. Hemorganisch ist jede Humusfazies, die in einem Profilhorizont vorliegt, dessen anorganischer Substanzanteil den bloßen Gehalt der an den Humusoberflächen adsorbierten anorganischen Ionen überschreitet. Der *Aschegehalt* solcher humushaltiger Horizonte ist demnach *größer als 20 %*, oft beträgt er 80—98 % der Trockensubstanz. Der betreffende *Profilhorizont* besteht aus einem Gemenge bzw. Komplex organischer *und* anorganischer Bausteine. Die letzteren können sämtliche Dispersitätsstufen umfassen.

In der hemorganischen Humusfazies sind folgende *Wechsellagerungen* der organischen mit den anorganischen Komponenten möglich:

a) *Locker gemengt*; die anorganischen Teile sind locker zwischen die organischen Komponenten eingestreut, ohne mit diesen in enge Bindung zu treten.

z. B.: Arthropodenexkrementen zwischen Kalzitstücke eingestreut wie im Humus der unentwickelten Rendzina des alpinen Caricetum firmae oder der initialen Seslerieto-Sempervireten.

b) *Innig gemengt*; die organischen und anorganischen Komponenten sind in engem Kontakt miteinander, ohne daß zwischen ihnen chemische Kräfte tätig sind.

z. B.: Regenwurmmull der entwickelten Rendzina des Buchen-Weißtannen-Waldes oder der Braunerde des Eichen-Hagebuchen-Waldes.

c) *Komplex verbunden*; zwischen organischen und anorganischen Phasen liegen zum Teil stärkere chemische Bindungen (Azidoid-Basoid-Komplexe) vor.

z. B.: Chemogene Humus-Ton-Komplexe in Tschernosemen, chemogene Humus-Sesquioxid-Komplexe in Podsolen, chemogene Humus-Karbonat-Komplexe in Rendzinen.

d) Die Humusformen.

Innerhalb der Humusfazies werden die *Humusformen* unterschieden. Zur Klassifizierung dienen *morphologische Merkmale*, nämlich die Dispersität und die Gestalt der *Humus-Einzelteilchen*.

1. *Kolloide Humusform*: Die Durchmesser der einzelnen Humusteilchen sind kleiner als 0,002 mm.

a) *Kolloider suspensoider Humus*; der Zusammenhalt der hochdispersen Humusteile ist minimal (löslich im Bodenwasser).

z. B.: Humussole in Hochmooren oder im Podsol.

b) *Kolloider geformter Humus*; mit vorwiegend mechanisch-physikalischem Zusammenhalt der kolloiden Teilchen, wobei auch gröbere anorganische oder organische disperse Phasen in den Aggregaten eingeschlossen sein können.

z. B.: Arthropoden-Humus, Regenwurmmull.

c) *Kolloider koagulierter Humus*; zwischen den kolloiden Teilchen wirken stärkere van der Waals'sche und chemische Kräfte.

z. B.: Humuskoagulate im B_h-Horizont des Humuspodsols.

2. *Körnige Humusform*: Besteht vorwiegend aus fein- bis grobdispersen, kugeligen, kubischen oder prismatischen Humus-Einzelteilchen. Es handelt sich häufig um mechanisch oder biologisch zerkleinerte Humusbildner und Humoide.

z. B.: Rotteprodukte von Wurzeln und andern Holzresten.

3. *Fasrige Humusform*: Besteht vorwiegend aus fein- bis grobdispersen, fädigen, fasrigen oder stengligen Humus-Einzelteilchen.

z. B.: Coniferen- oder Erica-Nadelstreue, Moosstämmchen- oder Cariceendetritus, Feinwurzelndetritus.

4. *Blättrige Humusform*: Besteht vorwiegend aus fein- bis grobdispersen, blättrigen Humus-Einzelteilchen.

z. B.: Buchenblätter-Rohhumus, Vaccinien- oder Dryasblattfallschicht.

e) Systematische Nomenklatur-Beispiele.

Die Reihenfolge der nachstehenden Beispiele richtet sich nach dem Aufbau der Tabelle 2, S. 282. Die Anordnung der aufgezählten Humusbildungen soll daher keinen Hinweis auf ihre praktische Bedeutung oder die Häufigkeit ihres Vorkommens geben. Die Buchstaben- und Zahlenformeln sind aus der Tabelle 2 direkt abzulesen.

I. Mullhumusgruppe : G. 1.

A. Untergruppe : *Milder Rohhumus*

- | | |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. G. 1/U. 1/F. 1/M. 4 | <i>Blättriger, holorganischer, milder Rohhumus</i> (in hartem Wasser angeschwemmter Dryasblatt-Detritus). |
| 2. G. 1/U. 1/F. 2/M. 3 | <i>Fasriger, hemorganischer, milder Rohhumus</i> (Wurzelhorizonte von Schoenetum-Niederungsmooren). |

B. Untergruppe : *Koprogener Mullhumus*

- | | |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. G. 1/U. 2/F. 2b/M. 1b | <i>Kolloider, geformter, hemorganisch locker-gemengter, koprogener Mullhumus</i> (Arthropoden-Mull im alpinen Humuskarbonatboden (unentwickelte Rendzina des Caricetum firmae)). |
| 2. G. 1/U. 2/F. 2b/M. 1b | <i>Kolloider, geformter, hemorganisch innig-gemengter, koprogener Mullhumus</i> ; Lumbriciden-Mull der Braunerde oder der entwickelten Rendzina des Buchen-Weißtannen-Waldes. |

C. Untergruppe : *Chemogener Mullhumus*

- | | |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G. 1/U. 3/F. 2c/M. 1c | <i>Kolloider, koagulierter, komplex verbundener, chemogener Mullhumus</i> ; Humus-Karbonat-Komplexe im rA ₂ -Horizont des extrem degradierten subalpinen Humuskarbonatbodens; Ton-Humus-Komplexe des Tschernosem. |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

II. Morhumus-Gruppe.

A. Untergruppe: *Saurer Rohhumus*

1. G. 2/U. 1/F. 1b*b**/M. 3b *Mittelfasriger, wurzel- und pilzhypphenverfilzter, holorganischer, saurer Rohhumus* (A₁-Horizont des subalpinen Rhodoreto-Vaccinietum cembretosum-Eisen-Podsols).
2. G. 2/U. 1/F. 1a/M. 4a *Grobblättriger, schütterer, holorganischer, saurer Rohhumus* (Blattfallschicht der podsolierten Braunerde des Querceto-Betuletum).
3. G. 2/U. 1/F. 2a/M. 3b *Mittelfasriger, hemorganischer, locker gemengter, saurer Rohhumus* (A₀/A₁-Horizonte initialer Humus-silikatböden der subalpinen bis alpinen Empetreto-Vaccinieten).

B. Untergruppe: *Koprogener Morhumus*

1. G. 2/U. 2b/F. 1a-1b*/M. 1b *Kolloider, geformter, schütterer bis wurzelverfilzter, holorganischer, koprogener (Arthropoden-) Morhumus* (A₁¹-Horizont des subalpinen Humus-podsols im Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum).
2. G. 2/U. 2/F. 2a/M. 1b *Kolloider, geformter, hemorganischer, schütterer, koprogener (Arthropoden-) Morhumus* (alpiner Humussilikatboden im Caricetum curvulae).

C. Untergruppe: *Chemogener Morhumus*

1. G. 2/U. 3/F. 1c/M. 1a-b *Kolloider, suspensoider bis geformter, holorganischer, gelartiger, chemogener Morhumus* (gut zersetzter Radicellen-Hochmoor-Torf).

2. G. 2/U. 3/F. 2c/M. 1c

Kolloider, koagulierter, hemorganisch komplex verbundener, chemogener Morhumus (Me_2O_3 -Humuskomplexe der Bh-Horizonte des subalpinen Humuspodsols unter dem Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum bzw. unter dem Calluneto-Arcrostaphyletum).

C. Allgemeiner experimenteller Teil.

1. Zusammenstellung der für die Profiluntersuchungen benützten Methoden.

Die Profiluntersuchungen gründen sich in dieser Arbeit auf nachstehende morphologische, chemische und physikalische Beobachtungen und Messungen :

A. Untersuchung des anorganischen Bodenanteils.

- | | |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Mengenanteil des Bodenskeletts : | Schätzung nach Skala 0—IV ⁸¹ . |
| 2. Körnungsanalyse in der Feinerde : | Kopecki-Schlämmanalyse und Pipett-Sedimentationsanalyse ⁸³ . |
| 3. Petrographie und mineralogische Zusammensetzung : | Makroskopische Bestimmung, Dünnschliff und Auflichtmikroskopie. ⁸⁴ |
| 4. Verwitterungsgrad : | Schätzung nach Skala 0—IV ⁸² , makro- und mikroskopische Beobachtung von Spaltenbildungen, Porosität, Verfärbungen, Umwandlungen, Zerfallserscheinungen usw. |
| 5. Chemische Ton-Analysen: | Sodaauflösung ⁸⁵ . Berechnung des $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ -Verhältnisses. |
| 6. Karbonatgehalt : | CO_2 -Analyse nach Lunge-Rittener ⁸⁶ . |

⁸¹ Skelettanteil :

- 0 = fehlend
- I = wenig
- II = mäßig
- III = viel
- IV = sehr viel

⁸² Verwitterungsgrad :

- 0 = fehlend
- I = gering
- II = mäßig
- III = groß
- IV = sehr groß

⁸³ Wiegner-Pallmann: Anleitung zum quantitativen agrikulturechemischen Praktikum. 2. Aufl. Berlin, Verlag Bornträger, 1838 (siehe S. 141, 148 und 238).

⁸⁴ W. Kubiena: Micropedology. Collegiate press, inc. Ames, Iowa, 1938.

⁸⁵ J. Jakob: Anleitung zur chemischen Gesteinsanalyse. Berlin, Verlag Bornträger, 1928.

⁸⁶ W. D. Treadwell: Lehrbuch der Analytischen Chemie. II. Bd., S. 336. Leipzig und Wien, F. Deutike, 1943.

B. Untersuchung der Humussubstanz.

1. Bestimmung des Gesamthumus : Nasse Verbrennung vgl. Abschnitt II C. d. S. 301.
2. Bestimmung des Glühverlustes : Bei Karbonatböden unter Abzug der Karbonat-CO₂.
3. Bestimmung des Gesamtstickstoffs : Nach Kjeldahl ⁸³.
4. Morphologie der Humussubstanz : Mikroskopische und makroskopische Untersuchung der Art, Form, Menge der Humusbildner, der Humoide und der Humusstoffe.
5. Tätigkeit der Bodenlebewesen : Mikroskopie der Bodentierexkremente, der Fraßspuren, der Pilzentwicklung usw., Schätzung der biologischen Aktivität nach Skala 0—IV ⁸⁷.
6. Systematische Klassifikation der Humusbildungen: Vgl. Abschnitt II B. 3 und Tabelle 2, S. 282.

C. Untersuchung der Umtauschkomplexe.

1. Die pH-Werte der Horizonte : Frisch, in Wassersuspension elektrometrisch gemessen.
2. Die Umtauschkapazität der Feinerde : Vgl. Abschnitt I C. 3. c.
3. Der Sättigungsgrad : V-Wert nach V a g e l e r.

$$V\text{-Wert} = \frac{S \cdot 100}{UK}$$

S = basische Kationen in Mval. je 100 g Boden.
 UK = Umtauschkapazität.
4. Anteil der basischen Kationen in der Umtauschgarnitur : Bestimmung der Na-, K-, Mg-, Ca-, Mn-Ionen durch Elektrodialyse.
5. Die Anionen : SO₄- und PO₄-Ionen-Bestimmung durch Elektrodialyse.

D. Untersuchung von physikalischen Eigenschaften der Baueinheiten des Bodens.

1. Krümelung : Schätzung nach Skala 0—IV ⁸⁸, Beurteilung des Mengenanteils der Krümel am Gesamtboden, der Krümelgestalt und ihrer Stabilität.
2. Feinkoagulate : Schätzung des Mengenanteils nach Skala 0—IV ⁸⁸.
3. Horizontgefüge :
 a) Litergewicht : Trockensubstanzgewicht von einem Liter gewachsenem Boden.

⁸⁷ *Biologische Aktivität* (vgl. Definition S. 278, sub k) :
 0 = fehlend
 I = schwach
 II = mäßig
 III = stark
 IV = sehr stark

⁸⁸ *Krümelung bzw. Feinkoagulate* :
 0 = fehlend
 I = schwach
 II = mäßig
 III = stark
 IV = sehr stark

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b) Porenvolumen : | Wasserkapazität und Luftkapazität nach B u r g e r ⁸⁹ . |
| c) Wasserdurchlässigkeit : | Sickerversuche nach B u r g e r ⁸⁹ . Einsickerungsdauer von 1 Liter H ₂ O auf einer Grundfläche von 1 dm ² . |
| d) Morphologische Untersuchung des Horizontgefüges : (Entwicklungsgrad desselben) | Schätzung nach Skala 0—IV ⁹⁰ . |
| 4. Die Bodenfarbe der Horizonte : | Nach Unesma-Farbtafeln ⁹¹ . |
| 5. Hygroskopizitätszahl : | Nach K u r o n ⁹² . |
| 6. Benetzungswärme : | Im Mischkalorimeter nach J a n e r t ⁹³ . |

E. Untersuchung der Temperatur in den Bodenhorizonten.

Die wirksame Mitteltemperatur eT-Werte⁹⁴.

2. Die morphologische Untersuchungsmethodik.

Von Wichtigkeit ist die *makroskopische Untersuchung* des Bodenprofils an Ort und Stelle. Dazu muß ein ca. 80 cm breiter und 150 cm langer Graben möglichst bis auf die Tiefe des nahezu unverwitterten Untergrundes geöffnet werden. Letztere Forderung begegnet bei vorverwitterten Muttergesteinen und bei alluvialem Boden Schwierigkeiten. Die Profilwand wird maßstäblich gezeichnet⁹⁵ und die genetischen Bodenhorizonte beschrieben. Die Beschreibung enthält Angaben über : Skelettgehalt, Bodenart, Karbonatgehalt, eventuell vorhandene Ausscheidungen, Durchwurzelung, Humusgehalt, systematische Stellung des Humus, Krümelung, Horizontgefüge und Farbe des Horizontes.

Die Methodik der *mikroskopischen Bodenuntersuchung* ist besonders durch W. K u b i e n a und seine Schüler gefördert worden. Wichtige Methoden der Bodenmikroskopie sind :

⁸⁹ H. B u r g e r : Physikalische Eigenschaften der Wald- und Freilandböden. Mitteilungen d. Schweiz. Centralanstalt f. forstliches Versuchswesen, Zürich, 1922.

⁹⁰ *Entwicklungsgrad des Bodengefüges :*
0 = primitiv
I = schwach
II = mäßig
III = gut
IV = sehr gut

⁹¹ U n e s m a , 24 Farbtafeln, Verlag Unesma G. m. b. H., Großbothen, zu beziehen durch Gebr. Zürcher, Verlag, Zürich 1.

⁹² K u r o n : Versuche zur Feststellung der Gesamtoberfläche an Erdböden, Tonen und verwandten Stoffen. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkunde A. 18, 1930, S. 179—203.

⁹³ H. J a n e r t : Untersuchungen über die Benetzungswärme des Bodens. Zeitschr. für Pflanzenern. u. Bodenkunde 19, 1931 A, 281—309.

⁹⁴ H. P a l l m a n n , E. E i c h e n b e r g e r und A. H a s l e r. H. P a l l m a n n und E. F r e i : loc. cit. S. 270.

⁹⁵ Vgl. Profilzeichnung S. 308.

Mikroskopie des Bodendünnschliffs;
Mikroskopie des Bodengefüges in natürlicher Lagerung
(an ungestörten Proben oder im Felde);
Mikroskopie von Bodeneinzelteilchen im Auflicht;
Mikrophotographie.

In bezug auf methodische Einzelheiten muß hier auf die Veröffentlichungen von K u b i e n a und seinen Mitarbeitern verwiesen werden ^{96, 97, 98, 99, 100}. Die mikromorphologische Untersuchung stellt eine bedeutende Bereicherung der bodenkundlichen Methodik dar, doch bedarf sie stets einer Unterbauung und Ergänzung durch physikalische und chemische Analysen.

3. Chemische Untersuchungsmethoden und Besprechung methodischer Ergebnisse.

a) Bestimmung der austauschbaren Wasserstoffionen durch Perkolation.

Der entbaste Boden ist eine polybasische Säure mit n-Dissoziationsstufen. Es ist unmöglich, die den kleinsten Dissoziationskonstanten zugehörigen Wasserstoffionen vom Bodenteilchen ohne weitgehende Veränderung desselben abzulösen. Die stärksthäftenden Wasserstoffionen bedürfen für ihre Desorption und Neutralisation hoher alkalischer Reaktionswerte; bei diesen ist die Gefahr irreversibler Strukturstörungen, komplizierender Aluminat- und Ferratbildungen sehr groß. Es ist deshalb angezeigt, auf die möglichst vollständige Feststellung sämtlicher umtauschbarer Wasserstoffionen zu verzichten, um nur jene zu bestimmen, die bei einem pH-Wert von z. B. 8,2 oder 9,0 austauschbar sind.

Für diese Bestimmung eignet sich nach unsern Erfahrungen das *Perkolationsprinzip* am besten, das nachstehend beschrieben werden soll (vgl. Fig. 2).

Das durchlochte Porzellanplättchen (K) ¹⁰¹, das den Boden des Perkolationszylinders (G) bildet, wird mit einer dicken, filtrierenden Watteschicht (J) überdeckt, darauf schichtet man 10 bis 20 g der lufttrockenen Feinerde (H). Der Perkolationszylinder wird nun der Apparatur angeschlossen. Die Austauschflüssigkeit fließt langsam aus dem Reservoir (C) durch die Bodenprobe. Die Durchflußgeschwindigkeit beträgt zirka 500 cm³ in 12 Stunden. Zum Perkolieren verwendet man n/1 Kalziumazetatlösung, die genau auf pH 8,2 eingestellt ist. Der ganze Ionenaustausch verläuft unter CO₂-Ausschluß (A).

⁹⁶ W. K u b i e n a: loc. cit., S. 288.

⁹⁷ W. K u b i e n a: Verfahren zur Herstellung von Dünnschliffen von Böden in ungestörter Lagerung. Zeiß Nachr. 2, 1937, 81—91.

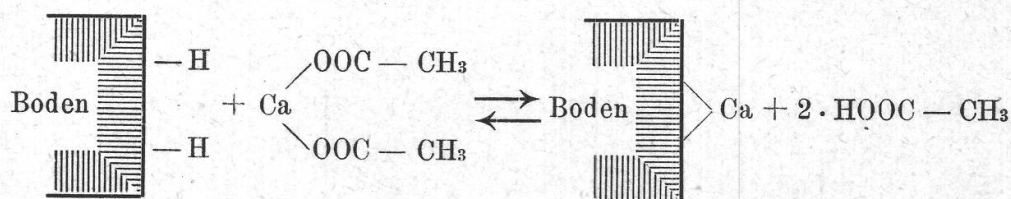
⁹⁸ W. K u b i e n a: Die Dünnschlifftechnik in der Bodenuntersuchung. Forschungsdienst Sonderdr., 1941, S. 567.

⁹⁹ W. R o t t e r: Herstellung von Bodendünnschliffen nach dem Resinolverfahren. Bodenkunde u. Pflanzenern. 25, 1941, 251—254.

¹⁰⁰ W. K u b i e n a: Mikroskopische Humusuntersuchungen. Forschungsdienst, 1942. Sonderheft 17, S. 62—70.

¹⁰¹ Große Buchstaben in () beziehen sich auf die Bezeichnungen der Fig. 2.

Das Perkolationsfiltrat enthält die bis pH 8,2 mobilisierbaren H-Ionen des Bodens, die nach folgendem Reaktionsschema gegen Ca-Ionen ausgetauscht wurden :



Die im Filtrat vorliegende Essigsäure wird bestimmt, indem man mit $\frac{1}{10}$ normaler Natronlauge elektrometrisch den Anfangswert von pH 8,2 zurücktitriert. Die Titration wird in Stickstoffatmosphäre vorgenommen, um die CO_2 der Luft fernzuhalten.

Der Austausch geht anfänglich rasch, gegen den Schluß verläuft er aber immer langsamer. Bei Böden mit mehr als 10 Mval. H-Ionen pro 100 g Boden TS. sind nach einem Liter Durchflußvolumen etwa 60 bis 70 % der austauschbaren H-Ionen in die Lösung übergegangen : bei Böden mit weniger Wasserstoffionen geht der Austausch noch rascher. Zuweilen sind für die erschöpfende Perkolation 4 bis 5 Tage notwendig. Die Automatisierung der Perkolationsapparatur ist daher sehr zweckmäßig, man vergleiche Figur 2 (E).

b) Die Bestimmung der Pufferungszahl.

In HCl- bzw. KOH-Lösungen abgestufter Azidität bzw. Basizität (abgestuft zwischen pH 0 = ln HCl und pH 14 = ln KOH) werden pro 1000 cm^3 je 400 g lufttrockene Feinerde eingewogen¹⁰². Nach zirka 48stündigem Stehen hat sich das H-Ionen-Gleichgewicht eingestellt, und der pH-Wert des Systems wird elektrometrisch gemessen. Die Abweichung des beobachteten pH-Wertes von dem in der vorgelegten reinen HCl- bzw. KOH-Lösung entspricht dem Pufferungsvermögen des Bodens.

Trägt man die H- bzw. die OH-Ionenkonzentration der vorgelegten reinen Lösungen einerseits und die beobachtete H- bzw. OH-Ionenkonzentration des gepufferten Systems andererseits in identischem Maßstab¹⁰³ in ein Koordinationssystem ein, so erhält man ein anschauliches Bild der Pufferung des Bodens¹⁰⁴ (vgl. Fig. 3). Je stärker die Pufferkurve von der Winkelhalbierenden des Koordinatensystems abweicht, desto größer ist das Pufferungsvermögen des Bodens; bei « *maximaler* »

¹⁰² Dies entspricht einem Boden : Lösungsmittel-Verhältnis von 1 : 2,5 (z. B. 10 g Boden und 25 cm^3 Lösung), wie es für pH-Messungen von der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft empfohlen wurde.

¹⁰³ Die absoluten H-Ionenkonzentrationen lassen sich nicht gut auftragen, deshalb verwendet man ihre Quadratwurzeln.

¹⁰⁴ H. Jenny : Reaktionsstudien an schweizerischen Böden. Landw. Jahrbuch der Schweiz 39, 1925, 261—285.

Pufferung verläuft die Kurve auf der Abzisse bis zum Punkt pH 0 bzw. pH 14. Die « maximale » Säurepufferung wird also durch die Dreiecksfläche veranschaulicht, die die Winkelhalbierenden als Hypothenuse und die eine Abzissenhälfte bis zum Punkt pH 0 als Kathete hat; für die « maximale » Basenpufferung ist die spiegelbildliche Dreiecksfläche maßgebend.

Die *Pufferungszahl* kennzeichnet das *Pufferungsvermögen der Böden gegen Säuren und Basen durch eine Zahl*. Diese gibt an, wie groß der %ische Anteil der für die Pufferung charakteristischen Koordinatenfläche (die von der Pufferkurve und der Winkelhalbierenden eingeschlossene Fläche, vgl. Fig. 3) an der Gesamtfläche der « maximalen » Säure- bzw. Basenpufferung ist (Dreieck zwischen Abzisse und Winkelhalbierenden). Die kleinste Pufferungszahl ist 0, die größte, bei «maximaler» Pufferung, ist 100 %.

- c) Die Bestimmung der austauschbaren basischen Kationen und der Anionen.

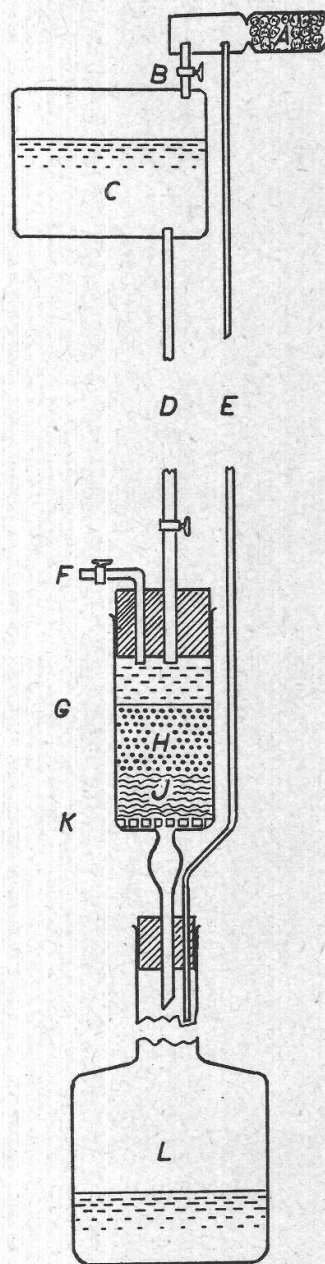
Der Austausch mit Salzsäure.

10—20 g karbonatfreier Boden werden mit 300 ccm $\frac{1}{10}$ normaler Salzsäure während einer Stunde in der Schüttelmaschine geschüttelt. Die Suspension läßt man absetzen, hierauf wird filtriert. Im blanken Filtrat werden die Sesquioxyde ausgefällt und darauf die Alkali, die Erdalkalitionen und das Mn spektographisch bestimmt ¹⁰⁵.

Die Verdrängung mit Salzlösungen.

Zur Bestimmung der adsorbierten Ionen in salzarmen und Me^{2+} -karbonatfreien Böden eignen sich einnormale Lösungen von Ammonazetat oder Ammonchlorid gut. Die Analyse stößt dagegen in erdalkalikarbonatreichen Böden auf Schwierigkeiten, da diese Karbonate eine nicht zu vernachlässigende Löslichkeit aufweisen.

N. Puri ¹⁰⁶ arbeitet mit einer alkalisch reagierenden Mischlösung von Ammonoxalat, -azetat und -karbonat, in welcher die Erdalkalikarbonate des Bodens unlöslich sind. Das austauschbare Kalzium des

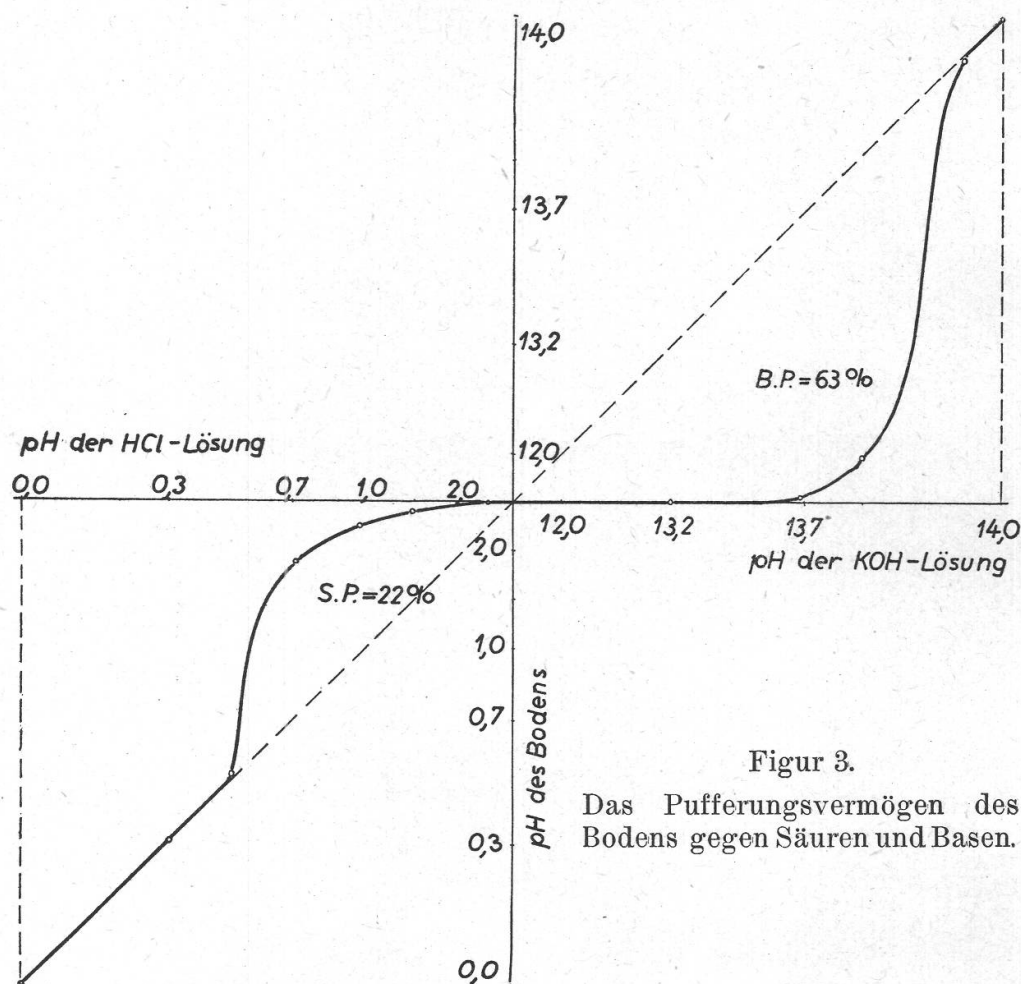


Figur 2.
Perkulations-
Apparatur.

¹⁰⁵ H. Pallmann, A. Hasler und A. Schmuziger: loc. cit S. 271.

¹⁰⁶ N. Puri: Estimating exchangeable calcium and other cations in soils. Soil Sc. 42, 1936, 47.

Bodens wird als unlösliches Ca-Oxalat auf dem Filter zurückgehalten, wodurch die Oxalat-Konzentration des Filtrats äquivalent der ausgetauschten Ca-Ionenmenge abnimmt. Der Unterschied im KMnO_4 -Verbrauch bei der Oxalattitration zwischen der ursprünglichen Austausch-



Figur 3.
Das Pufferungsvermögen des Bodens gegen Säuren und Basen.

lösung und diesem Filtrat entspricht dem Gehalt an ausgetauschtem Kalzium. Die übrigen ausgetauschten Ionen können im Filtrat spektrophotographisch bestimmt werden.

Nach unseren Erfahrungen sind die Fehlerquellen bei der Methode von Puri ziemlich groß, denn die ammoniakalische Lösung dispergiert Humuskolloide, welche bei der KMnO_4 -Titration stören. Im Filtrat konnten immer noch kleinere Kalziummengen festgestellt werden, die auf dem Filter hätten zurückgehalten werden sollen. In Abänderung der Purischen Vorschrift ließen wir das Ammonoxalat weg und perkolierten (in der in Fig. 2 abgebildeten Apparatur) den Boden mit einer alkalisch reagierenden Mischlösung von $\frac{n}{2}$ Ammonazetat und $\frac{n}{4}$ Ammonkarbonat. In dieser sind die Erdalkalikarbonate des Bodens kaum löslich,

dagegen werden die adsorbierten Ca- und Mg-Ionen gut ausgetauscht. Das tropfenweise durch den Boden sickende Lösungsvolumen soll mindestens 2 Liter betragen; es sind dann nach unsern Beobachtungen etwa 85 bis 95% der mit dieser Lösung austauschbaren Ionen im Filtrat bestimmbar. Vor der spektrographischen Analyse der Kationen müssen die Ammonsalze abgeraucht werden. Aluminiumionen sind im Perkolat nicht vorhanden und vermögen die Spektralanalyse nicht zu stören.

Der Austausch durch Elektrodialyse.

Mattson¹⁰⁷, Bradfield¹⁰⁸, Sven Odén¹⁰⁹ und andere haben versucht, die an den Bodenoberflächen adsorbierten Ionen durch Elektrodialyse abzulösen und sie im Spülwasser der Elektroden zu analysieren. Köttgen, Jung¹¹⁰ und Diehl¹¹¹ entwickelten die noch rascher arbeitende Elektro-Ultrafiltration.

Für unsere Untersuchungen verwendeten wir einen selbstgebauten *Serien-Elektrodialysator* (s. Fig. 4) mit getrennter Abnahme des Kathoden- und des Anodenspülwassers. Das Gehäuse des Apparates besteht aus einem massiven Eichenklotz (Q), in dem die Dialysenkammern ausgebohrt sind. Eine aufgespritzte Latex-Emulsion eignet sich sehr gut zur Abdichtung des Holzes. Zur Untersuchung werden 5—10 g Erde in selbstverfertigte, dünnwandige Kollodiumsäcke (O) eingewogen; ein poröser Porzellantiegel (N) mit durchlochtem Boden gibt dieser empfindlichen Membran den nötigen Halt; dieser Tiegel wird samt Inhalt in die hölzerne Dialysenzelle gestellt. Zur Verdünnung des zu untersuchenden Bodens kann elektrolytfreier, grobkörniger Quarzsand verwendet werden. Das Boden-Quarzsandgemisch wird durchfeuchtet und mit einer 1—2 cm dicken Watteschicht (L) zugedeckt; dieser wird ein durchlochstes Porzellanplättchen (M) aufgelegt; auf letzteres kommt die positive Elektrode (H) zu liegen, welche mit einer 0,5 cm hohen Wasserschicht überdeckt ist. Eine einfache Hebervorrichtung (E) hält das Flüssigkeitsniveau beim tropfenweisen Wasserzulauf konstant. Im Kathodenraum, der zwischen der Kollodiummembran und der mit Latex überzogenen Eichenholzwand liegt, wird das Wasser ebenfalls konti-

¹⁰⁷ S. Mattson: Electrodialysis of the colloidal soil. J. of Agric. Res. 33, 1926.

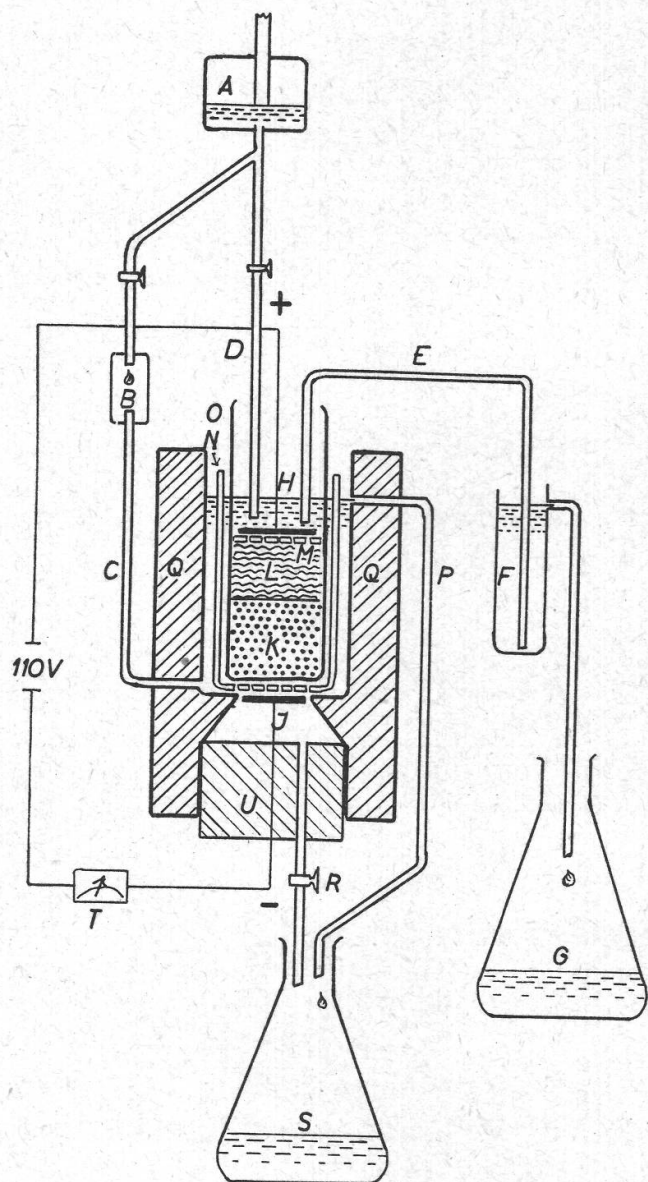
¹⁰⁸ R. Bradfield: The use of electrodialysis in physico-chemical investigation of solis. Proc. a. Papers, 1. Internat. Congr. Soil Sc. 2, 264, 1927.

¹⁰⁹ Sven Odén, Torgil Wijkström: Elektrodialysen, dess Methodik och Tillämpning på Jordartsundersköningar. Avdelningen f. landbrukskemi Nö. 42, 1931.

¹¹⁰ Köttgen und Jung: Zur Frage der nachschaffenden Kraft des Bodens. Bodenkunde u. Pflanzenern. 24, 1941, 257.

¹¹¹ Köttgen und Diehl: Über die Anwendung der Dialyse und der Elektro-Ultrafiltration zur Bestimmung des Nährstoffbedürfnisses des Bodens. Pflanzenern. u. Bodenkunde 14, 1929, 65.

nuierlich erneuert (C), so daß je nach Größe des Stromdurchgangs in einer Stunde 50 bis 500 cm³ CO₂-freies Wasser durchlaufen. Es ist vorteilhaft, den Boden zuerst in der stromlosen Apparatur über Nacht im Wasser stehen zu lassen und erst am Morgen mit der Elektrodialyse



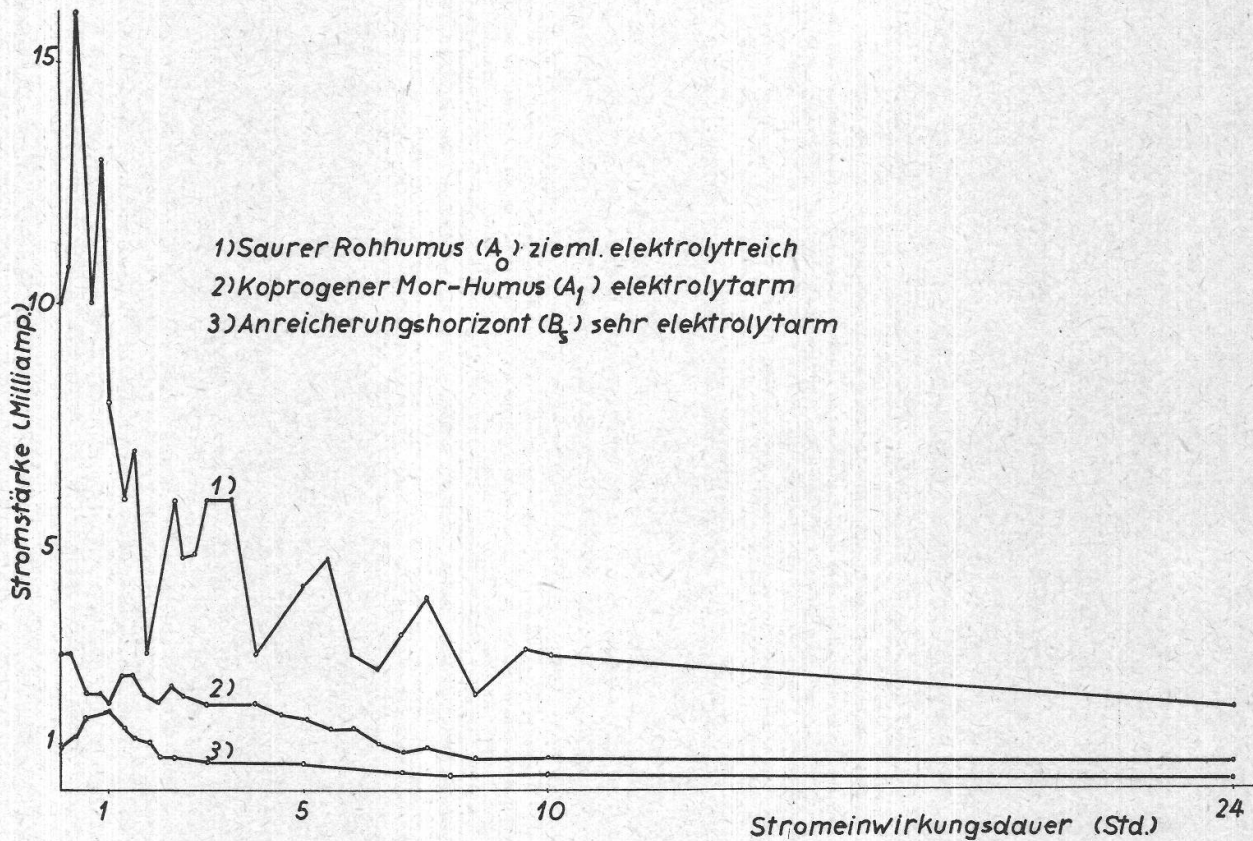
Figur 4.
Querschnitt durch den Elektrodialysierapparat zur Bestimmung der austauschbaren Kationen und Anionen im Boden.

zu beginnen (Gleichstrom von 110 V Spannung). Die Stromstärke wird periodisch kontrolliert und am Milliampèremeter (T) abgelesen. Die Kurve « Stromstärke — Zeit » ist für den Verlauf des Ionenaustausches typisch (vgl. Fig. 5); dabei sind weniger die absoluten Stromstärken als deren zeitliche Veränderungen zu beachten.

In der Kationen- und Anionenlösung werden die Ionen analytisch bestimmt. Die bloße Titration dieser Lösungen gibt unzuverlässige, meist zu hohe Resultate. Auch in anscheinend klaren Lösungen sind

immer noch säure- bzw. laugenverbrauchende Kolloide in wechselnder Menge vorhanden.

Ein Vergleich der Resultate nach verschiedenen Methoden ermittelter Umtauschkapazitäten ist dabei interessant. Die Umtauschkapa-



Figur 5.

Milliampèrekurven bei der Elektrodialyse eines Podsols.

zitäten haben den *Charakter methodisch konventioneller Kennzahlen*¹¹². Dies gilt auch für den *Anteil der einzelnen Ionenarten*. Tabelle 3 zeigt, wie beispielsweise die Menge der austauschbaren Kalziumionen bei Anwendung verschiedener Bestimmungsmethoden schwanken kann. Das Ca-Ion zeigt unter den bestimmten Austauschionen die größten methodisch bedingten Schwankungen.

Auch bei MgCO_3 - und CaCO_3 -haltigen Böden *vermag die Elektrodialyse gute Resultate zu liefern*. Sie hat ferner den großen Vorteil, die Ionen in reinen, direkt verarbeitbaren Lösungen anzuliefern; bei der Verwendung von Ammonsalzen müssen diese vor der analytischen Bestimmung der Ionen wieder abgeraucht und der dispergierte Kolloidhumus eventuell wegoxydiert werden; im n/10 Salzsäure-Auszug ist eine Ausfällung der gelösten Sesquioxide vor der Spektralanalyse not-

¹¹² H. P a l l m a n n : loc. cit. S. 279, Anm. 68.

Tabelle 3.

Austauschbare Kalziumionen nach verschiedenen Methoden ermittelt.
(Milliäquivalent Ca-Ionen pro 100 g Boden TS.)

| Bodenhorizont | Austauschmethode | | |
|----------------------|------------------|------------------------------------|----------------|
| | n/10 HCl | NH ₄ -Azetat- lösung | Elektrodialyse |
| Karbonat- boden : | | | |
| rA ₀ | | 44,8 | 15,2 |
| rA ₁ | | 10,1 | 8,8 |
| rA ₂ | | 4,5 | 11,8 |
| Podsol : | | | |
| A ₀ | 33,5 | 24,8 | 38,7 |
| A ₁ | 5,8 | 1,8 | 2,5 |
| A ₂ | 0,1 | 0,3 | 0,6 |
| B _h | 0,4 | 0,1 | 1,3 |
| B _s | 0,5 | 0,1 | 0,5 |
| C | 5,6 | 0,1 | 0,5 |

wendig. Die HCl-Methode kann außerdem nur bei erdalkalikarbonatfreien Böden angewendet werden.

Die adsorbierten *Anionen* können am einfachsten im Spülwasser der Anode bei der Elektrodialyse bestimmt werden. In dieser Lösung sind die Anionen kolorimetrisch oder gravimetrisch zu analysieren, eine bloße Titration der Anodenflüssigkeit gibt unzuverlässige Resultate. Auch der Salzsäureauszug und die Ammonazetat-Austauschlösung können auf Anionen geprüft werden, jedoch ist dies mit größeren Schwierigkeiten verbunden, da die Analysenflüssigkeit viele Lösungsgenossen enthält, die die Untersuchung komplizieren.

Die Bestimmung der Umtauschkapazität.

Die Umtauschkapazität (UK) ist ein Maß für die Gesamtheit der Kationen sorbierenden Oberflächenorte des Bodens, ausgedrückt in Milliäquivalenten pro 100 g Bodentrockensubstanz. Besser wäre es, diesen Wert « Kationen-Umtauschkapazität » zu nennen (K. UK), ihr gegenüber stünde die Anionen-Umtauschkapazität (A. UK). Erstere entspricht dem T-Wert von V a g e l e r ¹¹³.

Die Umtauschkapazität kann sowohl als *Additionsresultat* der einzelnen Kationen oder als *Gesamtwert* direkt durch Ausschütteln des

¹¹³ P. V a g e l e r: Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens. J. Springer, Berlin 1932.

Bodens mit $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ¹¹⁴, Ammonazetat¹¹⁵ usw. ermittelt werden. In unsern Untersuchungen ist die Umtauschkapazität als Summe der austauschbaren basischen Kationen und Wasserstoffionen errechnet worden. Die so indirekt analytisch erhaltenen Resultate fallen immer höher aus als die der direkten, gesamthaften Bestimmung mit Ammonazetat nach der Methode von K u r o n und J u n g¹¹⁶, was in Tabelle 4 gezeigt wird.

Tabelle 4.

Direkte und indirekte Ermittlung der Umtauschkapazität (K.UK)
(Milliäquivalente Ionen pro 100 g Boden TS.)

| Bodenhorizont | K. UK direkt ermittelt aus NH_4 -Adsorption ¹¹⁶ | K. UK indirekt ermittelt als Additionsresultat |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>Karbonatboden :</i> | | |
| rA_0 | 131,5 | 201,6 |
| rA_2 | 3,3 | 13,5 |
| rAC | 2,4 | 10,0 |
| <i>Podsol :</i> | | |
| A_0 | 158,0 | 226,7 |
| A_1 | 127,5 | 205,6 |
| A_2 | 1,5 | 9,5 |
| B_h | 64,5 | 103,8 |

Durch die Ammonazetatlösung von pH 7 werden erwartungsgemäß weniger H-Ionen ausgetauscht. Das Beispiel in Tabelle 4 zeigt auch eindrücklich, wie stark die Größe der Umtauschkapazität von der angewandten Untersuchungsmethode abhängig ist.

Die Pflanzennährstoff-Verhältnisse des Bodens.

Bei der Beurteilung der Nährstoffverhältnisse des Bodens sind zu beachten :

Die *Menge der austauschbaren basischen Kationen und der Anionen* pro Gewichtseinheit Boden.

Die *Haftfestigkeit der austauschbaren Ionen*. Diese ist abhängig :

— Bei gleicher Oberflächenkonzentration von der spezifischen Haftfestigkeit der verschiedenen Ionen (z. B. Ca-Ionen sind oft stärker gebunden als K-Ionen).

¹¹⁴ F. Scheffer und H. Zöberlein: cit. Handbuch der Bodenlehre, 1. Ergänzungsb. 1939, S. 344.

¹¹⁵ K u r o n und J u n g: Beitrag zur Methodik der Adsorptionskapazitäts-Bestimmung von Böden und Bodenkolloiden. Bodenkunde u. Pflanzenern. 21/22, 1940, S. 569.

¹¹⁶ K u r o n und J u n g: Beitrag zur Methodik der Adsorptionskapazitäts-Bestimmung von Böden und Bodenkolloiden. Bodenkunde u. Pflanzenern. 21/22, 1940, S. 569.

- Von der spezifischen Oberflächenkonzentration einer Ionenart, je größer die statistische Dichte ist, mit der eine Ionenart die adsorbierende Bodenoberfläche besetzt, um so lockerer scheint deren Bindung (vgl. Kapitel II C 4).
- Vom strukturellen Aufbau der Bodenumtauschkörper, an Innenoberflächen ist der Ionenumtausch oft gehemmt.

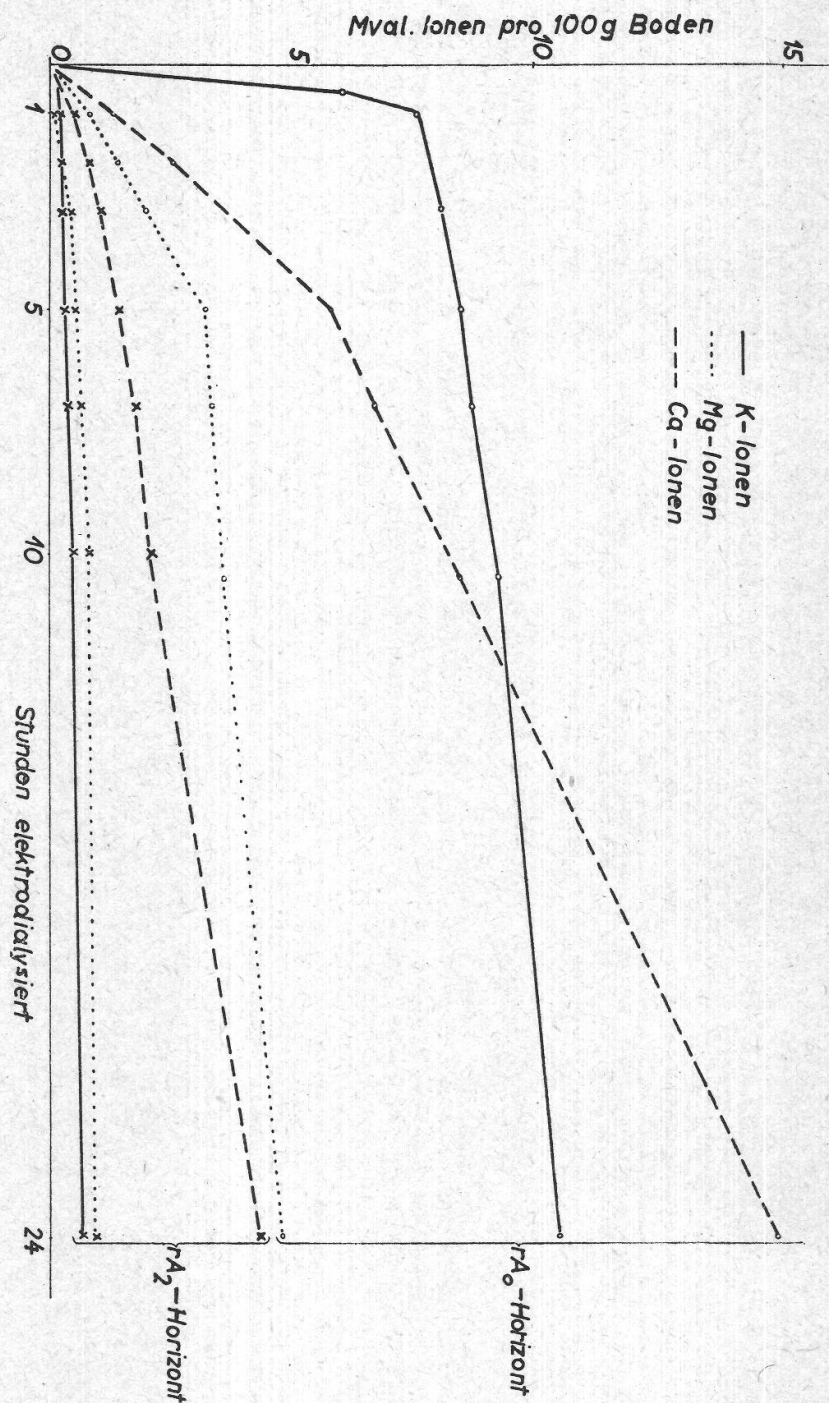
Die *Menge der potentiellen, freilöslichen Pflanzennährsalze* in der Bodenlösung (Düngsalze, wasserlösliche Salze in ariden Böden); und die Menge der in Mineralen usw. gebundenen, durch die Verwitterung nach und nach mobilisierbaren Nährstoffreserven.

In humiden Böden ist der größte Teil der aktuellen, mineralischen Nährstoffe in Ionenform an den aktiven Bodenoberflächen adsorbiert; er wird durch Ionenumtausch von den Pflanzenwurzeln mobilisiert. Für die nachhaltige Nährstoffbelieferung der Pflanzenwurzeln ist neben dem absoluten Gehalt an austauschbaren Ionen deren Austauschbarkeit, d. h. deren Haftfestigkeit am Bodenkomplex ausschlaggebend.

Werden die Kationen- und Anionenlösungen während der Elektrodialyse in periodischen Zeitintervallen untersucht, und stellt man die gefundene Ionenmenge als Funktion der Stromeinwirkungsdauer in Form einer Kurve dar, so erhält man wertvollen Einblick nicht nur in die *Art* und *Menge* der vorhandenen austauschbaren Ionen, sondern auch in deren *Haftfestigkeit* an den Bodenoberflächen¹¹⁷ (vgl. Fig. 6). Die Ionenumtauschkurven der Figur 6 zeigen, daß die umtauschbaren K-Ionen im allgemeinen viel weniger stark gebunden sind als z. B. die Ca-Ionen. Dies äußert sich in der schwereren Mobilisierbarkeit der letzteren durch die Pflanzenwurzeln, wodurch bei sehr intensiver landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion, zuweilen auch auf karbonathaltigen Böden, ein Mangel in der Kalkversorgung eintritt. In solchen Fällen sind nachteilige Rückwirkungen auf den Gesundheitszustand der herbivoren Haustiere oft zu beobachten.

Bei der Elektrodialyse werden meist im Anfang pro Zeiteinheit die größten Ionenmengen herausgelöst, später nehmen diese in für den Umtauschkörper kennzeichnender Weise mehr oder weniger rasch ab. Die bei Beginn der Elektrodialyse herausgelösten Ionen entsprechen wohl den leichtmobilen, *unmittelbar wurzelzugänglichen Pflanzennährstoffen* des Bodens. Bei längerer Stromeinwirkungsdauer werden allmählich auch die *stärker adsorbierten Ionen* von den Innenoberflächen der Austauschkörper in mehr oder weniger großen Mengen mobilisiert. Vorwiegend außendisperse Böden zeigen eine rasche Erschöpfung des Ionenaustausches im zeitlichen Verlauf der Elektrodialyse, während Böden mit großen, ionenzugänglichen Innenoberflächen (Humus, Montmorillonit usw.) eine langanhaltende, reichliche Ionennachlieferung aufweisen.

¹¹⁷ K ö t t g e n und J u n g : loc. cit. S. 295.



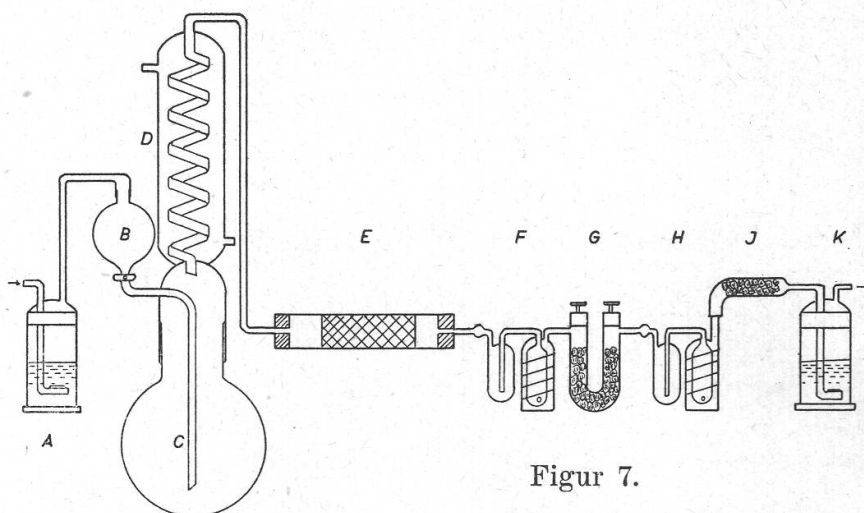
Figur 6.

Menge und Haftfestigkeit der austauschbaren Ionen in zwei Horizonten des sub-alpinen Weide-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

d) Die Bestimmung des Gesamthumus.

Der aschefreie Gesamthumus des Bodens wird aus dem analytisch bestimmten organischen Kohlenstoffgehalt errechnet, indem man einen mittleren C-Gehalt des Humus von 58 % annimmt.

Die Kohlenstoffanalyse in Böden wird erschwert durch die *Inhomogenität der Substanz*, es sind deshalb relativ große Einwaagen nötig. Die quantitative Austreibung der *Karbonatkohlensäure* bietet oft Schwierigkeiten, sollen nicht leicht abbaubare, organische Komponenten im Humus (Uronsäuren) mitangegriffen werden. Die für alle Böden anwendbare und befriedigende Methode ist die *nasse Verbrennung mit Bichromat-Schwefelsäuregemisch*¹¹⁸.



Figur 7.

Apparatur zur Bestimmung des organischen Kohlenstoffs in Böden.

Die von Schmuziger¹¹⁹ konstruierte Verbrennungsapparatur wurde etwas modifiziert und verbessert (vgl. Fig. 7). Es erwies sich als zweckmäßig, den Verbrennungskolben (C) mit einem eingeschliffenen Rückflußkühler (D) zu versehen. Die ziemlich wasserdampfarmen Gase streichen zur völligen Oxydation flüchtiger organischer Säuren durch eine elektrisch geheizte Trockenverbrennungsröhre (E). Hierauf werden die Gase in konzentrierter Schwefelsäure getrocknet (F) und zur CO₂-Absorption (H) in konzentrierte KOH (1 : 1) eingeleitet. Das angeschlossene, mit Blaugel (Silikagel mit Feuchtigkeitsindikator) gefüllte Trockenrohr (J) hält das aus der Kalilauge entweichende Wasser zurück.

Vor Beginn der Analyse treibt man die Karbonat-Kohlensäure des Bodens im Aufschlußkolben (C) mit ca. 30 %iger, kalter Schwefelsäure aus, eventuell unter gelindem Erwärmen und Durchsaugen CO₂-freier Luft. Bei der Einwirkung konzentrierter Säuren in der Hitze entstehen oft durch *CO₂-Abspaltung aus Uronsäuren* und anderen leicht abbaubaren organischen Verbindungen merkliche Verluste an organischem Kohlenstoff.

¹¹⁸ Wiegner-Pallmann: Anleitung zum quantitativen agrikulturchemischen Praktikum. Verlag Bornträger, Berlin 1938, S. 233.

¹¹⁹ A. Schmuziger: loc. cit. S. 271.

4. Die Beziehung zwischen dem pH-Wert wäßriger Bodensuspensionen und der Menge austauschbarer H-Ionen.

Der pH-Wert einer wäßrigen Bodensuspension hängt von zahlreichen Faktoren ab :

- a) von der Menge austauschbarer H-Ionen am Bodenteilchen (Milliäquivalente H-Ionen je 100 g Boden-TS);
- b) von der Dissoziationsfähigkeit der sorbierten H-Ionen;
- c) von der äußern Dispersität der Bodensuspension (man vgl. Suspensionseffekt nach P a l l m a n n ¹²⁰ und W i e g n e r ¹²¹ 1930);
- d) von der Innendispersität der H-Adsorbentien des Bodens.

Die Entwirrung der verschiedenen Einflüsse a) bis d) auf den pH-Wert des Bodens ist nicht Aufgabe der vorliegenden Arbeit.

Es zeigt sich, daß zwischen der sogenannten *Oberflächenkonzentration* ($H_t : O$) der austauschbaren H-Ionen und dem pH-Wert der feindispersen Bodenfraktionen folgender Zusammenhang besteht :

$$(H_a) = K \cdot \left[\frac{H_t}{O} \right]^n$$

wobei

(H_a) = Wasserstoffionenaktivität der Bodenaufschlämmung.

H_t = Milliäquivalente austauschbarer Wasserstoffionen je 100 g Boden-TS.

O = aus Wasserdampfadsorption nach K u r o n ¹²² ermittelte scheinbare Bodenoberfläche in m^2 je 100 g Boden.

K u. n = Konstanten.

Durch Logarithmieren erhält man die Beziehung :

$$pH = pK - n \cdot \log \frac{H_t}{O}$$

Je gedrängter die austauschbaren Wasserstoffionen auf der Oberfläche des Bodenteilchens sitzen, um so energischer versuchen sie von dort abzu-dissoziieren. So zeigt es sich, daß im Beispiel des untersuchten Podsolprofils die Oberflächen des grobdispersen, sandigen A_2 -Horizontes (Bleicherdehorizont) immer noch dichter mit H-Ionen besetzt sind als die der oberflächenreicheren Bodenteilchen der A_0 - und B-Horizonte. Deshalb liegen die pH-Werte der erstern niedriger als in A_0 und B. In Tabellen 5 und 6 soll diese Beziehung am Beispiel des Podsolprofils erläutert werden.

¹²⁰ H. P a l l m a n n : Die Wasserstoffaktivität in Dispersionen und kolloiddispersen Systemen. Kolloid. Beih. 30, 1930, 334—405.

¹²¹ G. W i e g n e r und H. P a l l m a n n : Über Wasserstoff- und Hydroxylschwärmionen um suspendierte Teilchen und dispergierte Ultramikronen. Pflanzenern. Düngung u. Bodenk. 16, 1930, 1—57.

¹²² H. K u r o n : loc. cit. S. 290.

Tabelle 5.

Der pH-Wert sinkt nicht proportional mit der Menge austauschbarer H-Ionen des Bodenteilchens, er sinkt dagegen mit steigender Oberflächenkonzentration an austauschbaren H-Ionen.

| Podsolhorizonte | Austauschbare H-Ionen je 100 g Boden H_t | pH-Wert | Oberflächen- konzentration $H_t : O$ |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------|
| A ₀ Rohhumushorizont . | 171,8 Mval. | 5,18 | 0,0602 Mval./m ² |
| B _h Humus-Sesquioxyd- anreicherungshorizont | 100,3 Mval. | 4,77 | 0,0715 Mval./m ² |
| A ₂ Bleicherde | 7,3 Mval. | 4,04 | 0,0859 Mval./m ² |

Tabelle 6.

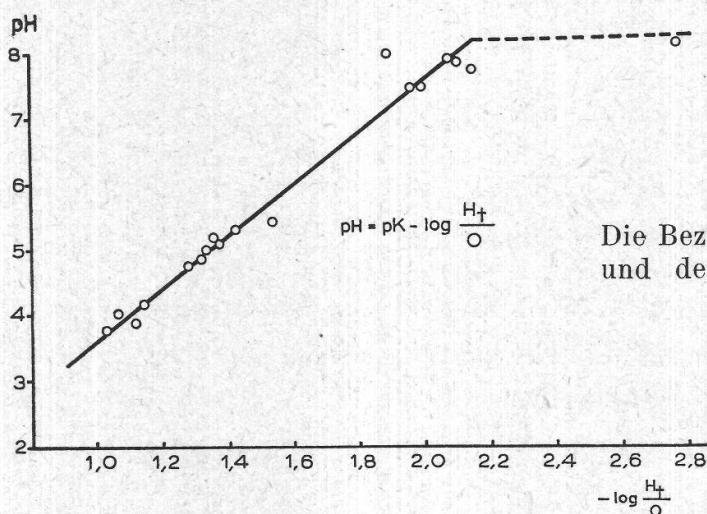
Zusammenhang zwischen pH-Wert und der Oberflächenkonzentration ($H_t : O$) des Bodens. Berechnung der jeweiligen scheinbaren, mittleren H-Ionenabstände an der Teilchengrenzfläche.

| Podsolhorizont | pH-Wert | $H_t : O$ | Mittlere Distanz zweier H-Ionen an Bodenoberflächen |
|----------------|---------|-----------|-----------------------------------------------------------|
| C | 5,03 | 0,0448 | $1,93 \cdot 10^{-8}$ cm |
| B _s | 4,77 | 0,0520 | $1,79 \cdot 10^{-8}$ cm |
| B _h | 4,16 | 0,0715 | $1,53 \cdot 10^{-8}$ cm |
| A ₂ | 4,04 | 0,0857 | $1,40 \cdot 10^{-8}$ cm |
| A ₁ | 3,79 | 0,0935 | $1,33 \cdot 10^{-8}$ cm |

In Anbetracht der unsicheren Rückrechnung von den Messungen der Wasserdampfadsorption auf die Oberflächengröße messen wir den Werten in der vierten Kolonne nicht die Bedeutung streng exakter, wirklicher Ionenabstände bei. Als Größenordnung scheinen sie aber dennoch richtig zu sein, wie Parallelrechnungen z. B. bei Permutiten erweisen. Dort kann man ebenfalls aus der Größe der Umtauschkapazität und dem spezifischen Gewicht des Permutites die mittleren statistischen Distanzen der Austauschionen abschätzen, die Schätzungswerte sind von der gleichen Größenordnung wie die in Tabelle 6 berechneten.

In Figur 8 werden die pH-Werte mit den entsprechenden $\log (H_t : O)$ Zahlen der zugehörigen Bodenhorizonte verglichen. Der Kurvenverlauf zeigt die gute Übereinstimmung mit der oben gegebenen Formel. In dieser Figur wurden neben den Mineralerdehorizonten allerdings nur Humushorizonte vergleichbaren Umwandlungsgrades der organischen Bodensstoffe aufgenommen, die äußerlich grobdispersen Rohhumuslagen sind nicht in der Figur enthalten. Da die austauschbaren H-Ionen durch Rücktitration der Azetatlösung auf pH 8,2 er-

mittelt wurden, bricht die Beziehung $pH = pK - n \cdot \log \frac{H_t}{O}$ bei dieser Reaktion aus methodischen Gründen ab (konstante pH-Werte).



Figur 8.

Die Beziehung zwischen dem pH-Wert und dem Gehalt an austauschbaren H-Ionen.

III. Untersuchungen an Muttergesteinen und Bodenprofilen der subalpinen Rendzinaserie.

A. Neue Analysen von Dolomiten des Schweizerischen Nationalparks.

Die Trias der ostalpinen Decken ist gekennzeichnet durch mächtige dolomitische Sedimente. Ihre Ausbildung wechselt je nach dem Inundationsgrad des Trias-Meeres.

Tabelle 7.

Stratigraphische Gliederung der ostalpinen Trias.

| | | | | |
|-------------|-------|------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
| Mesozoikum | Jura | | | |
| | Trias | Rhätische Stufe | Rhätkalk und Mergel | |
| | | Norische Stufe | Hauptdolomit | Völlige Inundation des Meeres |
| | | Karnische Stufe | Raiblerdolomit Raiblerrauh- wacken | |
| | | Ladinische Stufe | Wetterstein- dolomit | Völlige Inundation des Meeres |
| | | Anisische Stufe | Muschelkalk, Dolomite und Kalke | Lagunäres Schelfmeer |
| Paläozoikum | Perm | | Buntsandstein | |
| | | Verrucano | | Terrestre Bildung |

Aus Tabelle 7 ist die stratigraphische Gliederung der ostalpinen Trias, der die untersuchten Gesteine angehören, zu ersehen ¹²³, ¹²⁴, ¹²⁵.

Die Dolomite der ostalpinen Decken bilden häufige Muttergesteine der Böden im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks. Die auf diesen Dolomiten sich entwickelnden Bodenprofile gehören der Rendzinaserie n. Die Ausbildung von Podsolen ist auf diesem Gestein mit 88—98 % Karbonaten praktisch nicht möglich. Außer der versauerungshemmenden Wirkung der Karbonate fehlt auch die nötige Kieselsäure und die Sesquioxyde zur Ausbildung von Bleicherde- bzw. Anreicherungs-horizonten, wie dies aus Tabelle 8 hervorgeht.

B. Subalpiner Wald-Humuskarbonatboden des Mugeto-Ericetum.

1. Lage der Profilstelle und Vegetation.

Lokalität : Alp Stavel-Chod im Schweizerischen Nationalpark; im die Weide nord-westlich begrenzenden Wald.

Höhe über Meer : 1970 m.

Mittlere Jahrestemperatur : —0,1° C (langjähriges Mittel von Buffalora, 1977 m ü. M., in ca. 2,5 km Entfernung).

Mittlere Jahresniederschläge : 958 mm (langjähriges Mittel von Buffalora).

Neigung und Exposition : 20° ESE.

Muttergestein : Hangschuttmateriel von Raibler- und Hauptdolomit.

Bodenserie : Subalpine Redzinaserie.

Boden : Mäßig entwickelte Rendzina. Subalpiner Wald-Humuskarbonatboden.

Pflanzengesellschaft : Mugeto-Ericetum caricetosum humilis (Br.-Bl.) ¹²⁶.

Baumschicht :

Artenliste :

4 4 Pinus Mugo Turra, 10—12 m hoch, aufrecht, Kronenschluß 50 %.

Strauch- und Krautschicht :

| | |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| 4 5 Erica carnea L. | + 1 Carduus defloratus L. |
| + 1 Melampyrum, Gruppe pratense L. | 1 1 Senecio abrotanifolius L. |
| + 1 Crepis alpestris (Jacq.) | + 1 Festuca rubra L. |
| 1 Pinus Mugo Turra. | + 1 Hieracium, Gruppe Vulgata. |
| + 1 Vaccinium vitis idaea L. | + 1 Erigeron alpinus L. |
| + 1 Juniperus communis L. ssp. nana Willd. | + 1 Leontodon hyoseroides Welw. |
| + 2 Carex humilis Leyßer. | + 1 Pyrola uniflora L. |
| 2 2 Sesleria coerulea (L.) Ard. | + 1 Viola rupestris Schmidt. |
| + 1 Lotus corniculatus L. | + 1 Potentilla Crantzii (Crantz). |
| + 1 Hieracium bifidum Kit. | + 1 Thesium alpinum L. |
| 1 2 Daphne striata Tratt. | + 1 Saponaria ocimoides L. |
| + 1 Hippocrepis comosa L. | + 1 Cirsium acaule (L.) Weber. |
| 1 1 Antennaria dioeca (L.) Gärtner | + 1 Galium anisophyllum Vill. |

Moos- und Flechtenschicht :

| | |
|-------------------------|------------------------|
| + Dicranum scoparium L. | + Cladonia pyxidata L. |
|-------------------------|------------------------|

Bodenbedeckung : ca. 50 % durch üppigen Erica-Bestand.

¹²³ A. Spitz und G. Dyhrenfurth: Monographie der Engadiner Dolomiten. Bern 1914.

¹²⁴ R. Staub: Übersicht über die Geologie Graubündens. Geologischer Führer der Schweiz, Fasc. III. N. 1934.

¹²⁵ H. Boesch: Geologie der zentralen Unterengadiner Dolomiten. Diss. Universität Zürich 1937.

¹²⁶ J. Braun-Blanquet, G. Sissingh und J. Vlieger: Prodromus der Pflanzengesellschaften, Fasz. 6: Klasse der Vaccinio-Piceetea. Comité International du Prodrom Phytosociologique, 1939.

Tabelle 8.
Analysen von Gesteinen der dolomitischen Trias des Schweizerischen Nationalparks.
(Aufschluß in heißer HCl spez. Gew. 1,10.)

| | Wetterstein- dolomit (Val Chavag) | Wetterstein- dolomit (La Drossa) | Gebändeter Dolomit (La Drossa) | Hauptdolomit (Il Fuorn) | Raiblerdolomit (Val del Botch) | Raibler (dolomitisch) (Val Chavag) | Raibler- rauhwacke (Val del Botch) | Raibler- rauhwacke (Il Fuorn) |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| SiO ₂ ¹ | 1,93 | 0,84 | 9,58 | 12,21 | 3,33 | 8,67 | 1,67 | 7,89 |
| Al ₂ O ₃ | 0,30 | 0,00 | 0,26 | 0,48 | 0,44 | 0,04 | 0,01 | 0,06 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,45 | 0,54 | 1,56 | 0,31 | 0,55 | 0,94 | 0,82 | 1,10 |
| MgO | 21,18 | 22,75 | 19,15 | 19,52 | 21,50 | 19,80 | 3,94 | 2,35 |
| CaO | 30,65 | 29,78 | 28,05 | 26,92 | 29,10 | 27,88 | 50,90 | 49,70 |
| K ₂ O | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | Sp. | 0,01 | 0,06 |
| H ₂ O | 0,09 | 0,06 | 0,10 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,21 |
| CO ₂ | 45,70 | 46,05 | 40,80 | 40,90 | 44,75 | 42,85 | 43,00 | 39,00 |
| P ₂ O ₅ | 0,05 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | Sp. | 0,05 | 0,04 |
| Total | 100,37 | 100,07 | 99,56 | 100,45 | 99,79 | 100,27 | 100,50 | 100,41 |
| Ca, Mg, Karbonate | 97,53 | 98,58 | 88,00 | 87,34 | 95,35 | 90,53 | 97,84 | 91,05 |

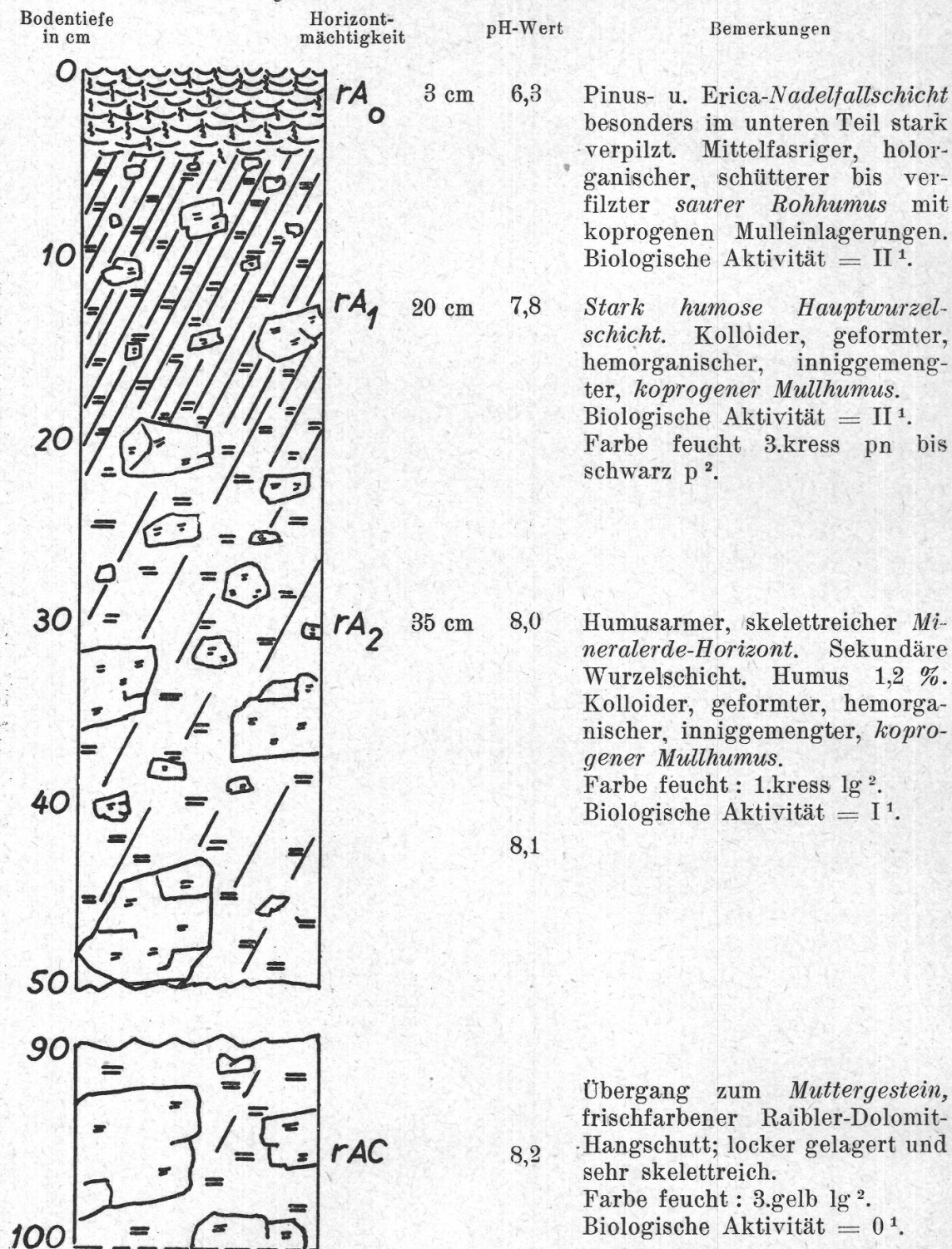
¹ SiO₂-Werte enthalten die in konzentrierter heißer Salzsäure unlöslichen Silikate sowie die HCl-lösliche Kieselsäure.

2. Das Bodenprofil und seine Morphologie.

a) Das Profil.

Figur 9.

Mäßig entwickelte Rendzina « Stavel-Chod ».



¹ Geschätzt nach Skala 0—IV, vgl. S. 289, Anm. 87.

² Nach Unesma, cit. S. 290, Anm. 91.

b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchungen.

Der *anorganische Bodenanteil* besteht im *Untergrund* aus skelettreichem, locker gelagertem, sehr durchlässigem, frischfarbenem Hangschutt von Raibler- und Wettersteindolomiten. Die größere Dispersität des anorganischen Materials im *Obergrund* (vgl. Tabelle 10, sub 4 und 10) beweist, daß der verwitternde Angriff hier intensiver sein muß. Trotzdem sind Verwitterungsspuren im Gesteinsinnern kaum vorhanden. Im rA_1 -Horizont vermögen dunkelverfärbende *Humate* von den äußeren Oberflächen und von den Ritzen und Spalten der Dolomite nur 0,03 bis 0,5 mm in deren Inneres vorzudringen. Die äußerlich wirkende *Lösungsverwitterung* spielt die Hauptrolle und macht die Gesteinsoberflächen rau, furchig oder zellig.

Die *Humussubstanz*: Das Profil ist mit einer lockeren, rohhumusartigen, dünnen Pinus- und Erica-Nadelschicht (rA_0 -Horizont) bedeckt. Die Pilztätigkeit ist hier ziemlich intensiv; das dunkelbraune Myzel dringt häufig in die Zellzwischenräume der Humusbildner ein. Diese zeigen auch zahlreiche Fraßstellen von Kleintieren. Stellenweise dringt der Regenwurm bis an die Erdoberfläche vor und hinterläßt hier seine Losungen¹²⁷. Der hemorganische Humushorizont (rA_1) läßt nur noch vereinzelt Pflanzenreste mit erhaltener Zellstruktur erkennen. Es ist besonders die *Regenwurmtätigkeit*, die den Mullhumus¹²⁸ dieses Bodens morphologisch kennzeichnet. *Lumbricus rubellus Hoffm.*¹²⁹, der nach Versuchen von Franz¹³⁰ ausschließlich von pflanzlichen Humusbildnern lebt, wurde hier gefunden. In seinen Exkrementen erscheinen, mit anorganischer Feinerde innig vermennt: strukturlose Humusstoffe und zerhackte, chemisch wenig veränderte Humoide, in denen oft Zellstrukturen und Zellulose deutlich nachweisbar sind. Im rA_0 - und rA_1 -Horizont sind neben den Regenwurmlösungen noch folgende *Kleintierexkrementformen* vorhanden:

Langzylindrische, 2,5 mm/1,1 mm große, abgerundete, in der Mitte oft eingeschnürte Exkremente mit wenig abgebautem Inhalt, der zuweilen noch Zellstrukturen erkennen läßt; sie stammen wahrscheinlich von Tausendfüßlern aus der Familie der Juliden, die in diesem Boden sehr zahlreich sind.

Zylindrische, 1,1 mm/0,6 mm große Formen, in denen häufig Pilzhypenstücke nachweisbar sind.

Kurzzylindrische, 0,47 mm/0,35 mm große sowie rundliche, dunkle, oft nesterweise vorkommende Exkremente von 0,06—0,08 mm Durchmesser.

Während die Regenwurmtätigkeit bis tief in den rA_2 -Horizont hinunter zu verfolgen ist, scheinen die übrigen Kleintierexkremente, mit

¹²⁷ Losungen: W. Kubiena verwendet diesen, dem Jagdwesen entlehnten Ausdruck auch für die Exkremente der Bodentiere.

¹²⁸ Vgl. Tab. 9, S. 310: Die Humusformen.

¹²⁹ Herrn J. Florin, Zoologisches Institut ETH, danke ich für die Bestimmung von Bodentieren.

¹³⁰ H. Franz: loc. cit. S. 270.

Ausnahme der 0,06 mm großen, auf die obersten 10—15 cm des Bodenprofils beschränkt.

Tabelle 9.

Die Humusformen in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Wald-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».
(Mäßig entwickelte Rendzina.)

| Horizont | Humusform ¹ | Sättigungsgrad (% der UK) | Aschegehalt (% der TS) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| rA ₀ | G · 2/U · 1/F · 1b—1a/M · 3b | 7,4 | 9,8 |
| rA ₁ | G · 1/U · 2/F · 2b/M · 1b | 28,5 | 72,2 |
| rA ₂ | G · 1/U · 2/F · 2b/M · 1b | 87,4 | 97,3 |

¹ Die Bedeutung der Formeln ist aus Tabelle 2: Humussystematik, S. 282 ersichtlich.

3. Physikalische Eigenschaften.

Der grobdisperse, z. T. skelettige Charakter und die *hohe Wasserdurchlässigkeit* des Wald-Humuskarbonatbodens gehen aus den in Tabelle 10 zusammengestellten Untersuchungsergebnissen hervor. Die

Tabelle 10.

Physikalische Eigenschaften der verschiedenen Horizonte des subalpinen Wald-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».
(Mäßig entwickelte Rendzina.)

| Horizonte | rA ₀ | rA ₁ | rA ₂ | rAC |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1. Horizontmächtigkeit | 1—3 cm | 20 cm | 35 cm | — |
| 2. pH-Werte (frisch in H ₂ O) | 6,3 | 7,8 | 8,1 | 8,2 |
| 3. Karbonte CO ₂ in der TS | — | 23,45 % | 44,04 % | 44,62 % |
| 4. Bodenart ² | H. | t. L. | S. | S. |
| 5. Litergewicht der TS | 831 g | — | — | — |
| 6. Porenvolumen | 68 % | — | — | — |
| 7. Wasserkapazität | 49 % | — | — | — |
| 8. Luftkapazität | 10 % | — | — | — |
| 9. Wasserdurchlässigkeit Min pro Liter H ₂ O | 1½ | — | — | — |
| 10. Skelettgehalt ¹ | 0 | I · | II—III | III—IV |
| 11. Petrographie | Wettersteindolomit und Raiblerdolomit | | | |
| 12. Verwitterungsgrad ¹ | — | II—III | I—II | I |
| 13. Krümelung ¹ | 0 | II—III | II | 0—I |
| 14. Feinkoagulate ¹ | II | I—II | I | 0 |
| 15. Gefügeentwicklung ¹ | 0—I | II—III | I—II | 0—I |

¹ Geschätzt nach Kennzahlen von 0—IV, vgl. S. 288—290.

² H. = Humus, L. = Lehm, t. = tonig, S. = Sand.

Luftkapazität des Oberbodens ist groß. Das *Bodengefüge* ist besonders im gekrümelten, humosen A₁-Horizont mäßig bis gut entwickelt; in den tieferen Horizonten mangelt die kolloide Bindesubstanz, ihr Gefüge ist deshalb primitiver. Die krümeligen, hemorganischen *Regenwurmexkremente* schließen einen bedeutenden Teil der Feinerde ein, daneben sind aber Feinkoagulate, hauptsächlich holorganische Kleintierexkremente besonders im Oberboden noch häufig.

4. Chemische Untersuchungsergebnisse.

a) Der Humus.

Die Bestimmung des Gesamthumus in den Horizonten des subalpinen Wald-Humuskarbonatbodens (vgl. Tabelle 11, sub 3) zeigt den ziemlich unvermittelten Übergang zwischen dem humosen rA₁- und dem humusarmen rA₂-Horizont. Der rA₀-Rohhumus bildet im Mugeto-Ericetum caricetosum immer nur eine dünnsschichtige Auflage.

Der *geringe Stickstoffgehalt der Humusbildner* (Erica- und Pinusnadeln) vermindert deutlich den Proteingehalt des Bodens und erweitert sein *C/N-Verhältnis* (vgl. Tabelle 11, sub 6—8). Mit der Profiltiefe verringert sich dasselbe aber stark; die Ursache liegt darin, daß der größte Teil des Humus im rA₁- und rA₂-Horizont den Darmtrakt des Regen-

Tabelle 11.

Humusuntersuchungen in den Horizonten des subalpinen Wald-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

(Mäßig entwickelte Rendzina.)

(Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Trockensubstanz.)

| Horizonte | Vegetation | rA ₀ | rA ₁ | rA ₂ | rAC |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| 1. Horizontmächtigkeit . . | — | 1—3 cm | 20 cm | 35 cm | |
| 2. pH-Werte (frisch in H ₂ O) | | 6,3 | 7,8 | 8,1 | 8,2 |
| 3. Gesamthumus (58 % C) % | 94,0 | 90,0 | 29,1 | 1,2 | 0,6 |
| 4. Gesamtkohlenstoff im Humus % | 54,5 | 52,6 | 19,9 | 0,7 | 0,4 |
| 5. Gesamtstickstoff . . % | 0,86 | 1,10 | 0,66 | 0,03 | 0,01 |
| 6. Rohprotein in % des Gesamthumus | 5,7 | 7,6 | 14,2 | (15,3) | (6,4) |
| 7. C/N-Quotient (atomar) . . | 74,1 | 55,8 | 29,9 | 27,6 | (60,0) |
| 8. Humusbildner in % des Gesamthumus (geschätzt) | | 70 | 10 | 5 | — |
| 9. Humusstoffe und Humoide in % des Gesamthumus (geschätzt) | — | 30 | 90 | 95 | — |

wurms passiert hat. L. Meyer¹³¹ konnte ein verengertes C/N-Verhältnis in den Exkrementen des Regenwurms gegenüber seiner Nahrung experimentell nachweisen.

b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte.

Der hohe Karbonatgehalt des Bodens bewirkt seine außerordentlich *starke Pufferung gegen Säuren* (vgl. Tabelle 12, sub 18). Die Degradation (Versauerung) der subalpinen Humuskarbonatböden kann deshalb im wesentlichen nur durch *Aufwachsen* einer sauren Morhumusdecke über dem alkalisch bleibenden rA₁-Horizont erfolgen (z. B. in den moos- und alpenrosenreichen Bergföhrenwäldern). Die Basenpufferung nimmt parallel mit der Profiltiefe ab; der grobdisperse rAC-Horizont weist nur

Tabelle 12.

Die Adsorptionskomplexe in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Wald-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

(Mäßig entwickelte Rendzina.)

(Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | rA ₀ | rA ₁ | rA ₂ | rAC |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| 1. Art der Adsorptionskomplexe . . | hol-organ. | hem-organ. | hem-organ. | — |
| 2. Glühverlust (ohne Karbonat CO ₂) % | 90,2 | 27,8 | 2,7 | 1,2 |
| 3. Tone (Ø kleiner 0,002 mm) . . % | — | 5,9 | 1,7 | 0,5 |
| 4. SiO ₂ /R ₂ O ₃ -Verhältnis in der Tonfraktion | — | 1,7 | 1,1 | 1,0 |
| 5. Wasserbindung g H ₂ O | 350 | — | 31 | 24 |
| 6. Hygroskopizität g H ₂ O | 13,81 | 6,92 | 0,41 | 0,03 |
| 7. Benetzungswärme cal. | 2710 | 790 | 30 | — |
| 8. Umtauschkapazität Mval. | 201,6 | 30,8 | 13,5 | 10,0 |
| 9. PO ₄ - und SO ₄ -Ionen Mval. | 0,16 | 0,07 | 0,04 | 0,04 |
| 10. Na-Ionen Mval. | 0,36 | 0,11 | 0,09 | 0,08 |
| 11. K-Ionen Mval. | 3,20 | 0,95 | 0,35 | 0,20 |
| 12. Mg-Ionen Mval. | 7,27 | 2,00 | 4,30 | 2,25 |
| 13. Ca-Ionen Mval. | 4,11 | 5,70 | 7,00 | 5,68 |
| 14. Mn-Ionen Mval. | 0,30 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 15. Total basische Kationen Mval. | 15,24 | 8,79 | 11,77 | 8,25 |
| 16. H-Ionen Mval. | 184,4 | 22,0 | 1,7 | 1,8 |
| 17. Sättigungsgrad % | 7,4 | 28,5 | 87,4 | 82,1 |
| 18. Pufferungswert gegen HCl . . . % | 96 | 100 | 100 | 100 |
| 19. Pufferungswert gegen KOH . . . % | 51 | 32 | 4 | 3 |

¹³¹ L. Meyer: Experimenteller Beitrag zu makrobiologischen Wirkungen auf Humus und Bodenbildungen. Bodenk. u. Pflanzenern. 29, 1943, 119—140.

noch eine sehr *geringe Pufferung gegen OH-Ionen* auf (vgl. Tabelle 12, sub 19).

c) Die austauschbaren Ionen.

Die *Umtauschkapazität* der Humushorizonte ist ziemlich hoch, parallel mit dem Humusgehalt geht sie aber in den tieferen Horizonten stark zurück (vgl. Tabelle 12, sub 8). Im sehr grobdispersen rAC-Horizont würde man jedoch einen noch kleineren Wert als die ermittelten 10 Mval. erwarten. Die UK bezieht sich auf 100 g *Feinerde-Trockensubstanz*; im skelettreichen Unterboden ist die Feinerde aber stark mit Grobmaterial verdünnt. Die *Volumeneinheit des natürlich gelagerten Bodens* wäre eigentlich die bessere Bezugsbasis für die Analysenresultate als die Gewichtseinheit Feinerdetrockensubstanz.

Der wenig abgebaute rA₀-Humus muß nach dem *Sättigungsgrad* seiner Umtauschkomplexe in die Morhumusgruppe eingereiht werden (eventuell morartiger Mull). Aber auch der neutrale bis schwach alkalische rA₁-Mullhumus weist noch ganz ansehnliche Mengen an austauschbaren Wasserstoffionen auf; erst in den dolomitischen Mineralerdehorizonten treten diese dann sehr stark zurück.

Der absolute Gehalt an austauschbaren basischen *Kationen* ist in diesem neutralen, karbonatreichen, aber tonarmen Boden nicht viel größer als in den sauren Böden der Podsolserie (vgl. Tabelle 12, sub 10—15). In der Basenbelegung der Rendzina-Bodenteilchen nimmt der Ca-Ionenanteil mit der Profiltiefe zu, der Alkali- und Magnesium-Ionenanteil aber ab. Diese Verhältnisse sind hier also gerade umgekehrt wie in den Böden der Podsolserie. Die Ericavegetation scheint neben dem Kalium in besonderem Maß die Mg-Ionen zu mobilisieren und in ihrem Pflanzenkörper anzureichern. Das *Ca/Mg-Ionenverhältnis* ist in der Ericavegetation 0,89, also sehr eng, im rA₀-Horizont 0,57, und im C-Horizont ist es 2,48.

Die untersuchten *Anionen* sind nur mit sehr geringen Anteilen in der Adsorptionsgarnitur vertreten (vgl. Tab. 12, sub 9).

C. Subalpiner Wiesen-Humuskarbonatboden des *Trisetetum flavescens*.

1. Lage der Profilstelle und Vegetation.

Lokalität : Alp Stavel-Chod im Schweizerischen Nationalpark; eingezäunte Fläche in Hüttennähe.

Höhe über Meer : 1963 m.

Mittlere Jahrestemperatur : — 0,1° C (langjähriges Mittel von Buffalora).

Neigung und Exposition : 5° S.

Muttergestein : Hangschutt und Wildbachalluvionen von Hauptdolomit, Raiblerdolomit und Raiblerrauhacken.

Bodenserie : Subalpine Rendzinaserie.

Boden : Schwach verbrauchte Rendzina; subalpiner Wiesen-Humuskarbonatboden.

Pflanzengesellschaft : *Trisetetum flavescens* ¹³², ¹³³, ¹³⁴.

Nutzung : Frühere Mäh- und Fettwiese (seit 1918 Hirschweide).

Artenliste ¹:

| | |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 2 2 <i>Trisetum flavescens</i> (L.) Pal. | + 1 <i>Trifolium badium</i> Schreber. |
| 2 2 <i>Avena pubescens</i> Hudson. | + 1 <i>Trifolium montanum</i> L. |
| 2 1 <i>Festuca rubra</i> L. | + 1 <i>Lotus corniculatus</i> L. |
| 2 1 <i>Briza media</i> L. | + 1 <i>Anthyllis Vulneraria</i> L. |
| 1 2 <i>Dactylis glomerata</i> L. | 1 1 <i>Carum Carvi</i> L. |
| 1 2 <i>Poa pratensis</i> L. | + 1 <i>Rhinanthus Alectorolophus</i> (Scop.) Pollich. |
| 1 2 <i>Phleum alpinum</i> L. | + 1 <i>Veronica Chamaedrys</i> L. |
| + 1 <i>Crocus albiflorus</i> Kit. | + 1 <i>Veronica serpyllifolia</i> L. |
| + 1 <i>Melandrium dioecum</i> (L.) Simon- kai. | 1 1 <i>Phyteuma orbiculare</i> L. |
| 1 1 <i>Ranunculus acer</i> L. | 1 1 <i>Campanula Scheuchzeri</i> Vill. |
| + 1 <i>Ranunculus montanus</i> Willd. | 1 1 <i>Crepis aurea</i> (L.) Cass. |
| 1 2 <i>Alchemilla vulgaris</i> L. | + 1 <i>Taraxacum officinale</i> Weber. |
| 2 3 <i>Trifolium repens</i> L. | 1 2 <i>Leontodon hispidus</i> L. |
| 2 3 <i>Trifolium pratense</i> L. | + 1 <i>Achillea Millefolium</i> L. |

¹ Herrn Prof. Dr. W. Koch danke ich für die Bestimmung des Pflanzenmaterials.

Trisetetum-fremde Arten (größtenteils vom Rande her eindringend) :

| | |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1 1 <i>Koeleria pyramidata</i> (Lam.) Do- min. | 1 1 <i>Gentiana campestris</i> L. |
| + 2 <i>Carex sempervirens</i> Vill. | 1 1 <i>Gentiana nivalis</i> L. |
| + 2 <i>Sesleria coerulea</i> (L.) Ard. | + 1 <i>Gentiana verna</i> L. |
| + 2 <i>Festuca rubra</i> ssp. <i>fallax</i> . | 2 1 <i>Plantago media</i> L. |
| + 2 <i>Elyna myosuroides</i> (Vill.) Fritsch. | + 1 <i>Plantago montana</i> Lam. |
| + 1 <i>Helianthemum grandiflorum</i> Goss. | 2 2 <i>Galium anisophyllum</i> Vill. |
| + 1 <i>Potentilla Crantzii</i> (Crantz) Beck. | 1 1 <i>Carlina acaulis</i> L. |
| + 1 <i>Hippocrepis comosa</i> L. | + 1 <i>Aster alpinus</i> L. |
| + 1 <i>Polygala alpestris</i> Rehb. | + 1 <i>Erigeron alpinus</i> L. |
| + 1 <i>Thymus Serpyllum</i> L. spec. | + 1 <i>Crepis alpestris</i> (Jacq.) Tausch. |
| | + 1 <i>Hieracium Auricula</i> L. em. Lam. u. DC. |

¹³² A. Schnyder: Floristische und Vegetationsstudien im Alviergebiet. II. Teil. Mitteilg. aus d. Botan. Museum d. Univers. Zürich (CXXXV).

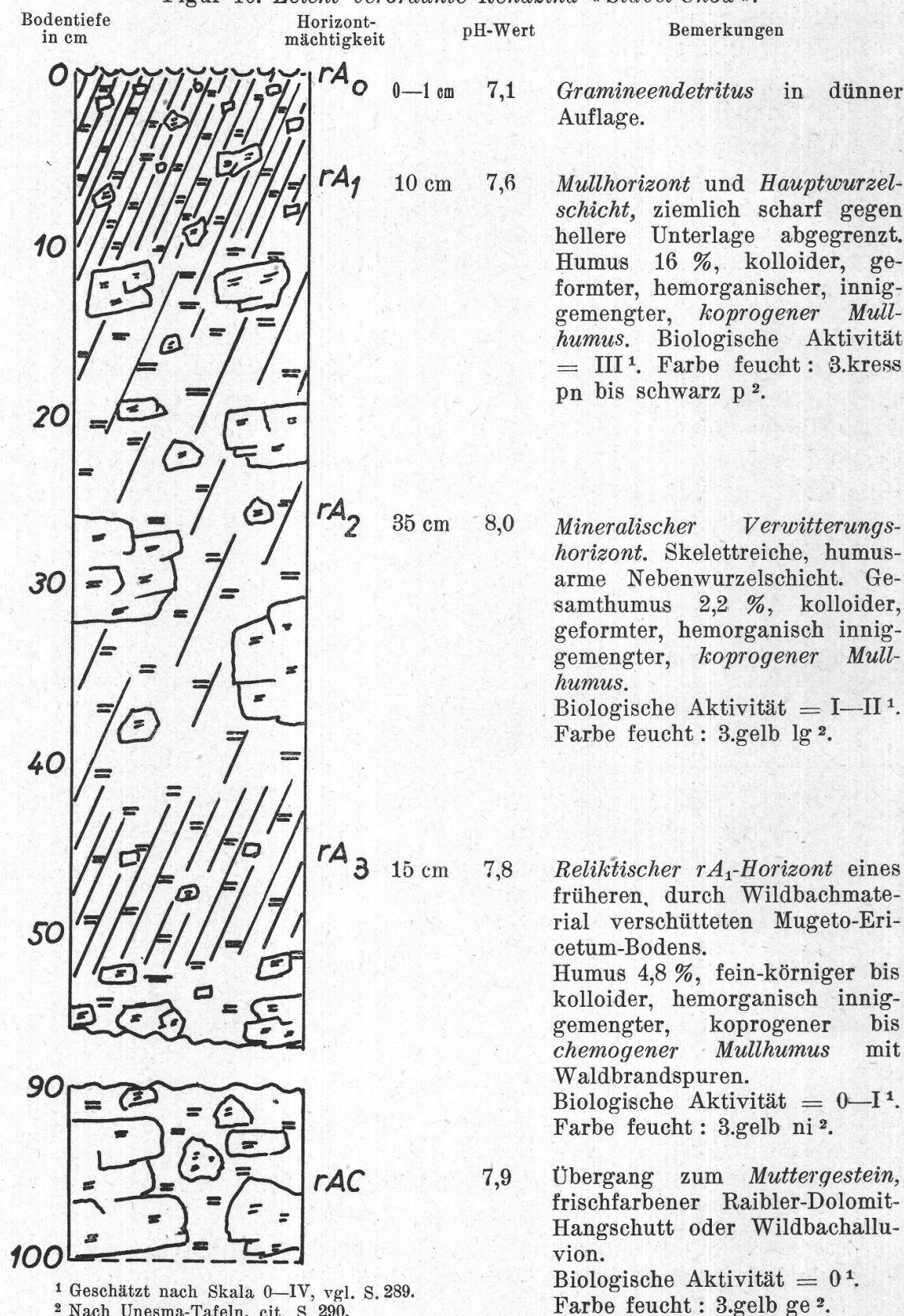
¹³³ R. Tüxen: Die Pflanzengesellschaften Nordwestdeutschlands. Mitteilungen der Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft in Niedersachsen, Heft 3, 1937.

¹³⁴ F. Marshall: Die Tavetscher Heumatten. Ein Beitrag zur Soziologie der schweizer. Fettwiesen. Volkart-Festschrift, Ber. d. Schweiz. Botan. Gesellschaft 53, A. 1943.

2. Das Bodenprofil und seine Morphologie.

a) Das Profil.

Figur 10. *Leicht verbrauchte Rendzina « Stavel-Chod ».*



¹ Geschätzt nach Skala 0—IV, vgl. S. 239.

² Nach Unesma-Tafeln, cit. S. 290.

b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchung.

Der *anorganische Bodenanteil* besteht gleich dem des Wald-Humuskarbonatbodens aus Raibler- und Wettersteindolomiten; daneben sind zellige Raiblerrauhacken, deren Poren oft mit braunen $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -reichen Gelen ausgekleidet sind, häufig. Die *humosen Verwitterungsrinden* der Gesteine sind im Wiesenprofil dünner und weniger deutlich als im Wald-Humuskarbonatboden. Die Wetterstein- und Raiblerdolomite sind kompakt und innen frisch, sie werden aber leicht längs würflicher oder plattiger *Absonderungsformen* aufgespalten. Diese Spalten und Risse sind teils durch Verwitterungseinflüsse erweitert, teils mit rekristallisiertem Calcit ausgefüllt. Im rA_3 -Horizont, der vermutlich einem begrabenen relikthischen rA_1 -Horizont eines Bergföhren-Erica-Waldes entspricht, kommen solche *sekundär ausgefüllten Spalten* vor, in denen noch die Spuren früherer humussaurer Verwitterung zu sehen sind. Die Humussole sind *vor* der Calcitfüllung der Spalten ins Gestein eingedrungen, zur Zeit als der rA_3 -Horizont humoser Oberboden (rA_1) des verschwundenen Waldes war. Die in jenem Horizont noch vorhandene *Humusform* unterstützt diese Vermutung. Neben strukturlosen Humusstoffen enthält er rundliche Samenschalen (?) von 0,15 mm Durchmesser, kuglige, opake Gebilde mit deutlicher Netzstruktur (Pilzsporen?), verkohlte Ericanadeln mit erhaltener Zellstruktur, Holzkohlestückchen usw.

Tabelle 13.

Die Humusformen in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Weide-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

(Leicht verbrauchte Rendzina.)

| Horizont | Humusformen ¹ | Sättigungsgrad (in % der UK) | Aschegehalt (in % der TS) |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| rA_0 | G · 2/U · 1/F · 1a/M · 3b | 20,9 | 6,6 |
| rA_1 | G · 1/U · 2/F · 2b/M · 1b | 58,4 | 72,9 |
| rA_2 | G · 1/U · 2/F · 2b/M · 1b | 92,3 | 97,7 |
| rA_3 | G · 1/U · 2—3/F · 2b/M · 2c | 90,8 | 94,0 |

¹ Die Bedeutung der Humusformeln ist aus Tabelle 2: Humussystematik, S. 282 abzuleiten.

Die *Abbauintensität* der auf der Bodenoberfläche anfallenden Halm- und Blattreste ist sehr groß. Humusbildner sind in den obersten 2 cm Bodentiefe in geringer Menge vorhanden und zeigen zahlreiche Fraßspuren von Kleintieren und üppig wucherndes Pilzmyzel, das sich besonders in den Gefäßen der Halmreste ausbreitet.

Es sind in dieser Bodentiefe neben den Regenwurmexkrementen folgende holorganische *Kleintierexkremente* häufig :

Gut geformte, einseitig gestielte, zylindrische Exkreme von 0,7—0,8 mm Länge und 0,3—0,4 mm Breite.

Ungestielte, kurzzyklindrische von 0,5 mm/0,3 mm Größe und langzyklindrische von 1,1 mm/0,5 mm, die zum Teil geringe Einmischung von Mineralkörnern aufweisen.

Unregelmäßig rundliche, 0,06 mm große Exkreme.

Die *Regenwurmeckreme* dominieren und erfassen von ca. 2 cm Bodentiefe an abwärts beinahe die gesamte Feinerde unter ca. 0,5 cm Durchmesser. Neben anderen nicht sicher bestimmbar Lumbricusarten wurde *Lumbricus rubellus Hoffm.* auch in diesem Profil gefunden.

Der Entwicklungsgrad des *Bodengefüges* (vgl. Tabelle 14, sub 13 bis 15) wird gefördert durch die rege Tätigkeit der Regenwürmer und anderer Bodentiere, welche Humusstoffe und anorganische Feinerde innig zu vermischen und zu Aggregaten zu formen vermögen, sowie durch den hohen Gehalt an koagulierenden Elektrolyten. Tonarmut und hoher Skelettgehalt hemmen andererseits eine ideale Gefügeausbildung, besonders in den vorwiegend petrogenen Horizonten.

3. Physikalische Eigenschaften.

Trotzdem die *Körnung* im Wiesen-Humuskarbonatboden ungefähr die gleiche ist wie im ca. 200 m entfernt liegenden Wald-Humuskarbonatboden, sind doch *Gefügeunterschiede* feststellbar (vgl. Tabelle 14). Die verminderte Wasserdurchlässigkeit und die etwas kleinere Luftkapazität sind Zeichen *dichter Lagerung*. Die häufigen Regenwürmer und die hohe Ca-Ionensättigung der Bodenteilchen verursachen eine *gute Krümelung*; z. T. sind scharfkantige, polyedrisch-kubische Rindzinakrümel vorhanden.

4. Chemische Untersuchungsergebnisse.

a) Der Humus.

Im Weide-Humuskarbonatboden ist ähnlich wie im Wald-Humuskarbonatboden der humose rA₁-Horizont ziemlich scharf gegen den mineralischen rA₂-Horizont abgesetzt (vgl. Tabelle 15, sub 3—4). Der *Humusgehalt* des Weidebodens ist jedoch kleiner, die Einmischung an Mineralerde also größer, wahrscheinlich durch rascheren Abbau der organischen Substanz und intensivere Durchwühlung.

Durch den relativ hohen *Stickstoffgehalt* der Gramineenvegetation erreicht im Obergrund des Profils der *C/N-Quotient* recht enge Werte (vgl. Tabelle 15, sub 5—7). Die zahlreichen Bodenlebewesen der biologisch stark aktiven Horizonte tragen dazu durch ihre Körpersubstanz wesentlich bei, sonst wäre der Rohproteingehalt von 52 % im Gesamthumus des rA₁Horizontes kaum erklärlich.

Tabelle 14.

Physikalische Eigenschaften der verschiedenen Horizonte des subalpinen Weide-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

(Leicht verbrauchte Rendzina.)

| Horizonte | rA ₁ | rA ₂ | rA ₃ | rAC |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-------|
| 1. Horizontmächtigkeit | 10—12 cm | 35 cm | 15—20 cm | — |
| 2. pH-Wert (frisch in H ₂ O) | 7,6 | 8,0 | 7,8 | 7,9 |
| 3. Karbonat CO ₂ % | 20,44 | 40,2 | 40,24 | 41,32 |
| 4. Bodenart ¹ | t. L. | t. S. | s. T. | t. S. |
| 5. Litergewicht g TS | 621 | — | 1263 | — |
| 6. Porenvolumen % | 73 | — | 53 | — |
| 7. Wasserkapazität % | 58 | — | 36 | — |
| 8. Luftkapazität % | 15 | — | 17 | — |
| 9. Wasserdurchlässigkeit (in Min. pro Liter H ₂ O) | 10—36 | — | — | — |
| 10. Skelettgehalt | 0—I | II—III | I—II | III |
| 11. Petrographie | Wettersteindolomit, Raiblerdolomit, Rauhwacken | | | |
| 12. Verwitterungsgrad | II | I | II | I |
| 13. Krümelung | III | I—II | 0—I | I |
| 14. Feinkoagulate | II | 0 | 0 | 0 |
| 15. Gefügeentwicklung | III | I—II | II | I |

¹ Bodenart: t. = tonig, T. = Ton, s. = sandig, S. = Sand, L. = Lehm. 10 und 12—15 sind geschätzt nach Kennzahlen von 0—IV. vgl. S. 288—290.

Tabelle 15.

Humusuntersuchungen in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Weide-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

(Leicht verbrauchte Rendzina.)

(Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | rA ₀ | rA ₁ | rA ₂ | rA ₃ | rAC |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| 1. Horizontmächtigkeit | 0—1 cm | 10—12 cm | 35 cm | 15—20 cm | — |
| 2. pH-Wert (frisch in H ₂ O) | 7,1 | 7,6 | 8,0 | 7,8 | 7,9 |
| 3. Gesamthumus (58 % C) % | 69,9 | 16,1 | 2,2 | 4,8 | 2,4 |
| 4. Gesamtkohlenstoff aus organischem Material . . % | 40,5 | 9,4 | 1,3 | 2,8 | 1,4 |
| 5. Gesamtstickstoff . . . % | 2,14 | 1,34 | 0,05 | 0,07 | 0,02 |
| 6. Rohprotein in % des Gesamthumus | 19,1 | 52,0 | 14,0 | 9,3 | 5,3 |
| 7. C/N-Quotient (atomar) | 22,1 | 8,2 | 30,0 | 46,0 | 82,0 |
| 8. Humusbildner in % des Gesamthumus (geschätzt) | 60 | 1—5 | 0 | 5 | — |
| 9. Humusstoffe und Humoide in % des Gesamthumus | 40 | 95—99 | — | 95 | — |

b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte.

Das Pufferungsvermögen des Weide-Humuskarbonatbodens weicht nicht prinzipiell von demjenigen des Waldbodenprofils auf gleichem Muttergestein ab (vgl. Tabelle 16, sub 18—19). Der Boden ist ausgezeichnet durch sehr *große Pufferung gegen Säuren* und durch sehr kleine Basenpufferung, besonders des kolloidarmen Untergrundes.

c) Die austauschbaren Ionen.

Die *Umtauschkapazität* verändert sich im Profil ziemlich parallel mit dem Humusgehalt (vgl. Tabelle 16, sub 8). Der rA_0 -Horizont mit der höchsten Umtauschkapazität (160 Mval.) besteht aus wenig abgebautem Pflanzenmaterial, das dem eigentlichen Bodenprofil in dünner Lage aufgestreut ist. Im humosen rA_1 -Horizont ist der kolloide Mullhumus zu $\frac{1}{2}$ mit grobdispenser mineralischer Feinerde verdünnt, weshalb die Umtauschkapazität des *Gesamtbodens* in diesem Horizont auf nur 33 Mval. pro 100 g sinkt. Im grobdispersen Untergrund ist die Umtauschkapazität sehr klein, nur im leicht humosen rA_1 -Horizont steigt sie nochmals an. Es ist bemerkenswert, daß auch in diesem bis zuoberst neutral reagierenden Profil der rA_0 -Humus sehr beträchtliche Mengen *H-Ionen* speichert (vgl. Tabelle 16, sub 16—17); nach dem Sättigungsgrad muß er noch in die Morhumusgruppe eingereiht werden (evtl. morartiger Mullhumus). Hand in Hand mit dem Abbau des Pflanzendetritus geht seine Sättigung mit basischen Kationen aus den Mineralreserven des rA_1 -Horizontes.

In den hemorganischen Bodenhorizonten besetzen die *basischen Kationen* 60—95 % der verfügbaren Adsorptionsorte (vgl. Tabelle 16, sub 15 und 17). Den größten Anteil haben dabei die *Erdalkalitionen*.

Das *Ca/Mg-Ionenverhältnis* ist im Unterschied zum Bodenprofil im Mugeto-Ericetum bedeutend höher, dort dominiert das Magnesium in den Oberhorizonten, hier ist es das Kalzium. Im Gramineen- rA_0 des Weide-Humuskarbonatbodens ist das Ca/Mg-Verhältnis 2,5, im rA_1 -Mullhumus 10,9, im rA_3 -Horizont, der wahrscheinlich reliktschen Ericaceenhumus enthält, 1,1 und im C-Horizont 2,9, d. h. soviel wie im Untergrund des Waldbodens.

Die Menge der adsorbierten *Alkalitionen* nimmt absolut und relativ zur totalen Menge an basischen Kationen mit der Profiltiefe ab.

IV. Untersuchungen an Bodenprofilen der subalpinen Podsolserie.

Es sind in den nachstehenden Abschnitten die Profile von zwei subalpinen Bodentypen unter kennzeichnenden Pflanzengesellschaften

morphologisch, bodenphysikalisch und chemisch beschrieben. Ein Weideboden der subalpinen Podsolserie wird mit einem Zwergstrauchboden derselben Bodenserie auf gleichem Muttergestein und unter gleichem Generalklima verglichen.

Tabelle 16.

Die Adsorptionskomplexe in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Weide-Humuskarbonatbodens « Stavel-Chod ».

(Leicht verbrauchte Rendzina.)

(Die Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | rA ₀ | rA ₁ | rA ₂ | rA ₃ | rAC |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| 1. Art der Adsorptionskomplexe | holorg. | hemorg. | hemorg. | hemorg. | — |
| 2. Glühverlust (ohne Karbonat CO ₂)% | 93,4 | 27,1 | 2,3 | 6,0 | 1,3 |
| 3. Tone ($\varnothing < 0,002$ mm) % | — | 8,3 | 3,3 | 3,9 | 1,7 |
| 4. SiO ₂ /R ₂ O ₃ -Verhältnis in der Tonfraktion | — | 3,1 | 2,1 | 1,8 | 0,1 |
| 5. Wasserbindung . g H ₂ O | — | 90 | 42 | 40 | 28 |
| 6. Hygroskopizität . g H ₂ O | 6,47 | 3,94 | 0,25 | 1,04 | 0,18 |
| 7. Benetzungswärme . cal. | 1720 | 850 | 70 | 90 | 70 |
| 8. Umtauschkapazität Mval. | 157,5 | 33,2 | 9,0 | 25,9 | 9,0 |
| 9. PO ₄ - und SO ₄ -Ionen Mval. | 2,45 | 0,37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10. Na-Ionen . . . Mval. | 0,52 | 0,32 | 0,13 | 0,21 | 0,10 |
| 11. K-Ionen . . . Mval. | 10,72 | 3,54 | 0,77 | 1,50 | 0,50 |
| 12. Mg-Ionen . . . Mval. | 6,06 | 1,29 | 1,30 | 10,40 | 2,00 |
| 13. Ca-Ionen . . . Mval. | 15,44 | 14,17 | 6,12 | 11,35 | 5,90 |
| 14. Mn-Ionen . . . Mval. | 0,20 | 0,06 | 0,03 | 0,07 | 0,04 |
| 15. Total basische Kationen Mval. | 32,94 | 19,38 | 8,35 | 23,53 | 8,54 |
| 16. H-Ionen . . . Mval. | 124,6 | 13,8 | 0,7 | 2,4 | 0,5 |
| 17. Sättigungsgrad . . .% | 20,9 | 58,4 | 92,3 | 90,8 | 94,5 |
| 18. Pufferungswert gegen HCl% | — | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 19. Pufferungswert gegen KOH% | — | 39 | 5 | 6 | 4 |

A. Subalpines Humuspodsol des Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum.

1. Lage der Profilstelle und Vegetation.

Lokalität : Alp Piscium bei Nante, Gemeinde Airolo.

Höhe über Meer : 1750 m.

Mittlere Jahrestemperatur : 2,3° C (extrapoliert nach meteorologischer Station Airolo, dort 5,9° C).

Mittlere Jahresniederschläge : 2170 mm (extrapoliert nach Airolo, dort 1568 mm).

Neigung und Exposition : 20—25° NNE.

Muttergestein : Hangschutt mit vorwiegend Bündnerschiefer, wenig Gneis.

Bodenserie : Subalpine Podsolserie.

Boden : Subalpines Humuspodsol.

Pflanzengesellschaft : Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum (Pallmann und Haffter) ¹³⁵.

Artenliste :

Baumschicht :

Larix decidua (pro 100 m² 0—1 Exemplar).

Strauch- und Krautschicht :

- | | |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 3 3 <i>Rhododendron ferrugineum</i> L. | + 1 <i>Potentilla aurea</i> L. |
| 2 2 <i>Calamagrostis villosa</i> (Chaix) Gmelin. | + 1 <i>Solidago virga aurea</i> L. |
| + 1 <i>Oxalis acetosella</i> L. | + 1 <i>Galium pumilum</i> Murr. |
| 1 1 <i>Luzula silvatica</i> (Hudson) Gaudin. | + 1 <i>Campanula Scheuchzeri</i> Vill. |
| 1 1 <i>Melampyrum silvaticum</i> L. s. l. | 1 3 <i>Juniperus communis</i> L. ssp. <i>nana</i> Willd. |
| + 1 <i>Hieracium murorum</i> L. | + 1 <i>Ligusticum mutellina</i> (L.) Crantz. |
| + 1 <i>Sorbus aucuparia</i> L. | + 1 <i>Veratrum album</i> L. |
| + 1 <i>Dryopteris austriaca</i> (Jacq.) H. Woynat. | + 1 <i>Luzula multiflora</i> (Retz.) Lej. |
| + 1 <i>Rubus idaeus</i> L. | + 1 <i>Arnica montana</i> L. |
| 3 4 <i>Vaccinium myrtillus</i> L. | 1 1 <i>Majanthemum bifolium</i> (L.) F. W. Schmidt. |
| + 2 <i>Empetrum hermaphroditum</i> (L.) Hag. | 1 1 <i>Alchemilla alpina</i> L. |
| 1 1 <i>Homogyne alpina</i> (L.) Cass. | 1 2 <i>Dryopteris Linnaeana</i> C. Christensen. |
| 3 4 <i>Vaccinium uliginosum</i> L. | + 1 <i>Phyteuma orbiculare</i> L. |
| 1 1 <i>Lycopodium selago</i> L. f. <i>recurvum</i> (O.) | + 1 <i>Saxifraga cuneifolia</i> L. |
| 1 2 <i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin. | + 1 <i>Gymnadenia albida</i> (L.) Rich. |

Moos- und Flechtenschicht :

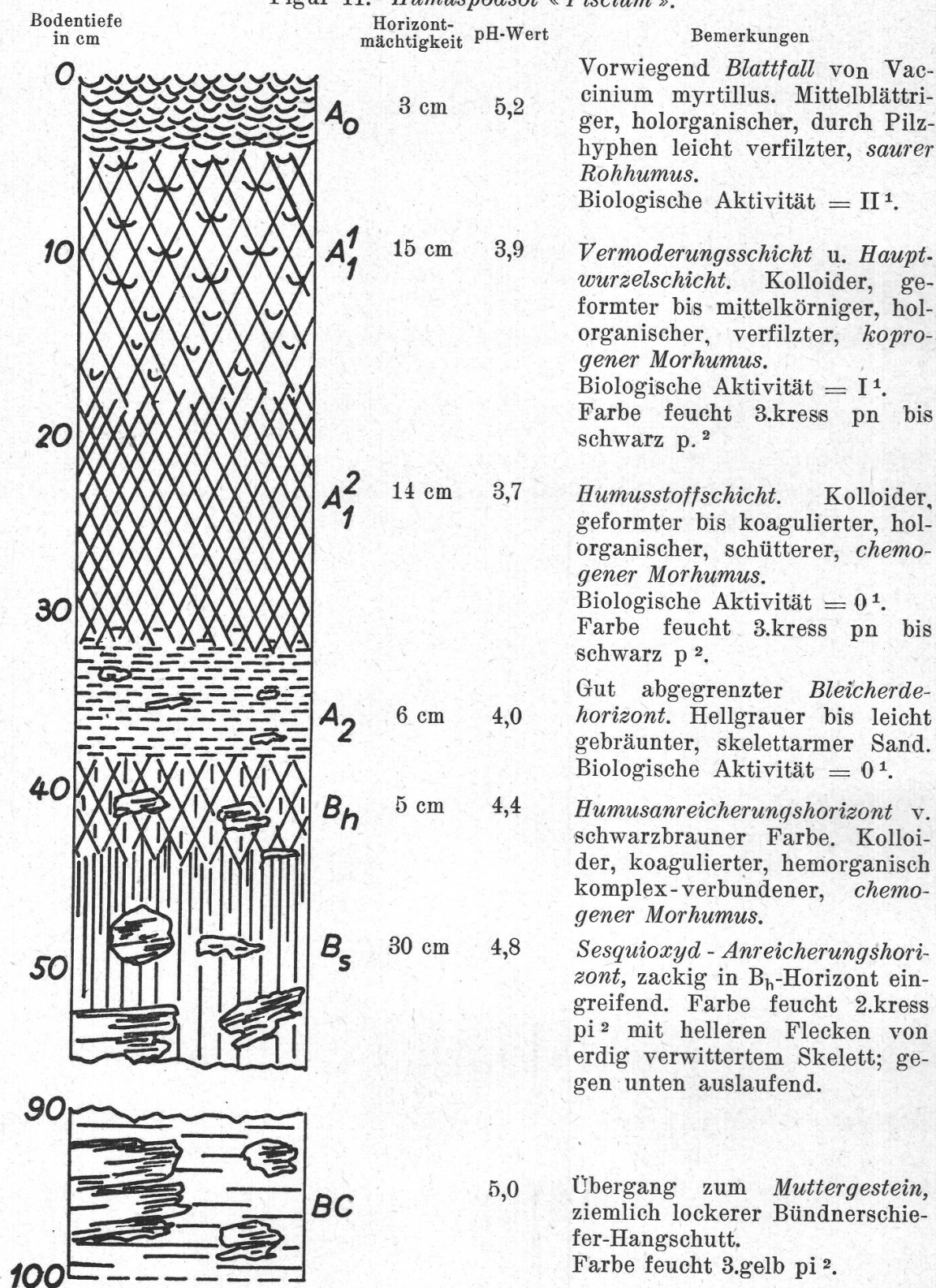
- | | |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| + 1 <i>Dicranum scoparium</i> L. | 1 2 <i>Cetraria islandica</i> L. |
| + 1 <i>Lophozia lycopodioides</i> Wallr. | + 1 <i>Polytrichum juniperinum</i> Willd. |
| 1 3 <i>Hylocomium Schreberi</i> Willd. | + 1 <i>Cladonia crispata</i> Ach. |

¹³⁵ H. Pallmann und P. Haffter : loc. cit. S. 271.

2. Das Bodenprofil und seine Morphologie.

a) Das Profil.

Figur 11. *Humuspodsol* « *Piscium* ».



¹ Geschätzt nach Skala 0—IV, vgl. S. 289, Anm. 87.

² Unesma : 24 Farbtafeln, Verlag Unesma G. m. b. H., Großbothen.

b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchung.

Der Mineralbestand setzt sich zum überwiegenden Teil aus Quarz, Muskovit und Serizit zusammen. In tieferen Horizonten kommen in beschränkten Mengen auch Biotit, Chlorit, Staurolith, Turmalin, Feldspat, Epidot, Hornblende vor.

Der *Verwitterungsgrad* ist im *A-Horizont* am höchsten; leichter verwitterbare Minerale wie Feldspat und Hornblende sind hier nicht mehr anzutreffen. Außer wenigen braunen Gelfetzen sind die Minerale hüllenfrei. Die aus den Humushorizonten einwandernden Humussole dringen zwischen die Glimmerlamellen ein, färben diese bräunlich und tragen zu deren Lockerung und Aufspaltung bei. Im *B-Horizont* werden sämtliche größeren Feinerdeteilchen von einer ca. 0,01—0,02 mm dicken, die verwitternden Einflüsse eher abhaltenden, braunen Gelhülle umschlossen. Diese Humus-Sesquioxidgele erfüllen auch alle Ritzen und Fugen der Gesteine und der Minerale. Das *Muttergestein* ist stark vorverwittert und der Gesteinsverband gelockert. Der Bündnerschiefer (stark metamorpher, karbonatfreier Jura) ist weicherdig, zerbröckelnd; die Quarzite zeigen z. T. zellige Textur, durch herausgelöste, leicht verwitterbare Mineraleinschlüsse.

Die *Humussubstanz* des *A₀-Horizontes* besteht zum größten Teil aus botanisch gut identifizierbaren Pflanzenteilen, vorwiegend von Vaccinien- und Alpenrosen-Blattfallmaterial. Zellulose ist überall nachweisbar. Von der relativ regen Tätigkeit der Bodenkleintiere (Collemboden, Milben usw.) zeugen die häufigen Fraßstellen an Pflanzenresten und die gut ausgebildeten *Exkreme*te, von denen eine ganze Anzahl verschiedener Formen vorkommen :

Rundliche, meist auf Pflanzenresten aufgeklebte Exkreme te von 0,10 bis 0,15 mm Durchmesser.

Kurzzylindrische, 0,12 mm/0,18 mm große, an den Enden abgerundete, dunkelbraune Exkreme te.

Zylindrische, 0,54 mm/0,30 mm große, einseitig gestielte Formen, deren Inhalt hellbraun und meist wenig abgebaut ist; in ihnen sind oft Zellulose, Zellstrukturen und Pilzhyphenstücke nachweisbar.

Zylindrische, 1,12 mm/0,80 mm große, an den Enden abgerundete Exkreme te von dunkelbrauner Farbe, mit gut abgebautem, völlig strukturlosem Inhalt.

Da die koprogenen Bildungen aber höchstens 10—20 % des Humus ausmachen, wird dieser als blättriger, holorganischer, *saurer Rohhumus* bezeichnet.

Im *A₁¹-Horizont* ist die botanische Zugehörigkeit der Pflanzenreste nur noch an wenigen Blattrippen und Stengelstücken erkennbar. Blattflächen sind keine mehr vorhanden, sie werden leichter abgebaut als die Blattrippen. Etwa 80 % der Humussubstanz liegt in korpuskularen Feinkoagulaten vor, die durch die zerhackende, formende und auf-

lösende Tätigkeit der Bodenorganismen entstanden sind (Kleintier-exkrementen). Die Soziologie der Fauna scheint mit der Bodentiefe rasch eintöniger zu werden. Die Exkreme bestehen fast ausschließlich aus 0,10 mm bis 0,05 mm großen, rundlichen oder klecksigen Teilchen, die oft die spärlichen Pflanzenreste traubig überdecken. Der Humus ist kolloider, geformter bis feinkörniger, holorganischer, wurzelverfilzter, *koprogener Morhumus* (vgl. Tabelle 17).

Im A_1^2 -Horizont konnten keine frischen Exkreme gefunden werden. Diese Beobachtung stimmt gut mit der sehr kleinen biologischen Aktivität ¹³⁶ des Horizontes überein. Die Humussubstanz besteht aus dunkel- bis schwarzbraunen, völlig strukturlosen, unregelmäßig rundlichen Feinkoagulaten, die zum Teil feine Kristallsplitter enthalten können und deren Durchmesser zwischen 0,02 mm und 0,04 mm liegt. Der Humus läßt sich systematisch wie folgt klassifizieren: Kolloider, geformter, holorganisch schütterer, *chemogener Morhumus*.

In den *Anreicherungs-horizonten* findet sich kolloider, koagulierter, hemorganischer, komplex-gebundener, *chemogener Morhumus*. Er besteht aus in Solform eingewanderten Humuskolloiden, die sich hier in Komplexbindung mit Sesquioxidgehen an den Oberflächen der grob-dispersen Feinerdeteilchen in Form von dicken Hüllen niedergeschlagen haben. Außerdem entstehen ca. 0,03 mm große Feinkoagulate, die zu traubigen Vielfachteilchen-*Aggregaten* zusammentreten können, diese sind locker in die Bodenhohlräume eingelagert. Durch Verklebung der die Bodenteilchen umgebenden Gelhüllen erhält das Bodengefüge einige Stabilität; typische, feste Ortsteinbänke sind jedoch noch nicht vorhanden.

Tabelle 17.

Die Humusformen in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Humuspodsols « *Piscium* ».

| Horizont | Humusformen ¹ | Sättigungsgrad (in % der UK) | Aschegehalt (in % der TE) |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| A ₀ | G · 2/U · 1/F · 1b ² /M · 4b . | 24,2 | 5,6 |
| A ₁ ¹ | G · 2/U · 2/F · 1b ¹ ·b ² /M · 1b . | 3,0 | 8,9 |
| A ₁ ² | G · 2/U · 3/F · 1a-2a/M · 1b-c | 3,9 | 14,1 |
| A ₂ | — | (24,2) | 94,0 |
| B _h | G · 2/U · 3/F · 2c/M · 1c . . | 3,4 | 80,2 |

¹ Die Bedeutung der Humusformeln ist aus Tabelle 2 : Humus-systematik, S. 282 abzuleiten.

3. Physikalische Eigenschaften.

Tabelle 18 vereinigt einige physikalische Daten des untersuchten Podsols. Es ist ein leichter, durchlässiger, lockerer Boden hoher Azidi-

¹³⁶ Quantitative Bestimmung, cit. S. 270, sub. Anm. 7.

tät, dementsprechend ist auch das *Bodengefüge ziemlich primitiv*. Die eigentliche *Krümelerung fehlt*, oder die leicht angedeuteten Krümel sind äußerst unbeständig. Die Humusstoffschicht besteht zum größeren Teil aus *Humusfeinkoagulaten*, und in den Anreicherungs-horizonten sind Sesquioxyd-Humusfeinkoagulate reichlich vorhanden ¹³⁷.

Große Humidität des Standortes, hohe Durchlässigkeit und Azidität des Profils bewirken eine ziemlich intensive Verwitterung des mineralischen Bodenanteils.

Tabelle 18.

Physikalische Eigenschaften der verschiedenen Horizonte des subalpinen Humus-podsols « Piscium ».

| Horizonte | A ₀ | A ₁ ¹ | A ₁ ² | A ₂ | P _h | B _s | BC |
|---------------------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|--------|
| 1. Horizontmächtigkeit . | 1—3 cm | 15 cm | 14 cm | 6 cm | 5 cm | 37 cm | — |
| 2. pH-Werte (frisch) . . | 5,2 | 3,9 | 3,7 | 4,0 | 4,4 | 4,8 | 5,0 |
| 3. Bodenart ¹ | (H.) | (H.) | (H.) | S. | t. S. | t. S. | t. S. |
| 4. Litergewicht g TS g | | 108 | 230 | — | | 755 | 1094 |
| 5. Porenvolumen . . % | | 93 | 84 | — | | 69 | 53 |
| 6. Wasserkapazität % | | 64 | 83 | — | | 60 | 42 |
| 7. Luftkapazität . . % | | 29 | 1 | — | | 9 | 11 |
| 8. Wasserdurchlässigkeit: Minuten pro Liter | | 11 | — | — | | 17 | 14 |
| 9. Skelettgehalt . . . | 0 | 0 | 0 | I | II | III | III |
| 10. Petrographie . . . | — | — | — | Bündnerschiefer, Quarzit, Gneis | | | |
| 11. Verwitterungsgrad . | — | — | — | III—IV | II—III | II—III | II—III |
| 12. Krümelerung | 0 | 0 | 0 | 0 | I | I | 0—I |
| 13. Feinkoagulate . . . | I—II | III | III—IV | 0 | III | III | 0—I |
| 14. Gefügeentwicklung . | I | I—II | 0—I | 0—1 | II | II | I |

¹ Bodenart: H. = Humus, S. = Sand, t. = tonig. 9 und 11—14 sind nach Kennzahlen 0—IV geschätzt, vgl. S. 288—290.

4. Chemische Untersuchungsergebnisse.

a) Der Humus.

Das Podsolprofil gliedert sich in einen biogenen und in einen von diesem scharf getrennten, vorwiegend petrogenen Anteil. Nach *Pallmann* ¹³⁸ werden Podsolvarianten mit über 10 % Humus im B-Horizont als Humuspodsole bezeichnet. Aus den Gesamthumus-Bestimmungen (vgl. Tabelle 19, sub 3) ist ersichtlich, daß das untersuchte Profil diese Anforderungen erfüllt; es ist eine starke *Filtrationsverlagerung der Humussubstanz* nachweisbar. Als *Lieferschicht* kommt der A₁²-Horizont

¹³⁷ Vgl. Begriffe: « Krümel und Feinkoagulate », Abschn. II A 2 c, S. 277.

¹³⁸ H. Pallmann und P. Haffter: loc. cit. S. 271, daselbst S. 357—466.

in Frage. Da er wenig Mineralerde beigemischt enthält, ist sein prozentualer Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust vgl. Tabelle 20, sub 2) kleiner als im weniger abgebauten A_1^1 -Horizont. Trotzdem zeigt dieser Lieferhorizont keine Abnahme des Kohlenstoffgehaltes, hingegen einen Rückgang des Humus-Proteinanteils sowie auch der Benetzungswärme, der Hygroskopizität und des Wasserbindungsvermögens. Dieser Effekt kann auf eine Rückstandsanreicherung kohlenstoffreicher, stickstoffarmer, wenig oberflächenaktiver, kondensierter Humussubstanzen (Lignin) im A_1^2 -Lieferhorizont zurückgeführt werden. Die abgewanderten Humuskolloide müßten dann die gegenteiligen Eigenschaften aufweisen, was auch die diesbezüglichen Analysenresultate der Anreicherungs-horizonte (vgl. Tabellen 19 und 20) tendenzmäßig bestätigen.

Der A_1^1 -Horizont weist als Hauptwurzelhorizont und biologisch aktivste Zone den größten *Proteingehalt* und das engste *C/N-Verhältnis* des Profils auf. Der deutliche Rückgang des N-Gehaltes und die starke Erweiterung des C/N-Quotienten im A_1^2 -Horizont sind neben der Abwanderung proteinartiger Kolloide vor allem auf die ziemliche biologische Inaktivität dieses Horizontes zurückzuführen.

Tabelle 19.

Humusuntersuchungen in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Humuspodsols « Piscium ».

(Die Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | A ₀ | A ₁ ¹ | A ₁ ² | A ₂ | B _h | B _s | BC |
|------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| 1. Horizontmächtigkeit . | 1—3 cm | 15 cm | 14 cm | 6 cm | 5 cm | 37 cm | — |
| 2. pH-Werte (frisch) . . | 5,2 | 3,9 | 3,7 | 4,0 | 4,2 | 4,8 | 5,0 |
| 3. Gesamthumus (58% C) | | | | | | | |
| % | 86,2 | 77,3 | 87,0 | 2,6 | 16,5 | 8,0 | 2,3 |
| 4. Gesamtkohlenstoff % | 50,0 | 44,9 | 50,2 | 1,5 | 9,6 | 4,7 | 1,4 |
| 5. Gesamtstickstoff . % | 1,78 | 2,25 | 1,68 | 0,05 | 0,33 | 0,16 | 0,04 |
| 6. Rohprotein in % des Gesamthumus | 12,9 | 18,1 | 12,1 | (12,0) | 12,5 | 12,4 | (10,7) |
| 7. C/N - Verhältnis (atomar) | 32,8 | 23,3 | 35,0 | (35,0) | 33,8 | 34,0 | (43,7) |
| 8. Humusbildner (in % des Gesamthumus geschätzt) | 80—90 | 20 | 0 | — | 0 | — | — |
| 9. Humusstoffe und Humoide (in % des Gesamthumus) | 10—20 | 80 | 100 | — | 100 | — | — |

b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte.

Das Podsol ist besonders in seinem biogenen Profilanteil stark gegen Basen gepuffert, die Säurepufferung ist kleiner (vgl. Tabelle 20, sub 18 und 19). Nur der A_1^2 -Humus weist ein geringes Pufferungsvermögen auf. Es kann dies mit der Abwanderung hochdisperser Humuskolloide aus diesem Horizont in Zusammenhang gebracht werden. Das starke Anwachsen der Säure und der Basenpufferung im Anreicherungs-horizont bestätigt diese Vermutung. Auf die *Einwanderung* amphoterer, eiweißartiger Humuskolloide und anorganischer, *puffernder Ampholyte* (Sesquioxide) in die elektrolytarmen B-Horizonte kann man auch aus dem verschieden großen Pufferungsvermögen der Profilhorizonte schließen.

Tabelle 20.

Die Adsorptionskomplexe in den verschiedenen Horizonten des subalpinen Humuspodsols « Piscium ».

(Die Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | A ₀ | A ₁ ¹ | A ₁ ² | A ₂ | B _h | B _s | BC |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 1. Art der Adsorptionskomplexe | holorg. | holorg. | holorg. | hemorg. | hemorg. | hemorg. | — |
| 2. Glühverlust% | 94,4 | 91,1 | 85,9 | 4,0 | 19,8 | 11,1 | 6,0 |
| 3. Tone ¹ (Ø < 0,002 mm)% | — | — | — | 1,5 | — | 1,6 | 1,3 |
| 4. SiO ₂ /R ₂ O ₃ - Verhältnis der « Tone » ¹ | — | — | — | 1,2 | 0,03 | 0,01 | 0,4 |
| 5. Wasserbindung g H ₂ O | — | 450 | 147 | 60 | 105 | 99 | 68 |
| 6. Hygroskopizität% | 8,79 | 9,49 | 6,54 | 0,26 | 4,33 | 5,00 | 1,83 |
| 7. Benetzungswärme cal | 2830 | 2220 | 1710 | 20 | 1040 | 850 | 450 |
| 8. Umtauschkapazität Mval. | 226,7 | 239,1 | 205,6 | 9,5 | 103,8 | 87,3 | 28,4 |
| 9. PO ₄ -u. SO ₄ -Ionen Mval. | 1,00 | 0,30 | 1,16 | 0,12 | 0,36 | 0,05 | 0,04 |
| 10. Na-Ionen . . . Mval. | 0,32 | 0,21 | 0,23 | 0,06 | 0,12 | 0,13 | 0,08 |
| 11. K-Ionen . . . Mval. | 6,30 | 1,90 | 2,00 | 0,43 | 0,45 | 0,47 | 0,24 |
| 12. Mg-Ionen . . . Mval. | 9,10 | 3,00 | 3,17 | 1,16 | 1,60 | 1,86 | 1,10 |
| 13. Ca-Ionen . . . Mval. | 38,79 | 1,76 | 2,42 | 0,60 | 1,32 | 0,54 | 0,30 |
| 14. Mn-Ionen . . . Mval. | 0,31 | 0,05 | 0,14 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,04 |
| 15. Total basische Kationen | 54,72 | 7,12 | 7,96 | 2,30 | 3,52 | 3,04 | 1,76 |
| 16. H-Ionen | 171,8 | 232,0 | 197,6 | 7,2 | 100,3 | 84,3 | 26,6 |
| 17. Sättigungsgrad . . .% | 24,2 | 3,0 | 3,9 | (24,2) | 3,4 | 3,5 | 6,2 |
| 18. Pufferungswert gegen HCl% | 92 | 71 | 36 | 2 | 22 | 20 | 39 |
| 19. Pufferungswert gegen KOH% | 100 | 90 | 87 | 9 | 63 | 47 | 42 |

¹ Wasserdispergierbare Kolloide.

c) Die austauschbaren Ionen.

Die *Humushorizonte* stechen hervor durch ihre *große Umtauschkapazität* von über 200 Mval. pro 100 g TS (vgl. Tabelle 20, sub 8). Die Abwanderung oberflächenaktiver Humuskolloide aus den tieferen Schichten der Humusaufgabe kommt in der leicht verminderten Umtauschkapazität des A_1^2 -Horizontes zum Ausdruck.

Die *Bleicherde* ist *an adsorbierenden Kolloiden total verarmt*, diese sind mit den Humussolen in die Tiefe gewandert und im B-Horizont koaguliert worden, wodurch hier die adsorbierenden Komplexe stark vermehrt wurden.

Im wenig abgebauten Pflanzenmaterial des A_0 -Horizontes sind etwa 15—18mal größere Mengen *basischer Kationen* vorhanden als im B-Horizont. Die Ursache liegt im intensiven Mineralstoff-Aufnahmevermögen der Vegetation; im Blatt- und Nadelfallmaterial werden diese Ionen wieder dem obersten Bodenhorizont zugeführt. Die Menge adsorbierter basischer Kationen *nimmt mit der Profiltiefe im Podsol ganz allgemein ab*. Die Abnahme ist aber nicht bei allen Ionen gleich stark; am ausgeprägtesten ist sie beim *Kalzium*; im A_0 -Horizont sind 70 % der adsorbierten Basen Ca-Ionen, im B_s -Horizont sind es nur 17 %. Die Abnahme des adsorbierten *Natriums* mit der Bodentiefe ist so gering, daß eine deutliche prozentuale Zunahme dieses Ions bemerkbar ist (A_0 -Horizont 0,7 % Na; B_s -Horizont 4,3 % Na-Ionen). Die kolloiden Wanderphasen im Podsolprofil bevorzugen in ihren Ionenschalen die peptisierenden Na- und H-Ionen¹³⁹.

In allen Horizonten dieses sauren Profils sind 65—83 % der mit basischen Kationen besetzten Oberflächenorte von Ca- und Mg-Ionen belegt; 12—27 % sind Kaliionen, die übrigen basischen Kationen sind nur in sehr geringen Prozentsätzen vertreten. Ein selektives Adsorptionsvermögen des Humus für Ca-Ionen oder der glimmerreichen Mineralerdehorizonte für K-Ionen, wie dies von *Schachtschabel*¹⁴⁰ festgestellt wurde, läßt sich aus unseren Analysenresultaten von natürlichen Humus- und Mineralerdeböden nicht ableiten.

Der *Sättigungsgrad* der Podsolhorizonte ist sehr gering. Er beträgt im A_1 - und im B-Horizont nur 3—4 %. *Der B_s -Anreicherungs-horizont des Podsols ist also durch die absolute Dominanz der H-Ionen in der Umtauschgarnitur und durch den minimalen Gehalt an koagulierenden Ca-Ionen gekennzeichnet*. Es kann sich deshalb, wie auch *Pallmann*¹⁴¹

¹³⁹ H. Pallmann, A. Hasler und A. Schmuziger: Beitrag zur Kenntnis der alpinen Eisen- und Humuspodsole. Bodenkunde u. Pflanzenern. 9./10. 1938, 94—122.

¹⁴⁰ Schachtschabel: Die Bindung der Kationen und die Bestimmung der Sorptionsträger im Boden. Landw. Jahrbücher (Berlin) 91, 1941, 355.

¹⁴¹ H. Pallmann, A. Hasler und A. Schmuziger: loc. cit. S. 271.

gezeigt hat, im B-Horizont des subalpinen Podsoles nur um eine rein isoelektrische Flockung der eingewanderten Gele handeln.

B. Podsolierte sekundäre Braunerde des Nardetum subalpinum.

1. Lage der Profilstelle und Vegetation.

Lokalität : Alp Piscium bei Nante, Gemeinde Airolo.

Höhe über Meer : 1740 m.

Mittlere Jahrestemperatur : 2,3° C (extrapoliert nach meteorologischer Station Airolo, dort 5,9° C).

Mittlere Jahresniederschläge : 2166 mm (extrapoliert nach Airolo, dort 1568 mm).

Neigung und Exposition : 12—14° SSE.

Muttergestein : Hangschutt mit vorwiegend Bündnerschiefer, wenig Gneis.

Bodenserie : Subalpine Podsolserie.

Boden : Sekundäre, podsolierte Braunerde (saurer Gebirgsweideboden).

Pflanzengesellschaft : Nardetum strictae subalpinum ¹⁴², ¹⁴³.

Artenliste ¹:

| | |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 4 4 Nardus stricta L. | + 1 Trifolium pratense L. |
| 1 1 Festuca rubra L. | + 1 Trifolium badium Schreber. |
| 1 1 Briza media L. | + 1 Lotus corniculatus L. |
| 1 1 Agrostis vulgaris With. | 1 1 Thymus Serpyllum L. s. l. |
| 1 1 Agrostis alba L. | 1 1 Vaccinium myrtillus L. |
| + 1 Anthoxanthum odoratum L. | + 1 Vaccinium vitis idaea L. |
| + 1 Phleum alpinum L. | + 1 Vaccinium uliginosum L. |
| + 1 Poa alpina L. | 1 1 Veronica officinalis L. |
| + 1 Luzula multiflora (Retz.) Lej. | + 1 Veronica Chamaedrys L. |
| + 1 Luzula sudetica (Willd.) Lam. u. DC. | + 1 Galium anisophyllum Vill. |
| + 1 Luzula silvatica (Hudson) Gaudin. | + 1 Campanula barbata L. |
| + 1 Carex spec. | + 1 Campanula Scheuchzeri Vill. |
| + 1 Gymnadenia albida (L.) Rich. | + 1 Phyteuma betonicifolium Vill. |
| + 1 Silene nutans L. | 2 2 Hieracium Pilosella L. |
| 1 1 Cerastium arvense L. ssp. strictum (Hänke) Gaudin. | 2 1 Hieracium Auricula L. em. Lam. u. DC. |
| + 1 Ranunculus montanus Willd. | + 1 Arnica montana L. |
| + 1 Ranunculus pyrenaicus L. | + 1 Carlina acaulis L. |
| 2 1 Sieversia montana (L.) R. Br. | + 1 Antennaria dioeca (L.) Gärtner. |
| + 1 Potentilla aurea L. | + 1 Achillea Millefolium L. |
| 2 2 Trifolium alpinum L. | + 1 Achillea moschata (Wulfen) Vaccari. |
| | + 1 Leontodon hispidus L. |

¹ Herrn Prof. Dr. A. Volkart danke ich für die Überlassung einer Vegetationsaufnahme dieses Bestandes.

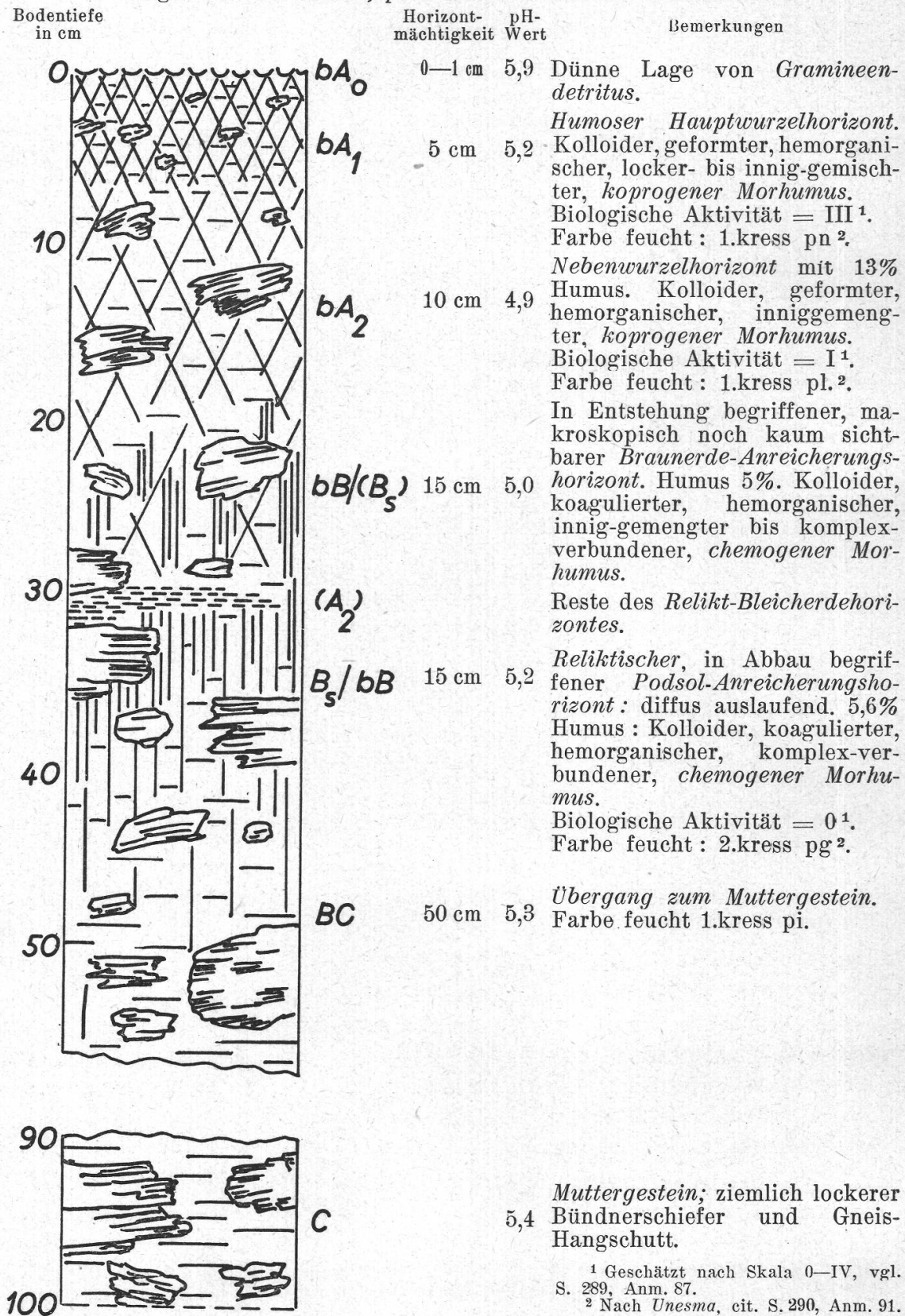
¹⁴² Jaromir Klika: Borstgraswiesen in den Westkarpaten. Zvlástni otisk z Vest. Kral. Ges. Spol. Nauk. Tr. II. Roc. 1934.

¹⁴³ W. Lüdi: Experimentelle Untersuchungen an alpiner Vegetation. Ber. d. Schweiz. Botan. Gesellschaft, Festband Rübel, 1936, Bd. 46.

2. Das Bodenprofil und seine Morphologie.

a) Das Profil.

Figur 12. *Sekundäre, podsolierte Braunerde «Piscium».*



¹ Geschätzt nach Skala 0—IV, vgl.
S. 289, Anm. 87.

² Nach Unesma, cit. S. 290, Anm. 91.

b) Ergebnisse der mikromorphologischen Horizont-Untersuchungen.

Der *anorganische Bodenanteil* ist petrographisch gleich beschaffen wie der des beschriebenen Podsolprofils auf Piscium. Besonders die Bündnerschiefer, aber auch die Gneise sind im oberen Profilanteil sehr stark erdig zerbröckelnd und enthalten nur selten noch Feldspat. Dagegen sind Quarzkristalle und zellige Quarzite häufig.

Während in den obersten 10 cm des Profils die Minerale und Gesteinspartikel höchstens in ihren Spaltrissen und Fugen von Solen durchdrungen, sonst aber hüllenfrei sind, mehren sich mit der Profiltiefe die Gelhüllen und die Sesquiox ydkonkretionen. Im *bb(B_s)-Horizont* in 20—25 cm Tiefe sind unregelmäßig rundliche, *dunkelbraun opake Feinkoagulate* von 0,06—0,3 mm Durchmesser in den Bodenporen sehr zahlreich; sie zeigen z. T. doppelbrechende Einschlüsse von Mineralsplittern. Offenbar wird sich hier der heute makroskopisch noch kaum sichtbare, diffuse Anreicherungshorizont der jungen podsolierten Braunerde ausbilden. Der *B_s/bb-Horizont* ist ein typischer *reliktischer Podsol-Anreicherungshorizont*. Das ehemals hier entstandene, heute nur noch reliktisch vorhandene Podsol entwickelte sich unter einer Zwergstrauchgesellschaft. Diese wurde wahrscheinlich ausgereutet und abgebrannt, worauf Holzkohlenfunde hinweisen; durch Beweidung installierte sich das heutige Nardetum. Während der A₁-Horizont völlig und der A₂-Horizont des reliktischen Podsols zum größeren Teil verschwunden sind, ist der B_s-Horizont auch makroskopisch noch deutlich sichtbar. Die Bodenteilchen sind mit 0,01—0,05 mm dicken Gelhüllen überzogen. Die im Oberboden sehr häufigen feinen Mineralsplitter entziehen sich hier der Beobachtung, sie sind größtenteils in den Sesquiox yd-Feinkoagulaten eingeschlossen. Der C-Horizont weist nur vereinzelte Eisenhydroxyd-Konkretionen auf. Die Minerale und Gesteinsstücke sind meist in feindisperssem Mineralschluff eingebettet.

Die *Humussubstanz*: Die Bodenoberfläche ist mit einer dünnen Schicht abgefallener Pflanzenreste bedeckt (vorwiegend Blattscheiden und Halmteile). Diese werden von den zahlreichen Kleintieren des Bodens sehr rasch abgebaut, so daß in 1—2 cm Bodentiefe Humusteile mit erhaltener Zellstruktur nur noch ganz vereinzelt vorkommen. Zellulose ist außer in lebenden Pflanzenteilen (Wurzeln z. B.) sehr selten nachweisbar. Ihr Fehlen und die große Zahl verschiedenster Exkreme nte von z. T. Mineralerde verschlingenden Bodentieren sind Zeiger einer *hohen biologischen Aktivität* des Oberbodens. Von den Regenwürmern wurde *Eisenia rosea* gefunden. Der Bodendünnschliff zeigt nur wenig typische Regenwurmexkreme nte. Lindquist¹⁴⁴ schließt aus Hal-

¹⁴⁴ B. Lindquist: Untersuchungen über die Bedeutung einiger skandinavischer Regenwürmer für die Zersetzung der Laubstreue und für die Struktur des Mullbodens. Svenks. skogsvardsför. 1941, S. 179—243.

tungsversuchen, daß *Eisenia rosea* für die Laubzersetzung keine wesentliche Rolle spielt. Nach H. Franz¹⁴⁵ soll er aber neben Humusstoffen auch unzersetztes Pflanzenmaterial aufnehmen.

Im bA₁-Horizont wurden folgende gut ausgebildete *Exkrementformen* festgestellt, deren Zugehörigkeit zu bestimmten Bodentieren noch untersucht werden muß:

Langzylindrische, 2,1/1,00 mm große Exkremente mit zahlreichen kristallinen Einschlüssen.

Kurzzylindrische Formen von 1,1/0,7 mm und eirunde von 0,7/0,4 mm Längen- und Dickendurchmesser, beide mit mineralischen Einschlüssen.

Kurzzylindrische, holorganische Formen von 0,18/0,10 mm Größe.

Rundliche Exkremente mit einem Durchmesser von 0,09—0,12 mm; sowie kantige bis unregelmäßig rundliche Partikel von 0,04—0,06 mm, mit welchen im obersten Teil des Profils die wenig abgebauten Halmstücke dicht besetzt sind.

Mit der Profiltiefe nimmt die Vielfalt der Exkrementausbildungen gleichsinnig mit der biologischen Aktivität ab. Der Humus des Profils ist gut abgebaut und zum größeren Teil innig mit der sauren Mineralerde gemengt. Im Oberboden ist er vorwiegend koprogener Entstehung, in den tieferen Horizonten dominieren saure Humuskolloide.

Tabelle 21.

Die Humusformen in den verschiedenen Horizonten der subalpinen, sekundären, podsolierten Braunerde « *Piscium* ».

| Horizont | Humusformen ¹ | Sättigungsgrad (in % der UK) | Aschegehalt (in % der TS) |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| bA ₀ | G · 2/U · 1—2/F · 1a/M · 3b | 26,6 | 17,0 |
| bA ₁ | G · 2/U · 2/F · 2a—b/M · 1b | 15,7 | 66,2 |
| bA ₂ | G · 2/U · 2/F · 2b/M · 1b | 5,6 | 80,4 |
| bB/(B _s) | G · 2/U · 3/F · 2b—c/M · 1c | 4,8 | 90,6 |
| B _s /bB | G · 2/U · 3/F · 2c/M · 1c | 4,3 | 90,5 |

¹ Die Bedeutung der Humusformeln ist aus Tabelle 2: Humussystematik, S. 282 abzuleiten.

3. Physikalische Eigenschaften.

Die Körnung der sekundären, podsolierten Braunerde ist im wesentlichen gleich wie in den petrogenen Horizonten des besprochenen Podsoles. Dagegen erscheint das *Bodengefüge kompakter und entwickelter*. Dies kommt einerseits im *geringeren Porenvolumen* und in der *kleineren Luftkapazität* zum Ausdruck, anderseits in der durch die

¹⁴⁵ H. Franz: Bildung von Humus aus pflanzlichem Bestandesabfall und Wirtschaftsdünger durch Kleintiere. Bodenk. u. Pflanzenern. 32, 1943, 336—351.

Regenwurmtätigkeit bewirkten schwachen *Krümelung* des Oberbodens; die Stabilität der Krümel ist jedoch sehr klein. Von den mittleren Baueinheiten des Bodens wiegen die Feinkoagulate vor (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22.

Physikalische Eigenschaften der verschiedenen Horizonte der subalpinen, sekundären, podsolierten Braunerde « Piscium ».

| Horizonte | bA ₀ | bA ₁ | bA ₂ | bB/(B _s) | B _s /bB | BC |
|------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|------|
| 1. Horizontmächtigkeit . . . | 0—1 cm | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 18—20 cm | — |
| 2. pH-Werte (frisch in H ₂ O) | 5,9 | 5,2 | 4,9 | 5,0 | 5,2 | 5,4 |
| 3. Bodenart ¹ | H | — | s. T. | t. S. | t S. | t S. |
| 4. Litergewicht (TS) . . . g | — | 813 | — | 925 | — | — |
| 5. Porenvolumen . . . % | — | 61 | — | 63 | — | — |
| 6. Wasserkapazität . . . % | — | 58 | — | 60 | — | — |
| 7. Luftkapazität . . . % | — | 3 | — | 3 | — | — |
| 8. Skelettgehalt | 0 | 0 | I | I—II | II | III |
| 9. Petrographie | — | <i>Bündnerschiefer, Quarzite, Gneise</i> | | | | |
| 10. Verwitterungsgrad . . . | — | III | II—III | II—III | II—III | II |
| 11. Krümelung | — | II | I—II | I | I | 0—1 |
| 12. Feinkoagulate | — | II | I—II | III—II | III | I |
| 13. Gefügeentwicklung . . . | — | II | I—II | I | I | 0—I |

8 und 10—13 sind nach Kennzahlen 0—IV geschätzt, vgl. S. 288—290.
¹ Bodenart: H. = Humus, s. = sandig, T. = Ton, t. = tonig.

4. Chemische Untersuchungsergebnisse.

a) Der Humus.

Das Fehlen einer vom petrogenen Profilanteil scharf abgegrenzten *Humusaufgabe* unterscheidet grundsätzlich den Weideboden vom Boden der Zwergstrauchgesellschaft (gleiches Muttergestein und General-klima vorausgesetzt). Das Profil ist braunerdeähnlich, doch ist sein *Humusgehalt* höher, und die Humusverteilung ist weniger diffus als in einer entwickelten Braunerde (vgl. Tabelle 23, sub. 3). Die mangelnde tiefgründige, intensive Durchwühlung und die saure Reaktion verleihen ihm die Kennzeichen der *podsolierten* Braunerde. Seine biologische Aktivität ist bedeutend größer und tiefgründiger als die des Podsoles. Das engere C/N-Verhältnis des Weidebodens kann mit dem größeren Stickstoffgehalt der Gramineenvegetation und mit der größeren Zahl lebender und abgestorbener Bodenorganismen erklärt werden (vgl. Tabelle 23, sub 5—7).

Tabelle 23.

Humusuntersuchungen in den verschiedenen Horizonten der subalpinen, sekundären, podsolierten Braunerde « Piscium ».

(Die Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | bA ₀ | bA ₁ | bA ₂ | bB/(B _s) | B _s /bB | BC | C |
|------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|--------|--------|
| 1. Horizontmächtigkeit . | 0 – 1 cm | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 15–20 cm | 50 cm | — |
| 2. pH-Werte (frisch) . . | 5,9 | 5,2 | 4,9 | 5,0 | 5,2 | 5,3 | 5,4 |
| 3. Gesamthumus (58 % C) % | 70,8 | 30,3 | 13,3 | 5,0 | 5,6 | 3,2 | 1,3 |
| 4. Gesamtkohlenstoff . % | 41,0 | 17,6 | 7,7 | 2,9 | 3,3 | 1,8 | 0,8 |
| 5. Gesamtstickstoff . . % | 1,90 | 1,29 | 0,63 | 0,22 | 0,21 | 0,09 | 0,03 |
| 6. Rohprotein in % des Gesamthumus | 16,7 | 26,6 | 29,6 | 27,7 | 23,3 | (17,9) | (16,8) |
| 7. C/N-Quotient (atomar) | 25,2 | 15,9 | 14,3 | 15,2 | 18,1 | (23,8) | (29,6) |
| 8. Humusbildner in % des Gesamthumus (geschätzt) | 60 | 5 | — | — | — | — | — |
| 9. Humusstoffe und Humoide in % des Gesamthumus | 40 | 95 | 100 | 100 | 100 | — | — |

b) Das Pufferungsvermögen der Horizonte.

Die Säure- und Basenpufferung des Borstgras-Weideprofils ist *braunerdeähnlich ausgeglichen*. Auf den podsolierten Charakter weist die geringe Säurepufferung der Oberhorizonte hin. Das Pufferungsvermögen nimmt mit der Profiltiefe bis in den B_s/bB-Horizont zu, um dann gegen den Untergrund wieder leicht abzusinken. Dies ist erklärlich durch die im Profil stattfindende *tiefenwärts gerichtete Verlagerung puffernder Kolloide* (vgl. Tabelle 24, sub 18—19).

c) Die austauschbaren Ionen.

Im Weideboden ist die Umtauschkapazität (vgl. Tabelle 24, sub 8) bedeutend kleiner als in den Horizonten des beschriebenen Podsol. Dies steht wohl mit dem geringeren Gehalt an Humus und an anorganischen Gelen in Zusammenhang. Die Menge adsorbierter Kationen und Anionen nimmt mit der Profiltiefe gleichmäßig ab, ohne daß ein Horizont besonders hervortreten würde. Trotz dieses braunerdeähnlichen Zuges weist die starke Dominanz der Wasserstoffionen, d. h. der geringe *Sättigungsgrad* der Bodenhorizonte (vgl. Tabelle 24, sub 16 und 17) das Profil doch in die Podsolserie. Das Sättigungsminimum liegt im reliktischen B-Horizont, wie das in der Podsolserie normal ist, während gegen den C-Horizont wieder eine Sättigungszunahme eintritt.

Das Profil ist *arm an Pflanzennährstoffen*, nur die obersten 5 cm speichern dank ihres höheren Humusgehaltes gegenüber dem mineralischen Untergrund das Vielfache an basischen Kationen. Ähnlich wie im Podsolprofil nimmt das *Ca-Ion* unter den basischen Kationen eine *dominante Stellung* ein, eine Ausnahme macht charakteristischerweise der *bB/(B_s)-Horizont*, der aktuelle Anreicherungshorizont des Profils (vgl. Tabelle 24, sub 13). An zweiter Stelle stehen die Mg- und K-Ionen (vgl. Tabelle 24, sub 11—12). Na- und Mn-Ionen sind in relativ geringen Mengen vertreten.

Tabelle 24.

Die Adsorptionskomplexe in den verschiedenen Horizonten der subalpinen, sekundären, podsolierten Braunerde « Piscium ».

(Die Analysenresultate beziehen sich auf 100 g Bodentrockensubstanz.)

| Horizonte | bA ₀ | bA ₁ | bA ₂ | bB/(B _s) | B _s /bB | C |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|------|
| 1. Art der Adsorptionskomplexe | hemorgan. | hemorgan. | hemorgan. | hemorgan. | hemorgan. | — |
| 2. Glühverlust . . . % | 83 | 33,8 | 19,6 | 9,4 | 9,5 | 4,5 |
| 3. Tone ¹ ($\phi < 0,002 \text{ mm}$) % | — | — | 7,3 | 1,0 | 1,4 | 0,9 |
| 4. SiO ₂ /R ₂ O ₃ -Verhältnis der Tone ¹ | — | — | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,4 |
| 5. Wasserbindung g H ₂ O | — | 170 | 117 | 85 | 96 | 69 |
| 6. Hygroskopizität g H ₂ O | 5,61 | 4,48 | 3,44 | 2,35 | 3,12 | 1,24 |
| 7. Benetzungswärme cal. | 1390 | 1120 | 800 | 490 | 710 | 320 |
| 8. Umtauschkapazität Mval. | 138,4 | 72,8 | 56,4 | 55,0 | 45,3 | 10,4 |
| 9. PO ₄ - u. SO ₄ -Ionen » | 8,24 | 1,12 | 0,10 | 0,20 | 0,05 | 0,03 |
| 10. Na-Ionen . . . » | 0,68 | 0,28 | 0,18 | 0,20 | 0,12 | 0,05 |
| 11. K-Ionen . . . » | 10,71 | 1,68 | 0,50 | 0,88 | 0,38 | 0,49 |
| 12. Mg-Ionen . . . » | 6,16 | 2,86 | 1,13 | 0,99 | 0,56 | 0,32 |
| 13. Ca-Ionen . . . » | 18,0 | 6,44 | 1,31 | 0,51 | 0,82 | 0,45 |
| 14. Mn-Ionen . . . » | 1,32 | 0,15 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,02 |
| 15. Total basische Kationen . Mval. | 36,87 | 11,41 | 3,18 | 2,63 | 1,93 | 1,33 |
| 16. H-Ionen . . . » | 101,5 | 61,4 | 53,2 | 52,4 | 43,4 | 13,3 |
| 17. Sättigungsgrad . . % | 26,6 | 15,7 | 5,6 | 4,8 | 4,3 | 9,1 |
| 18. Pufferungswert gegen HCl % | — | 24 | 31 | 29 | 49 | 26 |
| 19. Pufferungswert gegen KOH % | — | 51 | 55 | 48 | 51 | 37 |

¹ In Wasser dispergierbare Kolloide.

V. Der Übergang von Wald in Weide.

1. Sukzessionsursachen.

In den meisten Fällen dürften die Grasflächen unterhalb der Waldgrenze und im Zwergstrauchgürtel über dem geschlossenen Wald *anthropogen* bedingt sein. Darauf deutet die ziemlich rasch *vordringende Wiederbewaldung*, sobald diese Flächen sich selber überlassen werden (z. B. Alp Stavel-Chod im schweizerischen Nationalpark).

Bei der mikroskopischen Untersuchung von Weideböden sind *Holzkohlenfunde* sehr häufig; sie sind Zeugen ausgereuteter und abgebrannter Wälder.

Oft genügt auch schon eine bloße *ständige Durchweidung* der Wald- oder Zwergstrauchbestände durch Rindvieh, um das vermehrte Aufkommen von Gramineen zu ermöglichen. Diese Entwicklung kann wie folgt ablaufen: Verdichtung des Oberbodens durch den Viehtritt, wodurch die assoziationsstypische Bodenvegetation benachteiligt wird; dazu kommt die Düngung und Einschleppung von Samen durch das Weidevieh. Das dichtliegende, ungünstige, meist durch Gramineenwurzeln verfilzte Keimbeet sowie direkte mechanische Schädigungen hemmen das Aufkommen des Baumjungwuchses, der Bestand beginnt sich allmählich zu lichten, und der Gramineenrasen schließt sich immer dichter. Als Beispiel hierfür kann die häufig durchweidete Alpenrosen-Heidelbeeren-Gesellschaft der Alp Piscium ob Nante angeführt werden. Das sonst gut ausgebildete Assoziationsindividuum (siehe Artenliste S. 321) ist mosaikartig von Tretwegen durchzogen, auf denen überall sich das Nardetum installiert hat.

2. Bodenveränderungen beim Übergang von Wald in Weide.

Da die Bodentypen in engem Zusammenhang mit der sie besiedelnden Pflanzengesellschaft stehen, ist anzunehmen, daß Hand in Hand mit tiefgreifenden Umwandlungen in der Vegetationsdecke auch Veränderungen des Bodens vor sich gehen müssen. Beim Übergang von Wald oder Zwergstrauchgesellschaften in Weide (welcher als Sukzessionsbeispiel untersucht wurde) ist denn auch tatsächlich eine mannigfache und zum Teil tiefgreifende Veränderung des Bodenprofils festzustellen.

a) Profilmorphologische Veränderungen.

Der Boden reagiert auf Beweidung oft mit einer Verbraunung¹⁴⁶. Am deutlichsten ist dies in der *Podsolserie* zu sehen; hier verschwindet der Auflagehumus sehr rasch, und Bleicherde sowie Anreicherungshorizonte werden undeutlich. Es bildet sich das typisch diffuse Profil der

¹⁴⁶ Verbraunung im Sinn einer Bodenentwicklung in der Richtung auf den Braunerdetypus zu.

podsolierten Braunerde aus; im untersuchten Fall die sekundäre podsolierte Braunerde der Borstgrasweide.

Auch auf die *Rendzina* wirkt die Beweidung verbraunend ¹⁴⁶. Tonarmut und einfache Horizontierung der Humuskarbonatböden lassen allerdings oft die profilmorphologischen Veränderungen nicht sehr auffällig werden. Die beweidete Rendzina zeigt eine bedeutend *stärkere Einmischung der Mineralerde* in die obersten humosen Bodenhorizonte.

b) Bodenphysikalische Veränderungen.

Im *Porenvolumen* und in der *Durchlässigkeit* der besprochenen Wald- und Weideböden fanden wir die von Burger ¹⁴⁷ gemachten Beobachtungen bestätigt. Das Porenvolumen der Weideböden braucht absolut nicht geringer zu sein als beim entsprechenden Waldboden. Es findet aber immer eine *Verkleinerung der Bodenhohlräume* statt, wodurch die Menge der wasserführenden Poren zu-, die Luftkapazität aber abnimmt.

Tabelle 25.

Wasser- und Luftkapazität im Obergrund von Weide und Waldböden.

| | Boden- serie | Poren- volumen Vol.‰ | Wasser- kapazität Vol.‰ | Luft- kapazität Vol.‰ |
|-----------------------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <i>Weide</i> : Trisetetum | Rendzina | 73 | 58 | 15 |
| Nardetum | Podsol | 61 | 58 | 3 |
| <i>Wald</i> : Mugeto-Ericetum | Rendzina | 68 | 49 | 19 |
| Rhodoreto-Vaccinietum . . . | Podsol | 93 | 64 | 29 |

Der dichte Rasen der Weideböden verursacht eine filzartige Verwurzelung des Oberbodens, die ein *erschwertes Eindringen der Niederschläge* und wahrscheinlich auch einen weniger guten *Gasaustausch* zur Folge hat. Auch bietet die leicht abtrocknende, staubige Bodenoberfläche durch ihre schwere Benetzbarkeit der Wasserversickerung anfänglich einen zusätzlichen Widerstand. Die weichen, durch Regengüsse, Schmelzwasser und Schnee sich dem Boden dicht anlegenden Rasenpflanzen und Humusbildner vermindern ebenfalls die Wasserdurchlässigkeit der Bodenoberfläche.

Der *Tonanteil* in den Weideböden ist oft größer als in den Waldböden, was auch mit dem *Relief* in Zusammenhang stehen kann. Wäh-

¹⁴⁶ Verbraunung im Sinn einer Bodenentwicklung in der Richtung auf den Braunerdetypus zu.

¹⁴⁷ H. Burger: loc. cit. S. 290.

rend die steileren Hänge von Wald bestockt bleiben, sind die ebeneren Lagen oft landwirtschaftlich genutzt. *Flächen* entstehen vorzugsweise auf weicherdigen, tonerdereichen Muttergesteinen, auf alluvialen Auflagerungen von Moränen oder Hangschutt mit hohen, die Verbraunung begünstigenden Kieselsäuren- und Sesquioxidgehalten.

c) Chemische Veränderungen.

In den Weideprofilen ist der *pH-Wert* des Oberbodens weniger sauer als im entsprechenden Waldboden. Eine Ursache mag darin liegen, daß die Humusbildner der Weiden aschereicher sind und ihr Zellsaft weniger Säuren enthält als der von Coniferen- und Ericanadeln oder der von Vaccinien- und Rhododendronblättern. In Tabelle 26 sind die pH-Werte einiger unzersetzter Humusbildner aus den besprochenen Profilen aufgeführt.

Tabelle 26.

Reaktion des Zellsaftes von unzersetzten Humusbildnern.

(Zerhacktes Pflanzenmaterial in destilliertem Wasser 1 Std. geschüttelt.)

| Pflanzenart | pH-Wert |
|------------------------------------|---------|
| Vaccinium myrtillus | 3,8 |
| Vaccinium uliginosum | 4,6 |
| Rhododendron ferrugineum | 4,6 |
| Vaccinium vitis idaea | 4,9 |
| Hylocomium triquetrum | 4,9 |
| Rhododendron hirsutum | 5,2 |
| Erica carnea | 5,2 |
| Calamagrostis villosa | 5,6 |
| Nardus stricta | 5,9 |

Bei seinen zahlreichen Reaktionsstudien hat H e s s e l m a n n ¹⁴⁸ in unzersetztem Pflanzenmaterial ganz ähnliche Werte gefunden.

Durch den Gramineendetritus werden dem Oberboden geringere Säuren-, aber eher größere Mineralstoffmengen (vgl. Tabelle 28) zugeführt als durch die Waldhumusbildner; deshalb ist der *Sättigungsgrad* mit basischen Kationen *in den Weideböden höher* als in den Waldböden auf gleichem Muttergestein.

Die veränderte Profildynamik der Weideböden äußert sich auch im weiteren *SiO₂/R₂O₃-Verhältnis* der Tonfraktion (vgl. Tabelle 27). Die stark saure Reaktion des Podsoles führt zum Tonabbau und zu extremer

¹⁴⁸ H. H e s s e l m a n n: Studien über die Humusdecke des Nadelwaldes, ihre Eigenschaften und deren Abhängigkeit vom Waldbau. Meddelanden fran statens skogsförsöksanstalt, 22, 5, 1926.

Dominanz der Sesquioxide in den anorganischen Bodenkolloiden. In der podsolierten Weide-Braunerde ist die Tonzerstörung etwas geringer, doch wiegen die R_2O_3 -Gele immer noch stark vor. Die beweidete, leicht verbrauchte Rendzina zeigt im Oberboden SiO_2/R_2O_3 -Verhältnisse von 2—3, wie sie für die Braunerde charakteristisch sind. Im Wald-Humuskarbonatboden (mäßig entwickelte Rendzina) erscheint die Tonbildung wieder etwas gehemmt.

Tabelle 27.

SiO_2/R_2O_3 -Verhältnisse der kolloiden Bodenfraktion von Weide- und Waldböden.

| | Horizonte | | | | | |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|
| | A ₁ | A ₂ | A ₃ | B _h | B _s | C |
| <i>Weide:</i> | | | | | | |
| Verbrauchte Rendzina . . | 3,1 | 2,1 | 1,8 | — | — | 0,1 |
| Podsolierte Braunerde . . | — | 0,5 | — | — | 0,2 | 0,4 |
| <i>Wald:</i> | | | | | | |
| Rendzina | 1,7 | 1,1 | — | — | — | 1,0 |
| Podsol. | — | (1,2) | — | 0,03 | 0,01 | 0,4 |

d) Biologische Veränderungen.

Die biologische Aktivität der Weideböden ist bedeutend größer und z. T. auch tieferreichend als in den Waldböden. Dies geht sowohl aus der mikroskopischen Untersuchung der Bodendünnschliffe wie auch aus den quantitativen Abbaubersuchen von Zellulose- und Eiweißestkörpern ¹⁴⁹ hervor.

Morphologische Kennzeichen für die Größe der biologischen Aktivität sind z. B.: *Durchmischungsgrad* des organischen mit dem anorganischen Bodenanteil, Zahl und Art der vorhandenen *Bodentierexkremente*, Anwesenheit von Regenwürmern, Mengenanteil der *Humusbildner* am Gesamthumus usw.

Wie Wittich ¹⁵⁰ zeigen konnte, beeinflusst die Art, die chemische Zusammensetzung und besonders das *C/N-Verhältnis* des anfallenden organischen Materials seine Abbauintensität. In der Gramineenvegetation der Weideböden fanden wir ein engeres C/N-Verhältnis als in der Vegetation der biologisch weniger aktiven subalpinen Waldböden (vgl. Tabelle 28), was mit den Beobachtungen des oben angeführten Autors ¹⁵⁰ übereinstimmt.

¹⁴⁹ Nach der von H. Pallmann und F. Richard ausgearbeiteten Methode, Veröffentlichung folgt demnächst.

¹⁵⁰ Wittich: Untersuchungen über den Verlauf der Streuezersetzung auf einem Boden mit Mullzustand II. Forstarchiv 1/2, 1943.

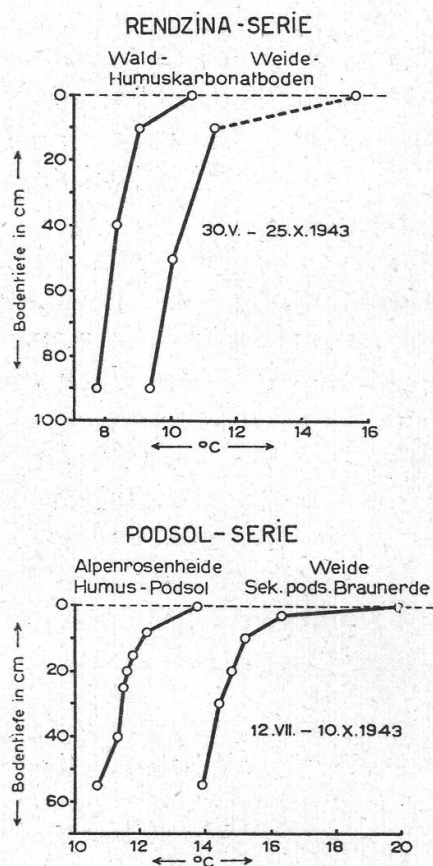
Tabelle 28.

C/N-Verhältnis und Aschegehalt der Humusbildner von Wald- und Weideböden.

| | C/N-Verhältnis atomar | Aschegehalt (% der TS) |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <i>Weide</i> : Verbraunte Rendzina (Trisetetum) . . . | 22,1 | 6,5 |
| Podsolierte Braunerde (Nardetum) . . . | 25,2 | 5,4 |
| <i>Wald</i> : Mäßig entwickelte Rendzina (Mugeto-Eri- cetum) | 74,1 | 4,4 |
| Humus-Podsol (Rhodoreto-Vaccinietum) . | 34,6 | 2,9 |

e) Lokalklimatische Unterschiede.

In Figur 13 sind die «wirksamen» *Temperaturen* (eT-Zahlen) der Wald- und der Weideprofile während der Vegetationsperiode des Jahres 1943 zusammengestellt. Bemerkenswert ist die starke wärmeisolierende Wirkung der grünen Pflanzendecke und des humosen Oberbodens. *In den obersten 10 cm des Profils ist deshalb der Temperaturabfall am größten*; die Temperaturdifferenz zwischen 10 und 100 Zentimetern Bodentiefe ist relativ gering.



Figur 13.

Die Mitteltemperaturen (eT-Zahlen) in den verschiedenen Bodenhorizonten von Wald- und Weideböden der Rendzina- und der Podsolserie.

Die *Freilandböden* sind wärmer als die Waldböden auf gleichem Muttergestein. Die stärkere Wärmeeinstrahlung ist auf den Unterschied in der Vegetationsbedeckung und besonders auch auf die südlichere Lokalexposition zurückzuführen. Es ist anzunehmen, daß die bis tief ins Bodenprofil verfolgbaren Temperaturunterschiede der Weide- und Waldböden auch auf die Bodenbiologie derselben zurückwirkt.

VI. Zusammenfassung.

A. Methodik und Begriffsbildung.

1. Die *morphologische Bodenuntersuchung* ist neben der chemischen und kolloidchemischen Analyse ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschreibung von Bodenprofilen. Sie befaßt sich:

- a) Mit dem Studium der *Baueinheiten des Bodens*: nämlich mit der Morphologie der *Bodeneinzelteilchen* (Größe, Form, Zellstruktur, Abbau oder Verwitterungsgrad von Gesteinsstücken, Mineralen, Gelen, Humusbildnern usw.); mit der Morphologie der *Bodenvielfachteilchen* (Form, Größe, Stabilität usw. der Feinkoagulate, Krümel und Klumpen); mit den *Vielfachteilchen-Aggregaten* und mit dem morphologischen Aufbau der *Bodenhorizonte*. (Die Bauelemente werden definiert auf S. 276).
- b) Mit dem *Bodengefüge* (Definition vgl. S. 277). Dieses kann verschiedene Entwicklungsgrade aufweisen. Ein loser Sandboden z. B. besitzt ein *primitives* Gefüge; die an stabilen Krümelaggregaten reiche, lockere Schwarzerde hat ein sehr *gut entwickeltes* Gefüge.

2. Der *Gesamthumus* von Bodenhorizonten wird in drei wichtige Umwandlungsstufen unterteilt. In die gegenüber dem lebenden Ausgangsmaterial wenig veränderten *Humusbildner*, in die chemisch und morphologisch stark umgewandelten, dunkeln bis schwarzen *Humusstoffe* und in die im Umwandlungszustand zwischen diesen beiden Stufen liegenden *Humoide*.

3. Der *Gesamthumus* von *Bodenhorizonten* läßt sich nach morphologischen und chemischen Gesichtspunkten in seiner *Gesamtheit* wie folgt klassifizieren in:

| <i>Gruppen (G)</i> nach dem Sättigungs- grad = V | <i>Untergruppen (U)</i> nach der Entstehungs- art | <i>Fazies (F)</i> nach dem Mineralstoff- gehalt = A | <i>Formen (M)</i> nach der Gestalt |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Mullhumus (G · 1) (V = 25—100 %) | Rohhumus (U · 1) | holorganisch (F · 1) (A = 0—20 %) | kolloid (M · 1) |
| | koprogen (U · 2) | | körnig (M · 2) |
| Morhumus (G · 2) (V = 0—25 %) | chemogen (U · 3) | hemorganisch (F · 2) (A = 20—99 %) | fasrig (M · 3) |
| | | | blättrig (M · 4) |

Die *Nomenklatur* der verschiedenen Humusbildungen ergibt sich einfach aus der Kombination der entsprechenden Humusgruppen-, Untergruppen-, Fazies- und Formenbezeichnungen in Worten oder in den betreffenden Abkürzungen (z. B. kolloider, hemorganischer, koprogener Mullhumus = $G \cdot 1/U \cdot 2/F \cdot 2/M \cdot 1$; vgl. auch Tabelle 2, S. 282).

4. Die Mikroskopie von *Bodendünnschliffen* und von *Bodenproben in ungestörter Lagerung* ist die wichtigste direkte Methode der mikromorphologischen Bodenuntersuchung.

5. Die Methodik zur *Untersuchung der Adsorptionsgarnitur* von Böden wurde eingehend studiert.

a) Die adsorbierten *H-Ionen* wurden bei leicht alkalischer Reaktion (pH 8,2) mittels n/1 Kalziumazetat-Lösung im Perkulationsapparat (vgl. Fig. 2, S. 293) erschöpfend ausgetauscht und bestimmt.

b) Die austauschbaren *basischen Kationen* wurden nach verschiedenen Methoden bestimmt (Austausch mit n/10 HCl, mit Ammonazetat, durch Elektrodialyse). Die *Elektrodialyse* der Böden und die spektralanalytische Untersuchung der ausgetauschten Kationen im Elektrodialysat befriedigte am besten, sowohl bei karbonatfreien als auch bei Ca- und Mg-karbonathaltigen Böden.

c) Die austauschbaren *Anionen* lassen sich leicht in den Elektrodialysaten bestimmen.

6. Die *Pufferungskennzahl* charakterisiert das Pufferungsvermögen eines Bodens gegen H- und gegen OH-Ionen, sie wird graphisch aus den Pufferkurven (vgl. Fig. 3, S. 294) ermittelt und gibt an, *wie groß die Pufferung des Bodens in Prozent der « maximalen » Säure- bzw. Basenpufferung* ist. Ein Boden ist gegen Säuren oder gegen Basen « maximal » gepuffert, wenn 10 g Boden durch Zusatz von 25 cm³ n/1 HCl (pH 0) oder n/1 KOH (pH 14) keine wesentliche Änderung erfährt.

7. Bei der *Bestimmung des Gesamthumus* durch die sogenannte nasse Verbrennung mit Bichromat-Schwefelsäuregemisch konnten einige Fehlerquellen ausgeschaltet werden (Aufschlußkolben mit Schliff, sorgfältige, schonende Austreibung der Karbonat CO₂, trockene Nachoxydation der Gase).

8. Zwischen dem pH-Wert der wäßrigen, frischen Bodensuspension und der Gesamtmenge an austauschbaren H-Ionen (H_t) in Mval. je 100 g Boden-TS besteht keine direkte Beziehung. Es zeigte sich aber, daß zwischen der sogenannten *Oberflächenkonzentration* der austauschbaren H-Ionen (H_t : O) (O = aktive Bodenoberfläche in m² bestimmt nach K u r o n) und dem pH-Wert der feindispersen Bodenfraktion ein formulierbarer Zusammenhang besteht (vgl. Formeln S. 303). Je gedrängter die austauschbaren Ionen auf den Oberflächen der Bodenteilchen sitzen, desto energischer versuchen sie von dort abzu-dissoziieren, und desto saurer reagiert die wäßrige Suspension dieses Bodens.

B. Untersuchungen an dolomitischen Gesteinen und subalpinen Bodenprofilen.

1. Von *dolomitischen Gesteinen* der ostalpinen Trias wurden Analysen ausgeführt. Die einseitige Zusammensetzung dieser im Unterengadin verbreiteten Muttergesteine erklärt die Tonarmut sowie die Verbraunungs- und Podsolierungsresistenz der auf ihnen sich entwickelnden Rendzinen. (Man vgl. die Analysenresultate in Tabelle 8, S. 307.)

Tabelle 29.

Zusammensetzung der von uns untersuchten Trias-Dolomite.

| | Gehalte im | |
|----------------------------------------------------------------|------------|---------|
| | Min. | Max. |
| Sesquioxide | 0,54— | 1,16 % |
| SiO ₂ + Silikate (diese in konz. HCl unlöslich) . . | 0,84— | 12,21 % |
| Ca- und Mg-Karbonate | 87,34— | 98,54 % |

2. In der subalpinen Stufe der Schweiz finden sich auf tonerdearmen und karbonatreichen Muttergesteinen die Böden der subalpinen *Rendzinaserie*. Aus dieser Serie wurden zwei Bodenvarietäten eines kennzeichnenden Untertyps genauer untersucht :

Eine mäßig entwickelte Rendzina des Mugeto-Ericetum caricetosum, die wir auch als subalpinen Wald-Humuskarbonatboden und
eine leicht verbrauchte Rendzina des Trisetetum flavescens, die wir auch als subalpinen Weide-Humuskarbonatboden bezeichnen.

- a) Kennzeichnend für die *mäßig entwickelte Rendzina* ist das Vorkommen von Ca- und Mg-Karbonaten bis zur Bodenoberfläche, der hohe Gehalt an koprogenem Mullhumus, geringe Tonbildung und Skelettreichtum. Gegenüber der unentwickelten Rendzina (z. B. des alpinen Caricetum firmae) mit hemorganisch schütterem, koprogenem Arthropoden-Mullhumus (G · 1/U · 2/F · 2a/M · 1b) unterscheidet sie sich durch ihren Gehalt an *hemorganisch innig-vermengtem* koprogenem Mullhumus (G · 1/U · 2/F · 2b/M · 1b), der durch die Tätigkeit der zahlreichen Regenwürmer zustande kommt.

Die mäßig entwickelte Rendzina unterscheidet sich andererseits von den degradierten Rendzina-Varianten (z. B. der moosreichen Bergföhren-Wälder) durch das Fehlen einer mächtigen Rohhumusaufgabe; nur eine *dünne Nadelfall-Rohhumusschicht* bedeckt die *mächtigen koprogenen Mullhumushorizonte*.

- b) Die *leicht verbrauchte Rendzina* der subalpinen Wiesen- und Weideassoziationen ist eine weitere Variante innerhalb der Rendzinaserie. Für das Zustandekommen einer gut ausgebildeten Verbraunung ist aber das Vorhandensein eines tonreicheren Muttergesteins bzw. höherdispersen Feinerdeanteils notwendig.

In Tabelle 30 sind einige Eigenschaften des biogenen Profilanteils der in dieser Arbeit untersuchten Wald- und Weide-Rendzinaprofile einander gegenübergestellt.

Tabelle 30.

Unterschiede im biogenen Profilanteil (Oberboden) zwischen einer mäßig entwickelten und einer leicht verbrauchten Rendzina.

| | Mäßig entwickelte Rendzina | Zunahme | Leicht verbrauchte Rendzina |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------|-----------------------------|
| Muttergestein | Dolomit | — | Dolomit |
| Vegetation | Mugeto-Ericetum caricetosum | — | Trisetetum flavescens |
| Rohhumusaufgabe | schwach bis fehlend | — | fehlend |
| <i>Mullhorizont</i> (rA ₁) | G·1/U·2/F·2b/M·1b—2c | — | G·1/U·2/F·2b/M·1b |
| a) Humusgehalt | stark humos (30 % Humus) | ← | humos (16 % Humus) |
| b) C/N-Verhältnis | weit (30) | ← | eng (8) |
| c) Biologische Aktivität | mäßig (II) | → | groß (III) |
| d) Tone | sehr wenig (5,9 %) | → | wenig (8,3 %) |
| e) SiO ₂ /R ₂ O ₃ - Verhältnis der Tone | klein (1,7) | → | mittel (3,1) |
| f) Basische Kationen (Nährstoffe) | wenig (9 Mval.) | → | mittel (19 Mval.) |
| g) Ca/Mg-Verhältnis | eng (2,8) | → | weit (10,9) |
| h) Sättigungsgrad | mittel (30 %) | → | ziemlich hoch (58 %) |
| i) Gefügeentwicklung | mäßig (II—III) | → | gut (III) |
| k) Luftkapazität | ziemlich hoch (19 %) | ← | mittel (15 %) |
| l) Wasserdurchlässigkeit | hoch (1,3 Min./l) | ← | mittel (36 Min./l) |

3. Auf karbonatarmen oder -freien Muttergesteinen findet sich in der subalpinen Stufe der Schweiz die *Podsolserie*, mit dem Eisenpodsol des subalpinen Nadelwaldes (Rhodoreto-Vaccinietum cembretosum) als reifstes Serienglied. Dieses Bodenprofil zeigt eine mächtige, fasrige, holorganische, verfilzte, saure Rohhumusaufgabe (G·2/U·1/F·1b/M·3b), einen hellgrauen mineralischen Auslauehorizont und einen rotbraunen Sesquioxyd-Anreicherungs-horizont.

Aus der subalpinen Podsolserie wurden zwei Bodenprofile genauer untersucht :

Ein subalpines Humuspodsol des Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum, und

eine subalpine, sekundäre, podsoliierte Braunerde des Nardetum strictae subalpinum, die wir auch als podsoliierten subalpinen Gebirgsweideboden bezeichnen.

- a) Das subalpine *Humuspodsol*, das über der geschlossenen Baumgrenze in den Zwergstrauchheiden (z. B. *Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum*) auftritt, unterscheidet sich vom Eisenpodsol durch seine *feinkörnige bis kolloide, geformte Morhumusauflage* ($G \cdot 2/U \cdot 1-2/F \cdot 1a/M \cdot 1b-2c$) sowie durch die *starke Filtrationsverlagerung saurer Humusstoffe*, wodurch der obere Teil des B-Horizontes schwarz-braun verfärbt wird (B_h -Horizont mit über 10 % Humus). Der dunkle Anreicherungs-horizont saurer Sesquioxid- und Humuskolloide ist extrem *arm an basischen Kationen* (Pflanzennährstoffe).
- b) Die subalpine, *sekundäre, podsolierte Braunerde* ist eine verbraunte Variante innerhalb der subalpinen Podsolserie. Sie tritt z. B. da auf, wo die Alpenrosen-Heidelbeeren-Zwergstrauchgesellschaft von der Borstgrasweide verdrängt wird. Die scharfe Horizontierung des Podsols weicht *diffusen Übergängen*, und die mächtige holorganische *Morhumusauflage ist regressiv abgebaut*. Der biogene Profilanteil besteht aus kolloidem, geformtem, *hemorganischem*, koprogenem Morhumus ($G \cdot 2/U \cdot 2/F \cdot 2b/M \cdot 1b$).

Tabelle 31.

Unterschiede im biogenen Profilanteil (Oberboden) zwischen einem Humuspodsol und einer verbraunten Variante in der subalpinen Podsolserie.

| | Subalpines Humuspodsol | Zunahme | Subalpine, podsolierte sekundäre Braunerde |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|
| Muttergestein | Bündnerschiefer | — | Bündnerschiefer |
| Vegetation | Rhodoreto-Vaccinietum extrasilvaticum . . | — | Nardetum strictae subalpinum |
| Humusauflage | mächtig | — | fehlend |
| Bleicherde | scharf abgegrenzt . . | — | fehlend oder diffus |
| Kolloid-Anreicherungs-horizont | gut abgegrenzt | — | diffus |
| <i>Morhumushorizont</i> | | | |
| (A ₁) | $G \cdot 2/U \cdot 1-2/F \cdot 1a/M \cdot 1b-2c$ | | $G \cdot 2/U \cdot 1/F \cdot 2b-2a/M \cdot 1b$ |
| a) Humusgehalt | holorganisch (77 %) . . | ← | stark humos (30 %) |
| b) C/N-Verhältnis . . . | ziemlich weit (23) . . . | ← | mittel (16) |
| c) Biologische Aktivität | klein (I) | → | groß (III) |
| d) Basische Kationen . . | wenig (7 Mval.) | → | mittel (11,4 Mval.) |
| e) Sättigung | sehr klein (3 %) | → | klein (15%) |
| f) Gefügeentwicklung . . | gering (I—II) | → | mäßig (II) |
| g) Luftkapazität | hoch (29 %) | ← | gering (3%) |
| h) Wasserdurchlässigkeit | | | |
| keit | ziemlich hoch | ← | ziemlich gering |

In Tabelle 31 ist der Oberboden einer solchen sekundären, podsolierten Braunerde dem biogenen Profilanteil eines Humuspodsols gegenübergestellt. Beide Böden haben sich unter gleichen generalklimatischen und petrographischen Verhältnissen entwickelt.

4. Der *Übergang von Wald in Grasflächen* ist oft durch menschliche Eingriffe oder dauernde Durchweidung der Waldbestände bedingt. Hand in Hand mit der Umschichtung der Vegetationsdecke gehen auch *Umwandlungen im Bodenprofil* vor sich; darüber gibt Tabelle 32 eine Zusammenfassung.

Tabelle 32.

Gegenüberstellung der Eigenschaften von subalpinen Weide- und Waldböden.
(Relativ groß = +, relativ klein = —.)

| Weideböden | | Waldböden |
|------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| + | Verbraunungstendenz | — |
| + | C/N-Verhältnis | — |
| + | Biologische Aktivität | — |
| + | Sättigungsgrad | — |
| + | pH-Wert | — |
| + | Tongehalt | — |
| + | SiO ₂ /R ₂ O ₃ -Verhältnis | — |
| — | Luftkapazität | + |
| — | Wasserdurchlässigkeit der Bodenoberfläche | + |
| — | Wasserbindungsvermögen | + |
| — | Humusgehalt | + |
| + | Bodentemperatur | — |