

Zeitschrift: Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft = Bulletin de la Société Botanique Suisse
Herausgeber: Schweizerische Botanische Gesellschaft
Band: 53A (1943)

Artikel: Die Filtrationsverlagerungen hochdispenser Verwitterungsprodukte im Bodenprofil einiger Glieder der schweizerischen Braunerdeserie
Autor: Pallmann, H. / Frei, E. / Hamdi, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-676344>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

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

Die Filtrationsverlagerungen hochdispenser Verwitterungsprodukte im Bodenprofil einiger Glieder der schweizerischen Braunerdeserie.

Von *H. Pallmann, E. Frei* und *H. Hamdi*.

(Agrikulturchemisches Institut der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich.)

Eingegangen am 15. Februar 1943.

A. Einleitung und Begriffsbildung.

1. Die Bodenbildung.

Die Böden sind das Ergebnis komplizierten Zusammenwirkens folgender bodenbildender und in sich wieder vielfältiger Vorgänge :

- a) *Physikalische und chemische Verwitterung* = Dispergierung und Umformung der anorganischen Bodenbildner in Chemismus und Feinbau.
- b) *Humusbildung* = Zerfall, Zersetzung und Humifizierung der Tier- und Pflanzenreste auf und im Verwitterungsprofil. Neubildung mikrobiell synthetisierter, hochmolekularer organischer Stoffe. Komplexbildung oder mechanische Vermengung der Humusstoffe mit anorganischen Verwitterungsprodukten.
- c) *Verlagerung* der chemisch mannigfaltigen, polydispersen und verschiedenförmigen Verwitterungsprodukte im und auf dem Bodenprofil.

Diese drei Vorgangsgruppen wirken nebeneinander, sie beeinflussen sich gegenseitig. Erst ihr Zusammenwirken macht die eigentliche Bodenbildung aus, die durch das Klima, durch die Hydrologie des Standortes, durch das Muttergestein und die Vegetation gesteuert wird. Das Gewicht der drei unterschiedenen Vorgangsgruppen bei der Bildung eines bestimmten Bodens wechselt mit dessen Entwicklungsstadium und mit dem jeweiligen Bodentypus.

2. Die Verlagerungsprozesse.

Nachstehend sollen besonders die Verlagerungsprozesse erörtert werden. Zahlreich sind die Verlagerungsmöglichkeiten des Bodenmaterials in und auf dem Verwitterungsprofil. Man kann schematisierend folgende 3 Verlagerungsarten unterscheiden :

- a) *Mechanische Bodenschichtenverlagerung* (vom Profilort weg)
 - a) totale mech. B.V. durch Wind, Wasser, Eis, Kriechschutt;
 - β) auslesende mech. B.V. durch Wind und Wasser.
- b) *Mechanische Bodenschichtenmischung* (am Profilort selbst)
 - a) totale mech. B.M. zum Beispiel durch Ackerung, Fräsen;
 - β) auslesende mech. B.M. durch Wühltiere (Würmer, Mäuse usw.).
- c) *Filtrationsverlagerung*
 - a) aktive F.V. (die Wanderphase bewegt sich selbst);
 - β) passive F.V. (die Wanderphase wird bewegt).

Die mechanische Bodenschichtenverlagerung ist bodenkundlich von großer Bedeutung. Ganze Bodenschichten werden mechanisch durch bewegte Luft, fließendes Wasser, vorrückendes Eis oder kriechenden Schutt vom Verwitterungsprofil abgetragen und an andern Orten neu aufgeschüttet. Die Amputation zahlreicher Hang- oder Überflutungsböden wie auch die Aufschüttung der verlagerten Produkte am neuen Absatzort verzögern vielfach die Reifung der betroffenen Bodenprofile. Sie erhalten neue Eigenschaften, die durch die Änderung in der Profilmächtigkeit, im Feinerde- und Skelettgehalt, im pH-Wert, im Gefüge usw. bedingt sind.

Die auslesende mechanische Bodenschichtenverlagerung zeigt sich bei den Feinerde- und Humusausspülungen auf Hangböden, zahlreiche scheinbare Roh-Skelettböden der Alpen sind darauf zurückzuführen. Das Studium der sogenannten Bodenerosion wird heute eifrig gepflegt.

Die mechanische Bodenschichtenmischung durch die Arbeitsgeräte des Landwirtes oder durch die Bodenwühltiere hemmt ebenfalls die Reifung und die Degradation humider Bodentypen. Sie verzögert die Auslaugung und Versauerung durch die ständige Hebung tieferer, an Basen höher gesättigter Bodenschichten. Sie beeinflusst stark das Wasser- und Gasregime des Bodens und fördert die Umwandlung der Humusbildner in stabilere Humusstoffe und Humus-Mineralerde-Komplexe. Für das Bodengefüge ist sie von stärkstem Einfluß.

Für das Zustandekommen der sogenannten Klimabodentypen und deren Varianten ist unter den drei erwähnten Verlagerungsarten die sogenannte Filtrationsverlagerung die wichtigste. Ihr Studium ist vornehmlich dem Kolloidchemiker vorbehalten, der in Gemeinschaftsarbeit mit dem Röntgenologen die Wanderphasen bestimmt und deren Peptisation und Koagulation im Verwitterungsprofil untersucht.

3. Die Filtrationsverlagerung.

Die Filtrationsverlagerung hochdispenser Verwitterungsprodukte (Ionen, ängströmdisperse Molekel, Kolloide usw.) setzt ein für diese *Wanderphasen* durchlässiges *Bodenfilter* voraus. Die Wanderphase muß höherdispers als die Filterporen des Bodengerüsts sein. Die Filtrationswanderung ist stets an die Gegenwart flüssigen Wassers gebunden.

a) Systematik.

Bei der Diskussion der Filtrationsverlagerungen unterscheidet man vorteilhaft folgende Fälle :

I. Aktive, allseitig gerichtete Filtrationsverlagerung (AFV).

« Die Wanderphase bewegt sich selbst » (thermische Bewegung).

a) *AFV ängströmdisperser Wanderphasen (Ionen, Molekel).*

*) *Diffusion der Gegenionen* (Schwarmionen) in den Grenzflächen ruhender Bodenteilchen, z. B. Nachlieferung basischer Kationen aus den innenzugänglichen Teilchenkernen an die Außenoberflächen im Umtausch gegen H-Ionen oder z. B. Diffusion der Koagulatorionen Ca, Mg von den Grenzflächen des Adsorbens auf die daran haftenden, immobilisierten Wanderphasen im Umtausch gegen H-Ionen oder Na- und K-Ionen.

**) *Freie Diffusion* der Ionen und Molekel in stagnierender oder bewegter Bodenlösung, z. B. Wegdiffusion von Gerbstoffen, organischen Säuren bei Humifizierung, Diffusion gelöster Salze zu Pflanzenwurzeln, Diffusion gelöster Bikarbonate usw.

β) *AFV kolloid- und mitteldisperser Wanderphasen* (Humusstoffe, Humussäuren, Sesquioxide, Sesquioxid-Humuskomplexe, Eisen-gerbstoffkomplexe, $\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O}_3$ -Komplexe, Kieselsäureultramikronen, Humus-Mineral-Komplexe usw.).

*) *Diffusion* kolloider Wanderphasen an den Grenzflächen der Innen- und Außendispersitäten der Bodengerüstteilchen. Z. B. Diffusion von Sesquioxidultramikronen in Kieselsäuregelen usw.

**) *Freie Diffusion* der kolloiden Wanderphasen in stagnierender oder langsam zirkulierender Bodenlösung. Z. B. Diffusion der Eisen-Gerbstoff-Komplexe bei der Marmorierung saurer Böden. (Vgl. Abschnitt C 4.)

II. Passive, allseitig oder einseitig gerichtete Filtrationsverlagerung (PFV).

« Die Wanderphase wird bewegt. »

a) *PFV ängströmdisperser Wanderphasen (Ionen, Molekel)*

mit zirkulierender Bodenlösung. Versickerung, seitliche Verschiebung, Hub im Verdunstungsstrom. Z. B. Auslaugung humider Böden, Anreicherung löslicher Salze im Oberprofil arider Böden usw.

β) *PFV kolloid- und mitteldisperser Wanderphasen* (vgl. sub I).

Meist einseitig gerichtete PFV mit zirkulierender Bodenlösung.
Z. B. Tonverlagerung in mäßig entwickelten Braunerden. (Vgl. Abschn. C 1.)
Z. B. Tonverlagerung in podsoligen Braunerden. (Vgl. Abschnitt C 2.)
Z. B. Sesquioxid-Humusverlagerung bei Podsolierung. (Vgl. Abschnitt C 3.)
Z. B. Sesquioxid- SiO_2 -Verlagerung in Roterde, Laterit.

b) Die dispersoidchemischen Voraussetzungen der Filtrationsverlagerungen.

I. Jede im Verwitterungsprofil ablaufende Filtrationsverlagerung ist an die Gegenwart flüssigen Wassers gebunden.

II. Die Filtrationswege des Bodenfilters müssen für die Wanderphasen durchlässig sein.

In feinkörnigen Böden ist die FV unter vergleichbaren Bedingungen gehemmt als in grobkörnigen, so finden sich z. B. gestauchte Podsolprofile mit schärfster Horizontausbildung auf feinkörnigen sauren Moränenlehmen, wogegen tiefgründige Podsolprofile — sog. A₂-Varianten — mit unscharfer Horizontabgrenzung auf grobsandigem Verrucanodetritus vorkommen.

In sehr groben Bodenfiltern wandern die Wanderphasen oft ins Grund- oder Hangwasser aus.

Die sterischen Hemmungen der FV erhöhen sich bei gleicher Körnung mit zunehmender Packungsdichte der Bodenfilter. In gesackten und verschlammungsbereiten podsolierten Braunerden ist die einseitig gerichtete Podsolierungsverlagerung gehindert, es überwiegen die zur sog. Marmorierung führenden allseitigen Diffusionsverlagerungen. (Vgl. Abschnitt C 4.)

III. Die Wanderphase muß feinerdispers als das Bodenfilter sein.

Die Dispersität der Wanderphasen hängt weitgehend von ihrem *Chemismus* (z. B. ängströmdisperses Ca-Bikarbonat, kolloiddisperser Montmorillonit-Ton usw.) und von den chemisch-physikalischen Bedingungen der Bodenlösung ab (z. B. pH-Wert, Koagulator- und Peptisatorgehalt, Ionenkonzentration usw.).

Durch starke *Hydratation* und *elektrische Aufladung* werden die kolloid- bis mitteldispersen Wanderphasen stabilisiert. Diese Stabilisierung des hochdispersen Zustandes wird bei den im Verwitterungsprofil vorkommenden Wanderphasen mit der Konzentration ihrer ionogenen Oberflächenorte und mit der Hydrophilie der Grenzflächen (= Summe der ionogenen und nichtionogenen Grenzflächenorte) gesteigert. Das wenig veränderte Lignin schwach humifizierter Pflanzenreste besitzt z. B. wenig ionogene Oberflächenorte, es ist zudem nur schwach hydratisiert: seine Dispergierbereitschaft ist daher klein; die oxydierten Lignine (Lignohuminsäuren) erhalten durch den Zuwachs an hydrophilen, dissoziierbaren Karboxylgruppen eine beträchtliche Steigerung ihrer Peptisationsbereitschaft.

Bei der Diskussion der Filtrationsverlagerung unterscheidet man vorteilhaft zwischen den eigentlichen betrachteten *Wanderphasen* und ihren, den hochdispersen Zustand erhaltenden *Stabilisatoren*. Der Stabilisator kann *ängströmdispers* sein:

- *) niedrigwertige, hydratisierte *Gegenionen*, z. B. bei Tonen, Kieselsäure, Humusstoffen usw.
- ***) hydrophile, ionogene *Molekel*, z. B. Gerbstoffe, die in saurer Lösung das Eisenhydroxyd komplex schützen.

In zahlreichen Fällen ist der Stabilisator selber *kolloiddispers*, er macht nur einen relativ kleinen Massenanteil der gesamten Wanderphase aus und wird in diesem Fall als *Schutzkolloid* bezeichnet. So schützen z. B. relativ kleine Mengen hochdisperser Humusstoffe größere Mengen kolloider Sesquioxide bei der Bildung der Eisenpodsole; geringe Mengen kolloider Kieselsäure, bzw. kieselsäurereicher SiO₂-R₂O₃-Teilchen schützen größere Tonteilchen in den karbonathaltigen unentwickelten Braunerden.

Azidoide Wanderphasen, wie Tone, Humusstoffe, Kieselsäure, kieselsäurereiche SiO₂-R₂O₃-Komplexe usw. werden durch niedrigwertige und stark hydratisierte Kationen bei hinreichender Solverdünnung und durch Hydroxyionen dispergiert und stabilisiert. In elektrolytarmen Bodenlösun-

gen vermag bei genügender Solverdünnung bereits das H-Ion der Umtauschgarnituren (Gegenion) solche Azidoide hochdispers zu halten.

Basoide Wanderphasen, wie $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, sesquioxidreiche R_2O_3 - SiO_2 -Komplexe, Proteine und proteinreiche Humusteilchen werden vornehmlich durch Wasserstoffionen dispergiert und stabilisiert. Niedrigwertige Anionen stärkerer Hydratation vermögen bei hinreichender Solverdünnung diese Basoide ebenfalls zu dispergieren.

Die *Stabilisierungs-* bzw. *Koagulationsbedingungen* sind im Einzelfall sehr kompliziert. So zeigt die *Burtonsche* Regel beispielsweise eine solche Komplizierung durch die Feststellung, daß mit steigender Solkonzentration die Flockungswerte einwertiger Ionen *abnehmen* (das System wird koagulationsempfindlicher), daß die Flockungswerte mehrwertiger Ionen mit steigender Solkonzentration *zunehmen* (das System wird koagulationsunempfindlicher), daß schließlich bei zweiwertigen Ionen eine geringere Abhängigkeit der Flockungswerte von der Solkonzentration besteht. Diese komplizierenden Einflüsse sind besonders im Gebiete größerer Solverdünnungen ausgeprägt. Diese Regeln müssen bei den künftigen Untersuchungen über die Filtrationsverlagerungen und Anreicherungen der Wanderphasen genauer untersucht werden. In zahlreichen Eluvialhorizonten der Böden dürften sehr verdünnte Solkonzentrationen vorkommen, in den Anreicherungs- und Anreicherungshorizonten werden vielerorts dagegen hohe Solkonzentrationen vorherrschen.

IV. Die Wanderphasen und deren Stabilisatoren dürfen mit den Grenzflächen der Bodenfilter keine schwerlöslichen Verbindungen oder Sorptionskomplexe bilden.

Aus sauren Oberhorizonten tiefenwärts verlagerte Tone schlagen sich z. B. in den tiefern Horizonten größerer Erdalkalitionen-Sättigung an den Filterkörnern nieder. Sie nehmen im Kontakt durch Ionenumtausch selbst Erdalkalitionen in ihre Adsorptionsgarnituren auf und binden ihrerseits wieder neue einwandernde Wanderphasen an sich. (Vgl. Abschnitt C 2.)

Solche Wechselreaktionen führen zu einer Immobilisierung der Wanderphasen und schließlich zur Bildung ausgesprochener Anreicherungs- und Anreicherungshorizonte.

B. Die Braunerdeserie der Schweiz.

1. Die Braunerdeserie.

In einem klimatisch und petrographisch einheitlichen, ferner geomorphologisch ausgeglichenen Gebiet tendieren Bodenbildung und Vegetationsentwicklung bei Ausschluß störender Eingriffe des Menschen schließlich zu einem kennzeichnenden reifen Bodentypus, dem eine bestimmte Pflanzengesellschaft zugehört. Es stellt sich theoretisch ein scheinbares Gleichgewicht zwischen Klima, Muttergestein, Boden und Vegetation ein. Diese theoretische Einheitlichkeit eines größeren Gebietes ist nur selten verwirklicht, da die Bodenbildung durch die lokalen Abweichungen vom Generalklima, durch das wechselnde Relief der Landesoberfläche, durch die Verschiedenheiten im Chemismus und im Gefüge der Gesteine, durch die variable Hydrologie wie auch durch die vielen antropogenen Einwirkungen sehr stark beeinflußt wird. Neben dem reifen Bodentypus finden sich in mehr oder weniger starker Streuung zahlreiche Bodenuntertypen und Bodenformen mit gemeinsamer Ent-

wicklungstendenz, die alle zu einer sogenannten *genetischen Bodenserie* zusammengefaßt werden.

Innerhalb der genetischen Bodenserie lassen sich neben dem reifen namengebenden Bodentypus einerseits *unentwickelte* (= unreife), andererseits *gealterte* (= degradierte) Serienglieder unterscheiden.

Im Gebiet des *feucht temperierten Laubwaldklimas* der Schweiz findet sich vornehmlich auf den mannigfachen *sedimentären Mischgesteinen* die *Braunerdeserie*. Diese Mischgesteine umfassen: jüngere Alluvionen, Moränen, Terrassenschotter, Deckenschotter, Molassesandsteine, Molassemergel und Molassenagelfluh; im voralpinen Gebiet gesellen sich ferner die Flyschgesteine dazu. Diese Muttergesteine zeichnen sich mehrheitlich durch ihre reiche Mischung verschiedenster Mineralien aus, sie weisen einen ziemlich ausgeglichenen Mischchemismus auf. Ihr mittlerer Gehalt an säurepuffernden und koagulierenden Erdalkalibicarbonaten schwankt häufig zwischen 15—40 %. In selteneren Einzelfällen kommen allerdings stärkere Abweichungen gegenüber dem erwähnten Mittelchemismus vor: kalkreiche Mergel und quarzsandige Sedimente bilden die Extreme.

Das Gefüge dieser Mischgesteine wechselt je nach Sedimenttypus sehr stark. Die Wasserdurchlässigkeit ist daher sehr stark verschieden, und mit ihr ändert sich die Leichtigkeit der Wasserbewegung im Filter des Verwitterungsprofils. Diese Beweglichkeit des unter humiden Klimaten tiefenwärts gerichteten Wasserstromes steigt in nachstehender Reihenfolge:

- Grundmoränen,
- Molassemergel, Molassenagelfluh, Flyschmergel, Hanglehme,
- Molassesandsteine, Moränen (exklusive Grundmoränen),
- Deckenschotter,
- Terrassenschotter, junge, grobdisperse Alluvionen.

Die *Braunerdeserie* umfaßt eine große Zahl von *Seriengliedern*. Unter Vermeidung einer zu detaillierten Gliederung lassen sich folgende Entwicklungsglieder feststellen:

Tabelle 1.

Einige kennzeichnende Serienglieder der schweizerischen Braunerdeserie.

1. Rohböden	↓ Reifung	↑ ¹ Tonbildung	↑ Zunahme der Sättigung	↓ Krümelung	↑ pH alkalisch
2. Schwach entwickelte Braunerden					
3. Mäßig entwickelte Braunerden					
4. <i>Reife Braunerde</i>					
5. Schwach podsolige Braunerden	↓ Degradation	↓ Tonabbau		↓ Dispergierung	↓ pH sauer
6. Podsolierte Braunerden					
7. Marmorierte degrad. Braunerden					

¹ Gleiches Muttergestein vorausgesetzt.

Die reifern Glieder entwickeln sich im Verlaufe der Zeit stets aus den unreifern. Diese *Entwicklung* kann *stetig* erfolgen, d. h. ein bestimmtes Entwicklungsglied entwickelt sich aus dem in der Sukzessionsreihe unmittelbar davorstehenden, oder es überspringt einige der in Tabelle 1 verzeichneten Stadien. Diese scheinbar *diskontinuierliche Sukzession* ist besonders auf grobkörnigen und kalkärmern Muttergesteinen häufig. Die Rückläufigkeit der Bodenentwicklung, von reifern Stadien zu unreifern (= Regression) ist oft zu beobachten, sie erfolgt z. B. bei starken Änderungen in der Vegetation, durch erosive Verlagerungen der Bodenschichten usw.

2. Die reife Braunerde.

Die reife Braunerde ist der namensgebende Typus der Braunerdeserie. Aus den im Gelände studierten und im Laboratorium untersuchten Braunerdeprofilen wird das Idealprofil der reifen Braunerde abstrahiert. Es kann folgendermaßen gekennzeichnet werden :

- a) Das *sedimentäre Muttergestein* zeigt mittlere Karbonatgehalte. Seine mittelfeine Körnung bedingt eine gebremste Wasserbeweglichkeit.
- b) Die *verschiedenen Bodenhorizonte* des Braunerdeprofils sind nicht scharf gegeneinander abgegrenzt, es bestehen diffuse Übergänge.
- c) Die *Oberhorizonte* sind bereits *karbonatfrei*, die Bodenteilchen weisen aber eine noch ziemlich hohe Sättigung (%-Anteil basischer Kationen an Gesamt-Umtauschgarnitur) auf. Die Reaktion ist neutral bis schwach sauer (pH 7 bis 5,5).
- d) Die *Humusstoffe* (3—15 %) sind größtenteils innig mit der mineralischen Feinerde gemengt. Diese Mischung ist vorwiegend das Werk der tätigen Bodenfauna. Mullhumus.
- e) *Humusstoffe, Tone und Humus-Mineral-Komplexe* sind dank genügender Gehalte an zweiwertigen Kationen (Ca, Mg) in den Umtauschgarnituren *gekrümmelt*.
- f) Sowohl die *spezifische* als auch die *integrale* gegenseitige *Bindefestigkeit der Krümelkomponenten* sind ziemlich hoch. Die Krümel sind stabil.
- g) Meistens entspricht die *Bodenart* der Oberhorizonte dem *lehmigen Ton*, bzw. dem *tonigen Lehm*. Die Bodenfilter sind von Hause aus (Primärgefüge) relativ dicht.
- h) *Erdalkalikarbonate* und damit neutrale bis *alkalische Reaktion* treten erst im tiefern Mittelboden und im Unterboden auf.
- i) Eine *aktive Filtrationsverlagerung* kolloiddisperser Wanderphasen tritt im typischen Braunerdeprofil *nicht auf*. Die primär hochdispersen Phasen sind koaguliert. Sie werden im Profil nur passiv durch die Bodenwühltiere allseitig verlagert. Die *intensive zoogene*

C. Die Filtrationsverlagerungen hochdisperser Wanderphasen in den Profilen einiger Glieder der schweizerischen Braunerdeserie.

1. Die Tonverlagerung in mäßig entwickelten Braunerden auf Nieder- und Hochterrassenschottern.

Auf den Nieder- und Hochterrassenschottern zeigen sich morphologisch auffällige Varianten mäßig entwickelter (unreifer) Braunerden. Im karbonathaltigen, hochgesättigten und alkalisch reagierenden Profil sticht unter dem graubraunen Mullhorizont bA_1 ein rostrot gefärbter und verdichteter bB_T -Horizont hervor. Diese Böden werden nach H. H o f e r¹ im Rafzerfeld als Rotkies oder Rohpolis bezeichnet. Die Profilbetrachtung läßt auf eine stärkere Sesquioxyd- und Tonverlagerung schließen. Diese Verlagerung ist theoretisch interessant, da die hohe Koagulatorkonzentration der Bodenlösung (Ca u. Mg) und die alkalische Reaktion besondere Stabilisatoren für die Wanderphasen voraussetzen.

Die kolloidchemische Analyse dieser Profile zeigt folgende Ergebnisse :

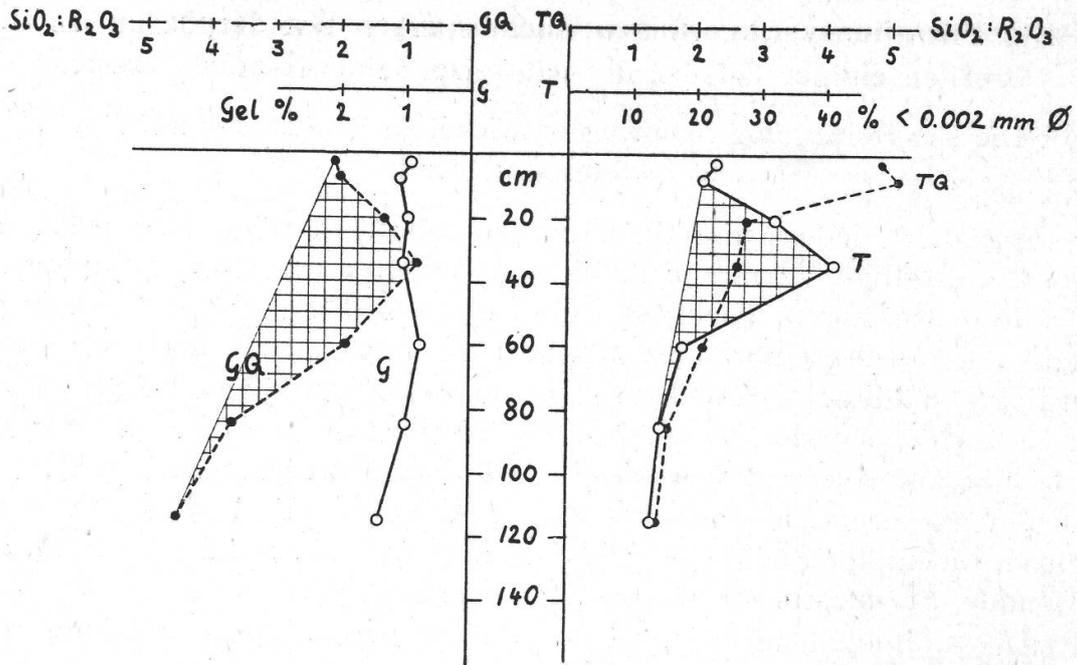
- a) Es sind vornehmlich die Tonfraktionen « kleiner als 0,002 mm \varnothing » aus dem bA_1 -Horizont tiefenwärts verlagert und in bB_T angereichert worden.
- b) Das molekulare SiO_2/R_2O_3 -Verhältnis dieser Tonfraktion beträgt in bA_1 um 4,5 bis 6, gegen die untern Horizonte nimmt es stetig ab (in bB 2 bis 3 und in bC gegen 1,4).
- c) Eine eigentliche Anreicherung von Sesquioxiden ist in bB deutlich vorhanden.
- d) Die *dispergierbaren Gele*² amorphen Feinbaus finden sich in allen Horizonten in ungefähr gleicher Menge. Dieser Befund steht in quantitativer Übereinstimmung mit den Beobachtungen von K. L u n d b l a d³ an schwedischen Braunerden. Eine Anreicherung dieser dispergierbaren Gele (= Allophan-Tone) fand im bB -Horizont *nicht* statt.
- e) Auffallend ist der Verlauf der $SiO_2 : R_2O_3$ -Quotienten dieser dispergierbaren Gele mit der Profiltiefe. In bA_1 liegen die Werte um 2 bis 2,4, sie erreichen im Tonanreicherungshorizont bB_T das Minimum (0,82—1,40) und steigen hierauf auf die höchsten Werte im Unterboden bC an (4,5 bis 5,3).

In den Figuren 1 und 2 ist der übereinstimmende Verlauf der Verlagerungsprozesse zweier analoger Profile dargestellt.

¹ H. H o f e r : Mitt. der Geogr.-Ethnogr. Ges. Zürich, Bd. XXXX, 1939/1941, spez. S. 31 f.

² Dispergierbare Gele bestimmt nach der Oxalatmethode von O. T a m m (Oxalatlösung von pH 4,4). Medd. från stat. skogsförs. 19, 385—404 (1922).

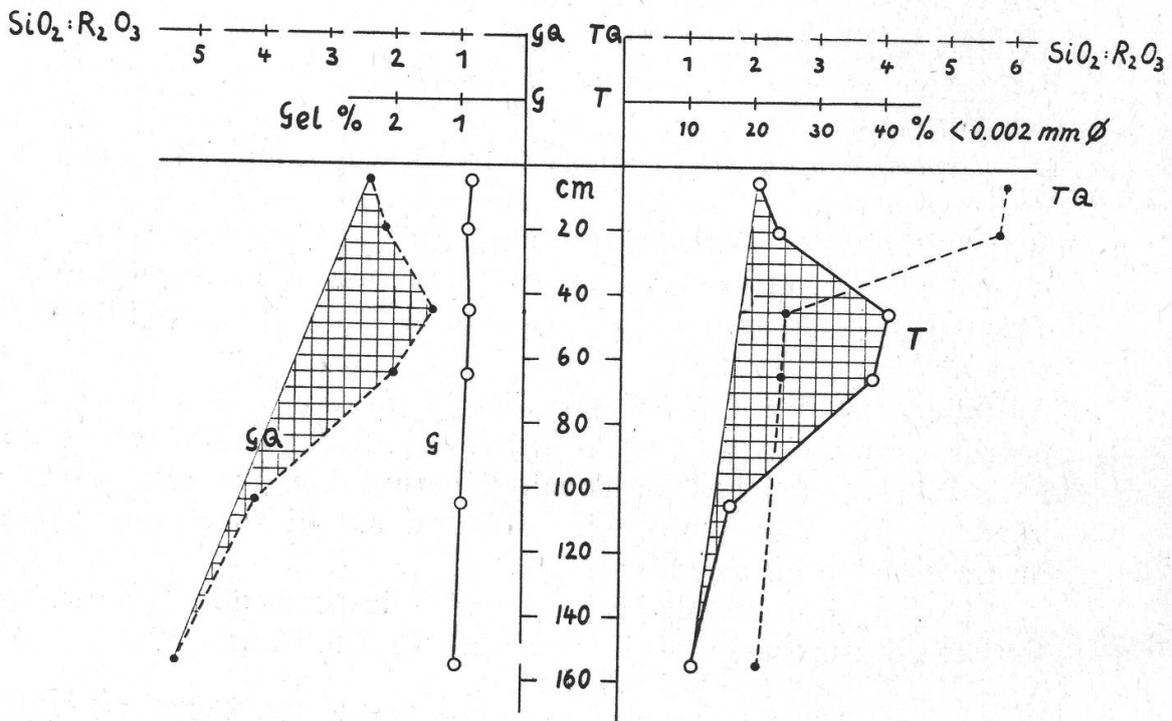
³ K. L u n d b l a d : Soil Sc. 37, 137—155 (1934).



Figur 1.

Die Tonverlagerung und die Gehalte an dispergierbaren Gelen im Profil Eglsau.

- T = Tonfraktion « kleiner als 0,002 mm Ø ».
- G = Dispergierbare Gele.
- TQ = $\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$ -Quotient der Tonfraktion.
- GQ = $\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$ -Quotient der dispergierbaren Gele.



Figur 2.

Die Tonverlagerung und die Gehalte an dispergierbaren Gelen im Profil Roßberg/Kemptthal.

(T, G, TQ und GQ siehe Legende Figur 1.)

- f) Die auffallende *Rostfärbung des bB_T-Horizontes* ist nicht auf eine zusätzliche Mehranreicherung an Sesquioxiden bzw. Fe(OH)₃ zurückzuführen, sondern auf ein höheres Fe₂O₃ : SiO₂-Verhältnis der die Tone umhüllenden dispergierbaren Gele.
- g) Die Filtrationsverlagerung der Tone im alkalischen und CaCO₃-haltigen Profil führen wir auf eine Schutzwirkung kieselsäurereicher Allophan-Hüllen zurück. Die kolloide Kieselsäure und die Gele hoher SiO₂ : R₂O₃-Quotienten werden bei alkalischen Reaktionen und hinreichender Solverdünnung selbst bei Gegenwart des Ca-Ions nicht koaguliert und übertragen ihre Flockungsempfindlichkeit dem umhüllten und dadurch stabilisierten Tonpartikeln. Im bB-Horizont wird die Schutzhülle partiell entkieselt und damit isoelektrisch geflockt. Die Schutzwirkung geht ihr damit verloren: die ehemals stabilisierte Wanderphase koaguliert und reichert sich an.
- h) Die starke Tonverlagerung in mäßig entwickelten Braunerden auf durchlässigen Terrassenschottern ist einerseits auf die stabilisierende Wirkung kieselsäurereicher SiO₂-R₂O₃-Komplexe, andererseits auf die primär durchlässigen Bodenfilter zurückzuführen. Die bei der Verwitterung im Oberhorizont einsetzende Tonbildung liefert die Wanderphasen, die zunehmend gegen die Tiefe verfrachtet werden und allmählich eine Abdichtung und damit gesteigerte Absiebwirkung der bB-Horizonte verursachen.

2. Die Tonverlagerung in schwach podsoligen Braunerden auf Nieder- und Hochterrassenschottern.

Auf durchlässigen Terrassenschottern finden sich unter azidiphilen Subassoziationen des Eichen-Hagebuchen-Waldes oder unter Fichtenbeständen oft podsolige Braunerden: stärkere Versauerung der Ober- und Mittelhorizonte, beginnende Rohhumusbildung an Stelle des Mulls, schwache Anbleichung in bA₂, häufig rostige Verfärbung in bB. Beginn der Karbonatreaktion meist unterhalb 80 cm ab Oberfläche. In den Anfangsstadien, aber auch bei vorgeschrittener Podsolierung der Braunerden finden sich auf primär durchlässigen Verwitterungsprofilen Bodenvarianten sehr großer Verschlammungsbereitschaft.

- a) Im geschlossenen Eichen-Hagebuchen-Wald (azidiphile Subassoziation) zeigen die Oberhorizonte trotz ihrer Versauerung eine Krümelung. Die Krümel sind aber « unecht », sie zerfallen im Wasser leicht in ihre Einzelkomponenten. Dieser leichte Zerfall ist auf die starke Entbasung der Umtauschgarnituren zurückzuführen, es fehlen den Krümelbausteinen die mehrwertigen, bindefesten Ionenbrücken.

- b) Bei ausreichender Verdünnung in Wasser sind die sauren Tonteilchen elektrisch negativ geladen, sie weisen elektrokinetische Potentiale von mehr als 50 Millivolt auf. Durch die Steigerung der Solkonzentration wird die elektrolytische Dissoziation der Tonazidoide kleiner, die elektrokinetischen Potentiale fallen und mit ihnen die elektrostatischen Abstoßungskräfte zwischen den benachbarten Tonteilchen. Bei genügender Tonkonzentration, z. B. im Weich-Gel, sind diese gegenseitigen Abstoßungskräfte der Tonmikronen sehr klein, die Tonteilchen vereinigen sich zu labilen Krümeln, die aber bei starker Wässerung leicht wieder dispergieren. Messungen von H. Freundlich¹, R. Bradfield², H. Pallmann³ bestimmten diese Abnahmen der Teilchenpotentiale bzw. der Ton-Dissoziation mit steigender Solkonzentration.
- c) Bei stärkerer Lichtung des Kronendaches werden die unechten Krümel durch den direkt auf den Boden aufprallenden Regen zer schlagen, und die im elektrolytarmen Regenwasser zerteilten H-Tonteilchen dissoziieren. Es entstehen dadurch elektrostatische Abstoßungskräfte zwischen den einzelnen Tonteilchen, die eine sofortige Wiedervereinigung zu größeren Aggregaten (Krümeln) verhindert.
- d) Mit dem einsickernden Wasser filtrieren die durch H-Ionen stabilisierten Tonteilchen in das Bodenfilter ein. Der Boden verschlämmt. Die sauren Oberflächen der Oberhorizonte hindern die Filtrationsverlagerung nicht. Erst in den an Erdalkaliionen etwas höher gesättigten Grenzflächen der Mittelhorizonte finden sich genügende Koagulatoren oder Brückenionen, die die Wanderphase mit der Filterkornoberfläche verkuppeln. Durch Ionenumtausch erhält nun selbst das immobilisierte Tonteilchen vom Bodenfilter

Tabelle 4.

Tonverlagerung in schwach podsoliger Braunerde (Hardwald-Basel, Querceto-Carpinetum, Schotter).

Tiefe der Probenahme	ph-Wert	Tongehalt	Farbe
bA ₁ /A ₁ 0— 10 cm . . .	5,4	26,8 %	grau-braun
bA ₂ /A ₂ 15— 20 cm . . .	5,6	23,6 %	schwach rostig
bBT/B 55— 60 cm . . .	5,9	42,8 %	rostfarben
bBC 105—110 cm . . .	6,3	5,0 %	hellrostig
bC 150—160 cm . . .	7,3	3,2 %	frischfarbener Schotter

¹H. Freundlich, O. Schmidt und G. Lindau: Kolloidchem. Beih. 36 (78) 1932.

²R. Bradfield: Journ. of physical. Chem. 28 (170—175) 1924.

³H. Pallmann: Kolloidchem. Beih. 30 (353 f) 1930.

zweiwertige Koagulatorionen und vermittelt diese wiederum dem weitem angelagerten Tonteilchen. Der bB-Horizont wird abgedichtet, das Filter wird verengt, und die Solkonzentration bzw. Gelkonzentration an Ton wird stark erhöht, wodurch automatisch eine weitere Rückdrängung der zur Dispergierung führenden Teilchendissoziation einsetzt.

3. Sesquioxyd- und Humusverlagerung in podsolierten Braunerden.

Die stark versauerten podsolierten Braunerden bilden den Übergang zum eigentlichen Podsolboden, der im schweizerischen Mittelland nicht zur Reife gelangt. Das reife Podsol ist in der Schweiz in bester Entwicklung in der kühlhumiden subalpinen Nadelwaldstufe, es findet sich dort in weiter Verbreitung auf karbonatärmeren bzw. karbonatfreien Muttergesteinen.

In der podsolierten Braunerde sind im Unterschied zum Podsol die Bleicherdehorizonte nur fleckig und weniger gebleicht ausgebildet (A_2/bA_2), die Anreicherungshorizonte sind oft diffuser gegen A_2/bA_2 abgegrenzt und weniger sesquioxydreich (B/bB). Der Tonabbau ist bedeutend schwächer. Die sauren Humushorizonte (A_0 u. A_1) liegen noch oft über degradierten Mullresten.

Die podsolierten Braunerden finden sich auf Terrassenschottern, Deckenschottern, Moränen, Molassesandsteinen, auf tertiärer Nagelfluh. Unter vergleichbaren Bedingungen entstehen sie um so leichter, je karbonatärmer die Unterlage und je durchlässiger das Muttergestein. Sie kommen häufig unter den standortsfremden reinen Fichtenbeständen vor, aber auch unter den Eichen-Birken-Wäldern. Im azidiphilen Laubwald bilden sich allerdings oft wenig mächtige Rohhumushorizonte aus.

Der *eigentliche Podsolierungsmechanismus* ist derselbe wie beim subalpinen Podsol, man vergleiche hierzu die Untersuchungen von H. Pallmann, A. Schmuziger und A. Hasler¹.

Die Podsolierung ist an die vollständige Entkarbonatisierung und Versauerung des Bodenfilters und an die Gegenwart hochdispenser hydrophiler Oxysäuren (Humusstoffe, Gerbstoffe usw.) gebunden. Die Filterpackung muß locker genug sein, damit die Bodenlösung tiefenwärts zirkulieren kann. Die Sesquioxyde bilden die Wanderphasen, als Stabilisatoren dienen vorzugsweise kolloide und niedrigmolekulare Oxysäuren (Humusstoffe, Gerbstoffe usw.). Die Anreicherung im B/bB-Horizont erfolgt durch isoelektrische Flockung oder bei Gegenwart höher gesättigter Bodenteilchen durch gewöhnliche Elektrolyt-koagulation.

¹ H. Pallmann, A. Schmuziger und A. Hasler: Bodenkunde und Pfl.-Ernährg. Bd. 9/10, 94—122 (1938).

4. Sesquioxidverlagerung und Filterdichtung in marmorierten Böden. Gleiartige Böden.

G. K r a u ß¹ prägte erstmals den Begriff der *gleiartigen* Böden und distanzierte sie treffend von den im dauernd stagnierenden und stark reduzierenden Grundwasser gebildeten Glei Böden. W. L a a t s c h² untersuchte den Entstehungsmechanismus dieser gleiartigen Böden und benennt eine wichtige Variante derselben wegen der typisch adrigen und bandförmigen Verfärbung des Bodenanschnittes als « *marmorierte, gleiartige* » Böden.

Nach unsern bisherigen Untersuchungen bilden sie sich im schweizerischen Braunerdegebiet — in Analogie zu den deutschen Vorkommen — im stark verschlammten oder von Hause aus dicht gelagerten sauren, schwach podsoligen bis podsolierten Boden. Man vergleiche hierzu die ausgezeichneten Beobachtungen von G. K r a u ß³ und Mitarbeitern. In der podsoligen Braunerde stellen sich bei der Marmorierung häufig Anklänge an die sogenannte Gleipodsole ein.

Innerhalb der Braunerdeserie finden sich diese stark degradierten, biologisch untätigen und hinsichtlich ihres Nährstoffgehaltes recht ungünstigen marmorierten Böden vorwiegend unter den reinen, standortsfremden Fichtenbeständen, besonders ausgeprägt an Orten früherer landwirtschaftlicher Zwischennutzung (Beispiele: Willisau, Langenthal usw.). Die Fichten zeigen hier ihre flachsten Wurzelteller und ihre größte Empfindlichkeit gegen Wind und Rotfäule. Die marmorierten Böden sind ferner in den schwach podsoligen Braunerden (rostfarbene Waldböden) des azidiphilen Eichen-Hagebuchen-Waldes vorhanden, wo durch die stattgehabte Tonverlagerung (vgl. Abschnitt C 2) eine wasserundurchlässige Schicht gebildet wurde.

Wie G. K r a u ß und W. L a a t s c h betonen, ist die Marmorierung ein Zeichen jahreszeitlich starker Wechsel zwischen starker Bodennässe und extremer Austrocknung. Die durch die Verwitterung im Bodengerüst freigelegten Eisenhydroxyde oder lockern $\text{Fe}(\text{OH})_3\text{-SiO}_2$ -Komplexe werden im durchnässten sauren Boden durch Oxysäuren (Gerbstoffe und hochdisperse Lignohuminsäuren) dispergiert und diffusionsbereit. Die Peptisatoren entstammen (exklusive H-Ionen) zur Hauptsache den in Humifizierung begriffenen Eichenwurzeln oder den im Profil eingelagerten Humusstoffen. Die Bleichung des verrosteten bB-B-Horizontes beginnt in deren nähern Umgebung. Das dispergierte $\text{Fe}(\text{OH})_3$ diffundiert

¹ G. K r a u ß: Jahresber. Dtsch. Forstverein 1928; ders. und F. H ä r t e l: Thar. Forstl. Jb. 81, 131 (1930).

² W. L a a t s c h: Forstl. Centralbl. 59, 237 (1937); ders.: Dynamik der dtsh. Acker- und Waldböden. Verlag von Th. Steinkopff, Dresden 1938, spez. S. 231 f.

³ G. K r a u ß, K. M ü l l e r, D. G ä r t n e r und F. H ä r t e l: Beiträge zur reg. Standortskunde. Heft 8. Verlag von P. Parey, Berlin 1939, S. 483—715.

als hochdispenser Oxysäurenkomplex im stagnierenden Bodenwasser allseitig ins Profil. Diese Wegdiffusion führt zur adrigen, bändrigen oder allgemein fleckigen Verbleichung der ursprünglich gelbrostigen oder rostigen Horizonte. Die diffundierenden Oxysäure-Komplexe des kolloiden Eisenhydroxyds werden bei der Austrocknung des Profils in den Schwundrissen des entquellenden, feindispersen Bodenfilters niedergeschlagen. In Fällen extremer Marmorierung treten grießige, dunkelbraune Konkretionen gealterten Eisenhydroxydes auf, die, dichter gepackt, bei erneuter Durchnässung des Profils nurmehr schwer von den peptisierenden Oxysäuren angegriffen werden.

Die Marmorierung schwach podsoliger Böden ist von dem eigentlichen Podsolierungsvorgang begrifflich zu unterscheiden: bei der Marmorierung bilden sich keine Anreicherungshorizonte, da die Filtrationsverlagerung nicht einseitig, sondern allseitig gerichtet ist, weil das abgedichtete Bodenfilter keine deutliche tiefenwärts gerichtete Zirkulation der Bodenlösung zuläßt.

Als Beispiel der Bildung eines solchen marmorierten Bodens sei ein Profil aus dem Hardwald bei Basel angeführt. Auf Niederterrassenschotter bildete sich unter dem azidiphilen Eichen-Hagebuchen-Wald eine schwach podsolige Braunerde mit sehr flacher Sauerhumusaufgabe auf degradiertem Mull. Im durchlässigen Schotterboden wanderten die sauren Tonfraktionen zum Teil gegen die untern Horizonte aus (vgl. Abschnitt C 2), ein anderer Teil wurde oberflächlich gegen die flachen Geländemulden verlagert. Die Tone bilden in diesen Senken an sekundärer Lagerstätte eine Aufschüttungsschicht von 80—150 cm Mächtigkeit. Diese den Muldenrändern entstammenden Tone (= auslesende mechanische Verlagerung) bilden über dem lockern und magern Niederterrassenschotter eine für Wasser schwer durchlässige Bodenschicht. Die meteorischen Wässer stagnieren besonders im Frühjahr und im

Tabelle 5.

Marmorierter schwach podsoliger Braunerdeboden (Hardwald-Basel, Niederterrasse).

Tiefe der Probe	pH	Tongehalt	Bemerkungen.
0— 10 cm	4,8	77 %	grau-gelb, keine Marmorierung, flache Rohhumusschicht
20— 30 cm	4,6	80 %	gelblich mit mäßiger Marmorierung, keine Konkretionen
50— 60 cm	4,4	77 %	starke Marmorierung und Konkretionsbildung
70— 80 cm	4,8	76 %	starke Marmorierung und Konkretionsbildung
110—120 cm	7,2	36 %	bBC-Horizont des primären schwach pods. Braunerdebodens

Herbst längere Zeit in diesen verschlammten Filtern. Im Hochsommer trocknen diese Tongel-Schichten aus, wobei ein mehr oder weniger starkes Schwinden eintreten kann. Die Marmorierung ist hier dank genügender Oxysäuren sehr ausgeprägt, die Sesquioxyde lagern sich in dunklen, grießigen Konkretionen in den Schwundrissen ab.

Extreme Marmorierung findet sich beispielsweise in den sauren Böden des Moosrains bei Langenthal (Bern), wo auf Flächen früherer Laubwälder mit starker Eichenbeimischung in den Jahren 1891—1893 landwirtschaftliche Zwischennutzung das lockere Bodengefüge zerstörte. Der damaligen Auffassung entsprechend, wurde ein reiner Fichtenbestand begründet. Heute zeigt der Boden vollkommene Einzelkornstruktur und extreme Verdichtung. Unter einer 5—10 cm mächtigen Rohhumusschicht schließt sich in scharfer Grenze der marmorierte, deutlich geflammte Mineralboden an, dessen pH-Werte in der Oberkrume zwischen 3,6 bis 4,1 betragen und noch in 180 cm Tiefe nicht über 5 herausreichen. Die Degradation des Bodens erfolgte unter dem reinen standortsfremden Fichtenbestand außerordentlich rasch.

D. Zusammenfassung.

Im Gebiet der schweizerischen Braunerdeserie, die vorwiegend auf sedimentären Mischgesteinen variabler Wasserdurchlässigkeit und Entkalkungsbereitschaft gebildet wird, spielen die verschiedenen Filtrationsverlagerungen hochdispenser Verwitterungsprodukte für das Zustandekommen wesentlicher Bodenserienglieder eine große Rolle. Im nachstehenden werden die oben diskutierten Filtrationsverlagerungen einander tabellarisch gegenübergestellt.

Tabelle 6.

Tonverlagerung in mäßig entwickelten Braunerden auf Terrassenschottern.
(Abschnitt C 1.)

- | | |
|--|---|
| 1. <i>Bodenfilter</i> : | Alkalisch reagierend, karbonathaltig. |
| 2. <i>Filtrationsverlagerung</i> : | Einseitig, tiefenwärts gerichtete Verlagerung im versickernden Bodenwasser. |
| 3. <i>Wanderphase</i> : | Vorwiegend Tone. |
| 4. <i>Stabilisator</i> : | Kolloide Kieselsäure und kieselsäurereiche $\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O}_3$ -Komplexe. |
| 5. <i>Immobilisierung und Anreicherung</i> : | Isoelektrische Flockung der partiell entkieselten Stabilisatoren und mechanischer Absiebeffekt. |

Tabelle 7.

Tonverlagerung in schwach podsoligen Braunerden auf Terrassenschottern.
(Abschnitt C 2.)

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. <i>Bodenfilter</i> : | Sauer reagierend, elektrolytarm. |
| 2. <i>Filtrationsverlagerung</i> : | Einseitig, tiefenwärts gerichtete Verlagerung im versickernden Bodenwasser. |

- | | |
|--|--|
| 3. <i>Wanderphase</i> : | Peripher oder weitgehend entbaste Tone (H-Ton). |
| 4. <i>Stabilisator</i> : | Wasserstoffionen der Ton-Umtauschgarnituren (= hohes elektrokinet. Potential der hinreichend im elektrolytarmen Bodenwasser zerteilten Tonsäuren). |
| 5. <i>Immobilisierung und Anreicherung</i> : | Wechselwirkung der Tonsäuren mit gesättigteren Grenzflächen der Bodenteilchen in bB. Elektrolytkoagulation und mech. Siebeffekt. |

Tabelle 8.

Sesquioxidverlagerung in podsoligen Braunerden. (Abschnitt C 3.)

- | | |
|--|--|
| 1. <i>Bodenfilter</i> : | Sauer reagierend, elektrolytarm. |
| 2. <i>Filtrationsverlagerung</i> : | Einseitig, tiefenwärts gerichtete Verlagerung mit versickerndem Bodenwasser. |
| 3. <i>Wanderphase</i> : | Sesquioxide und sesquioxidreiche $\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O}_3$ -Komplexe. |
| 4. <i>Stabilisator</i> : | Hochdisperse, hydrophile Oxysäuren (Gerbstoffe, Lignohuminsäuren) und proteinreichere Humusstoffe. |
| 5. <i>Immobilisierung und Anreicherung</i> : | Isoelektrische Koagulation bei erhöhtem pH (über 4,5 meistens) oder gewöhnliche Elektrolytkoagulation in basenreichern Horizonten. |

Tabelle 9.

Sesquioxidverlagerung und Filterdichtung in marmorierten gleichartigen Böden. (Abschnitt C 4.)

Primär : Filterdichtung vgl. Tab. 7.

Sekundär : Marmorierung.

- | | |
|--|---|
| 1. <i>Bodenfilter</i> : | Sauer reagierend, elektrolytarm. Dichtgelagert mit gehemmter Wasserzirkulation. Wechsel von Bodenässe und Trockenheit. |
| 2. <i>Filtrationsverlagerung</i> : | Allseitig gerichtete, kurzstreckige Verlagerung durch Diffusion der Wanderphase im stagnierenden Bodenwasser. |
| 3. <i>Wanderphase</i> : | Fe(OH)_3 , in stärker podsolierten Br. auch Al(OH)_3 und sesquioxidreiche $\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O}_3$ -Komplexe. |
| 4. <i>Stabilisator</i> : | Oxysäuren, vorwiegend Gerbstoffe und hochdisperse, hydrophile Lignohuminsäuren. Ev. hochdisperse, hydrophile Humuskomplexe. |
| 5. <i>Immobilisierung und Anreicherung</i> : | Irreversible Alterung der getrockneten Eisen-Oxysäurekomplexe zu konkretionären, kompakteren, dispergierungsträgen Trockengelen. Keine Anreicherungs horizonte, Konkretionen in Schwundrissen des Filtergels. |

Die hier diskutierten Filtrationsverlagerungen müssen noch weiter eingehend studiert werden. Die Stabilisatoren sind genauer zu untersuchen. Der Mechanismus der Verlagerung und der Anreicherung ist durch eingehende und im Gang befindliche kolloidchemische Untersuchungen abzuklären.