

# Mikromorphologie und Genese von Böden auf den Niederterrassen des Niederrheingebietes und der Kölner Bucht

SIEGFRIED STEPHAN \*)

Soil development, Holocene, micromorphology, lower Rhine valley

**Kurzfassung:** Verschieden alte, datierte Böden auf den Niederterrassen des Rheins werden mikromorphologisch charakterisiert und ausgewählte Merkmale dem Bodenalter gegenübergestellt. Klare Beziehungen zum Alter zeigen Entkalkung und Tonwanderung. Bereits in der Gruppe der 1800jährigen Böden wird eine Entwicklung sichtbar. Ab 6000 Jahren kommen Parabraunerden vor. Stark entwickelt sind die Böden auf präholozänen Sedimenten. Die Bodenentwicklung in situ wird vom Wechselspiel aus Bodenentwicklung und -abtrag im Liefergebiet der Sedimente mitbestimmt. Die im Liefergebiet begonnene Silicatverwitterung läuft in der Aue weiter, während die Horizontdifferenzierung durch Tonverlagerung nach dem Transport in der Aue neu beginnt. Die Böden aus präholozänen Sedimenten können kurzstreckig verlagertes Material von Bt-Horizonten eemzeitlicher Böden enthalten. Die systematische Stellung der Böden wird diskutiert. Die Bedeutung der Tonwanderung zwischen Sandkörnern wird anhand verdichteter Böden des Versuchsgutes Wahn dargestellt.

## [Micromorphology and development of soils on the lower terraces of the lower Rhine area and the basin of Cologne]

**Abstract:** Dated soils of different age from the lower Rhine terrace are characterized by micromorphology, and selected features are set against the soil age. There are clear relations between soil forming advancement and decalcification as well as clay migration. Some development is already visible in the 1800 year old soils. After 6000 years, Parabraunerden (Orthic Luvisols) appear. Soils on Preholocene sediments are strongly developed Parabraunerden, often suffered by Fe-Mn redistribution. The weathering of silicates started in regions where the material has been eroded, and continues in the alluvium; however, the formation of soil horizons by clay migration makes a new start after sedimentation. The soils formed from Preholocene sediments seem to contain material from Bt horizons of nearby Eem-age soils. Soil systematics is discussed. The importance of clay migration in sandy layers is demonstrated with compacted soils of the experimental farm Wahn near Bonn.

## Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Material und Methoden
- 2.1 Benennung der Bodentypen
- 2.2 Präparation
- 2.3 Mikromorphologische Merkmale und Bewertungsstufen
- 3 Mikromorphologie ausgewählter Profile
- 3.1 Seit dem Mittelalter entwickelte Böden
- 3.2 Seit der Römerzeit entwickelte Böden
- 3.3 Böden mit Entwicklungsbeginn nach dem Atlantikum
- 3.4 Böden mit Entwicklungsbeginn im Boreal oder Atlantikum
- 3.5 Seit Beginn des Holozäns oder länger entwickelte Böden
- 4 Beziehungen einzelner Merkmale zum Bodenalter
- 4.1 Körnung
- 4.2 Kalkgehalt
- 4.3 Tonwanderung
- 4.4 Zusammenfassung altersabhängiger Daten
- 5 Alter, Entwicklung und systematische Stellung der Böden auf den Niederterrassen des Niederrheins und der Kölner Bucht
- 6 Schnelle Tonverlagerung in Ackerböden
- 7 Schriftenverzeichnis

## 1 Einleitung

Die Niederterrassen des Rheines wurden im Weichsel-Glazial angelegt und in Spätweichsel und Holozän von schluffreichen Sedimenten bedeckt. Sie verbreitern sich bei Bonn von 4 auf ca. 12 km, nördlich von Köln weiter auf ca 17 km und treten nördlich von Krefeld 25 km breit in die Niederrheinische Tiefebene ein (KLOSTERMANN 1988: Abb.16). Im Niederrheingebiet und in der Kölner Bucht haben sich im spätpleistozänen Decksediment und im Hochflutlehm der Niederterrassen über einem sandig-kiesigen Schotterkörper Böden mit guter Basenversorgung entwickelt. Als deren dominante Typen wurden bei der bodenkundlichen Landesaufnahme Braunerden und vor allem Parabraunerden festgestellt (z. B. MÜCKENHAUSEN & WORTMANN 1958, PAAS 1961, SCHNEIDER 1983, HEIDE 1988: Abb.26). Die dominierenden Parabraunerden sind mit anderen Böden vergesellschaftet, und zwar stromwärts mit jün-

\*) Anschrift des Verfassers: Dr. S. STEPHAN, Institut für Bodenkunde der Universität, Nußallee 13, 53115 Bonn

geren und zum Rand der Aue hin mit älteren Gliedern derselben Entwicklungsreihe, aber auch mit Kolluvium, Gley und Niedermoor. Die letzteren werden in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt.

Dem Konzept der rezenten Parabraunerde-Bildung stellte KOPP (1964) die Vorstellung eines synsedimentär durchschlämmten Bodens mit einem eigenen Bodentyp Altvega entgegen, hatte allerdings zur Prüfung dieser Hypothese nur wenige, ausschließlich typologisch geordnete Profile zur Verfügung. HANNA (1966) untersuchte anschließend Bodencatenen von den Niederterrassen bei Bonn und zeigte, daß die im dominanten Boden sichtbare Durchschlämmung der terrestrischen Entwicklungsphase zuzurechnen ist; er bezeichnet diesen Boden aber ebenfalls als (Durchschlämmte) Altvega, weil Al-Horizonte fehlen und HANNA die Fähigkeit des Auenlehmes, nach Entkalkung unmittelbar Tondurchschlämmung zu entwickeln, als wichtigen Unterschied zur Parabraunerde wertete. Eine genauere Untersuchung der pedogenetischen Abläufe erforderte die Zuordnung der Böden der Niederterrassen zu Entwicklungsdauer bzw. Bodenalter. Für eine solche Stratigraphie der Böden auf den Niederterrassen bietet jedoch die Bodenentwicklung allein keine ausreichende Grundlage, weil sie durch Unterschiede in Sediment und Tiefe des Grundwasserspiegels mitbestimmt wird.

BRUNNACKER (1978) ermittelte das Alter dieser Böden nach erdgeschichtlichen, geomorphologischen und archäologischen Kriterien im Kontext einer Karte. Es handelt sich um das Alter der ungestörten terrestrischen Entwicklung, dessen Zählung mit dem Ende der regelmäßigen Überflutung und Sedimentzufuhr beginnt. Auf Grund dieser Datierung war es möglich, die Böden der Niederterrassen ihrem Alter zuzuordnen, was auf Anregung ZAKOSEKS von SCHRÖDER (1979) durchgeführt wurde. SCHRÖDER findet eine enge Korrelation zwischen Bodenalter und Intensität der pedogen bedingten Merkmale. Die entsprechenden statistischen Analysen wurden später noch verfeinert (SCHOLZ & SCHRÖDER & ZAKOSEK 1983).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Bestandsaufnahme der mikroskopischen Merkmale und ihre Zuordnung zur Bodenentwicklung. Nach Möglichkeit wird dabei die Bodenbildung in der Aue von der bereits im Liefergebiet der Sedimente vollzogenen Entwicklung abgegrenzt; denn zwischen ererbten Merkmalen und der örtlichen Bodenentwicklung ist zu unterscheiden (DUCHAUFOR 1976: 18).

In den Niederlanden wurden die Böden der Niederterrassen insbesondere durch MIEDEMA (1987) untersucht, der grundlegende Unterschiede zwischen

den Böden auf spätpleistozänen und auf holozänen Sedimenten aufgezeigt und dabei die Mikromorphologie besonders berücksichtigt hat. Er rechnet den spät-weichselzeitlichen Hochflutlehm oder Hochflutsand („Deposit III“, lehmiger Sand bis toniger Lehm, Übergang von der wilden zur mäandrierenden Flußdynamik) zu Bölling, Älterer *Dryas* und Alleröd, in Rinnen zur Jüngeren *Dryas*. Diese Sedimente tragen stark verwitterte Böden mit mikroskopisch sichtbarer Veränderung der primären Silicate. Die holozäne Sedimentation beginnt dort nach einer Lücke erst mit dem Subboreal und wird dann zunehmend stärker. Die Böden auf diesem jungen Sediment haben frische Körner, von denen 20-30 % keine Quarzkörner sind, und sie lassen Toneinwaschung vermissen. Aus ca. 2000 Jahre alten Sedimenten sind sie kalkfrei, aus ca. 500 Jahre alten Sedimenten aber kalkhaltig. Es ist anzumerken, daß im spätpleistozänen Sediment aus umgelagerten Paläoböden stammende Verwitterungsmerkmale eine Rolle spielen.

Von den Niederlanden aus rheinaufwärts ändern sich Sedimente und hydrologische Verhältnisse; insbesondere treten bei stärkerem Gefälle gröbere Bodenarten auf. Hier findet man auch frühholozäne Sedimente, deren Böden verbreitet Tonverlagerung zeigen.

In Sedimenten von Rhein und Neckar im nördlichen Oberrheingraben (WOLLERSEN 1982) haben hochstehendes Grundwasser und trockeneres Klima selbst im frühestholozänen Hochflutlehm eine Bodenentwicklung bis zur Tonverlagerung verhindert; wohl hat sich spätweichselzeitliches Material bis zur Pseudogley-Parabraunerde entwickelt. Böden aus der Zeitspanne von 2000 bis 8500 Jahre sind überdies in diesem Untersuchungsbereich nicht vertreten. Als klimabedingte Besonderheit dieses warm-trockenen Gebietes kommt hier reliktsch der Graue Tschernosem vor (vgl. ZAKOSEK 1991).

Die vergleichenden Untersuchungen an Auenböden des Niederrheinischen Tieflandes und der Kölner Bucht auf Grundlage der im Gelände durch Herrn BRUNNACKER bestätigten Datierung wurden von Herrn ZAKOSEK angeregt, dessen kompetenten Rat auch der Autor der vorliegenden Seiten in Anspruch nehmen durfte, wofür hier der Dank abgestattet sei. Interessante Begehungen fanden mit den Herren ZAKOSEK, SCHRÖDER, WIECHMANN und den holländischen Kollegen PONS und MIEDEMA statt. Die sorgfältige Präparation besorgte Herr KOLVENBACH. Ihnen allen sei hiermit gedankt.

Die Mitteilung über Böden aus dem Versuchsgut Wahn soll zugleich an den verstorbenen Bodenkundler der Landwirtschaftskammer Rheinland, Hans MERBITZ, erinnern.

## 2 Material und Methoden

Den von ZAKOSEK, BRUNNACKER und SCHRÖDER ausgewählten Leitprofilen der unterschiedlichen Altersstufen wurden über 160 ungestörte Proben für die Mikromorphologie entnommen. Die meisten Proben sind den von SCHRÖDER entnommenen Laborproben zugeordnet, da der Autor dieses Beitrages bereits für die Arbeit von SCHRÖDER (1979) die mikromorphologischen Daten bereitgestellt hatte.

### 2.1 Benennung der Bodentypen

Die behandelten Böden werden nach ARBEITSKREIS BODENSYSTEMATIK (1985), der Kartieranleitung (AG BODENKUNDE 1982) und unter Berücksichtigung der pedogenetischen Besonderheit der entkalkten Böden ohne Tonverlagerung folgendermaßen benannt:

Der holozäne Hochflutlehm als Ausgangsmaterial der autochthonen Bodenbildung hat einen M- oder C-Horizont, je nach der Kombination von Korngröße und Humusgehalt.

#### Auenpararendzina (Kalkpaternia):

Ah-C-(G-)Profil in Auenlage, Ah+aC über 80 cm, 2-75% Carbonat im Ausgangssediment. Für Eigenschaften und Weiterentwicklung ist zu beachten, daß der C-Horizont meist vorverwittertes Material abgetragener Bodenhorizonte enthält.

#### Braunauenboden (Allochthone Vega):

Ah-M-(G-)Profil, Ah+M über 80 cm, ohne makroskopisch sichtbare pedogenetische Veränderung. Der M-Horizont hat mindestens 0,9 Gew.% verlagerte organische Substanz und ist in unserem Fall anfangs carbonathaltig.

Die hier untersuchten Auenlehme befinden sich im Grenzbereich der Definition von M- und C-Horizont. Dies kann schon innerhalb eines Profiles wechseln (vgl. SCHRÖDER 1979: Abb.9 und 19). Entsprechend ist die Zuweisung der jungen Böden zur Allochthonen Vega einerseits oder Auenpararendzina andererseits oft nicht exakt möglich. Der Humusgehalt liegt aber häufiger unter der für M-Horizonte vorgegebenen Grenze, so daß wir mit SCHRÖDER (1979) generell Auenpararendzinen annehmen.

#### Auenbraunerde (Autochthone Vega)

Dieser Boden entsteht nach ARBEITSKREIS BODENSYSTEMATIK (1985) durch Bildung eines B-Horizontes aus dem oberen Teil eines C- oder M-Horizontes, wobei der Arbeitskreis einen Bv annimmt. Der B-Horizont ist aber durch Entkalkung aus dem C- bzw. M-Hori-

zont hervorgegangen, und die autochthone Silicatverwitterung ist zunächst zweifellos zu gering, um den Boden zusätzlich zur Vorverwitterung erkennbar zu prägen. Deshalb verwenden wir das Suffix v zur Horizontbezeichnung B nicht. Die Auenbraunerde hat die Horizontfolge Ah-B-C-(G) oder Ah-B-M-(G), und der unvergleyte Bodenteil ist über 80 cm mächtig. Die Verwendung von B statt Bv und die Vorsilbe "Auen" erlauben die notwendige Unterscheidung von den silicatverwitterten Braunerden und werden daher auch benutzt, wenn das Milieu (z.B. durch Eindeichung) inzwischen rein terrestrisch geworden ist.

#### Braunerde:

Die Braunerde sensu strictu bildet sich nach der Entkalkung aus einem Material mit geringer Vorverwitterung und entsprechend wesentlich langsamer. Sie ist zur Zeit nicht vorhanden.

#### Parabraunerde:

Die Parabraunerde, die als dominanter Bodentyp auf den Niederterrassen kartiert wurde, entwickelt sich aus der Auenbraunerde bei langdauernder, fast ausschließlich terrestrischer Bodenentwicklung über die Subtypen Auenbraunerde-Parabraunerde und Parabraunerde-Auenbraunerde. Sie kann auch aus der Braunerde s. str. entstanden sein.

Die in der Kartieranleitung (ARBEITSKREIS BODENSYSTEMATIK 1985) vorgeschlagene Auenparabraunerde ist allein aus der Lage in der Aue, nicht aber pedogenetisch begründet und wird für die im Gebiet beobachteten durchschlammten Böden nicht verwendet, da deren terrestrische Genese sicher ist.

#### Pseudogley:

Diese Endstufe der Entwicklung wird selten erreicht, doch bei den älteren Böden herrschen Pseudogley-Parabraunerden vor. Bei deren Ausweisung ist darauf zu achten, daß allochthone Oxidkonkretionen den Sedimenten zugehören können.

### 2.2 Präparation

Vor der mikroskopischen Untersuchung war die sorgfältige Entnahme und Präparation der Proben durchzuführen. Sie wurden ohne Gefügestörung luftgetrocknet, mit Vestopal imprägniert, zu Schliffen von 20 µm Dicke und 35-40 cm<sup>2</sup> Fläche verarbeitet und mit dem Polarisationsmikroskop untersucht (ALTEMÜLLER 1974).

### 2.3 Mikromorphologische Merkmale und Bewertungsstufen

Die Fassung der Merkmale und ihrer Bewertung wurden auf die vorgesehene pedogenetische Interpretation abgestimmt. Die Bewertungsstufen sind in Tab.1 zusammengestellt, werden nachfolgend kurz erläutert und teils durch Mikrofotos veranschaulicht. Soweit ein klarer Zusammenhang mit dem Bodenalter besteht, steigen die Werte mit der Bodenentwicklung an.

Die **Lockerheit** bezieht sich bei Lehm auf die erkennbare Porosität und bei tonhaltigem Sand auf die bei vierzigfacher Vergrößerung sichtbare Verkittung der Körner.

**Poren** (Menge und Art) kennzeichnen das Mesgefüge.

**Risse** (Menge und Art) sind eher durch das Material als durch den Grad der Bodenentwicklung bedingt. Ihre Ausbildung erfolgt durch Schrumpfung. Glatte Risse entstehen bei hinreichendem Tongehalt (Quellungsdruck), seltener auch durch Tonverlagerung (Stufe 3). Plattiges Gefüge von Al-Horizonten zeigt rauhwandige Risse (Stufe 2 teilweise).

**Schichtung** geht im Solum des Auenlehms i. a. während der Bodenentwicklung durch Bioturbation verloren. Makroskopisch sichtbare Schichten zeigen sich mikroskopisch häufig nur als Flecken (Stufe 4). Pedogene Bildungen wie Kalkkrusten sind keine Schichten.

**Grobkalk** umfaßt Kalkkristalle, Kalkschalen und allochthone Konkretionen. Da der Kalkgehalt im Solum in der Regel im Laufe der Pedogenese abnimmt, die Werte aber bei den pedogenetisch relevanten Merkmalen mit fortschreitender Bodenentwicklung ansteigen sollten, steigen die Werte von kalkreich (1) bis kalkfrei (3) an.

**Feinkalk**, als Durchsetzung des Bodens mit sehr kleinen, zwischen Polarisatoren weißen Körnchen mikroskopisch sehr auffällig, kann sedimentär, grundwasserabhängig oder pedogen sein. Während in rezenten Böden aus jungen Weichsellössen das Carbonat eine zuverlässig entwicklungsbedingte Merkmalsgruppe darstellt, ist dies in den Auenböden vor allem wegen des Grundwassereinflusses nicht der Fall. Hier laufen die Werte von kalkreich (1) bis kalkfrei (4).

**Kalkkonzentration:** In die Tabelle wurde nur die Menge, nicht die Form des konzentrierten Kalkes aufgenommen.

**Tondomänen** (doppelbrechende): Die glimmerbürtigen Tonminerale liegen, bevor sie zusammenfließen, meist als Domänen von Fein- bis Mittel-

schluff-Größe vor und zeigen bei starker Vergrößerung Doppelbrechung. Sie sind gelblich, bräunlich oder rötlich. Ihr Anteil ist im Sediment sehr unterschiedlich, er nimmt durch Tonbildung aus Glimmer zu und durch Zusammenfließen zugunsten der Fließton-Differenzierungen ab. Die Tondomänen selbst sind als Maß der Bodenentwicklung ungeeignet, bilden aber die Vorstufe der Fließton-Differenzierungen, die ihrerseits eng mit der Bodenentwicklung verknüpft sind.

**Tonorientierung** (in der Matrix): Stufenfolge von gelegentlicher Ausrichtung oder Anreicherung doppelbrechender Tonpartikel bis zu starken Streßkutanen (Toneinregelungen an Scherflächen im Aggregatinneren, die sich zwischen Polarisatoren als dünne, teils zu mehreren parallele, helle Linien im Dünnschliff zeigen). Hinzu kommt die pedogenetisch wichtige Stufe 6, die angibt, daß viele Bruchstücke von Fließtonbelägen in die Matrix eingearbeitet wurden (Taf. 1 Fig. 5: Pfeile).

**Tonporen** (Bezugsporen für die Tonbeläge; Taf. 1 Fig. 2-4) beschreiben den Porenraum zur Zeit der Tonverlagerung. Der Prozeß der Feinton-Verlagerung hängt von mehreren Faktoren ab, insbesondere von der Art des Porenraumes (STEPHAN 1981). Während der Fließton im Lehm sehr langsam und nur bei mäßig saurer Bodenreaktion zu den Leitbahnen wandert, ist er zwischen Sandkörnern ohne weiteres beweglich. Daher geben Proben mit vielen Tonbelägen in Sandlücken (Stufen 5 und 6) **keinen** Hinweis auf das Bodenalter.

**Tonbeläge** (Porenwände mit Tonbelägen) und **Belagdicke** (Dicke der Tonbeläge) (Taf. 1 Fig. 2-4): Doppelbrechende Tonbeläge auf Porenwänden sind die einzigen zuverlässigen Spuren der Tonverlagerung. Das Produkt aus dem Anteil der Porenwände mit Tonbelägen an der Gesamtheit der Porenwände („Tonbeläge“) und der Belagdicke ist ein Maß für die Intensität der Tonverlagerung.

**Eisenkonzentration** (Taf. 1 Fig. 6 und Taf. 2 Fig. 6): Bewertet wird die autochthone, pedogene Anreicherung. Dominieren allochthone Konkretionen, dann werden nur diese erwähnt, und zwar als Stufe 6.

**Bleichung** (Taf. 1 Fig. 6) ist ein stärkeres Merkmal für die Eisenumverteilung, weil man sie erst bemerkt, wenn aus bestimmten Zonen schon sehr viel Eisen abgeführt wurde.

Allerödzeitliche **Bimstuff-Derivate** erscheinen in einigen Dünnschliffen als gelförmige Verwitterungsprodukte (vgl. GEBHARD & HUGENROTH & MEYER 1969), wurden aber nicht in die Tabellen aufgenommen.

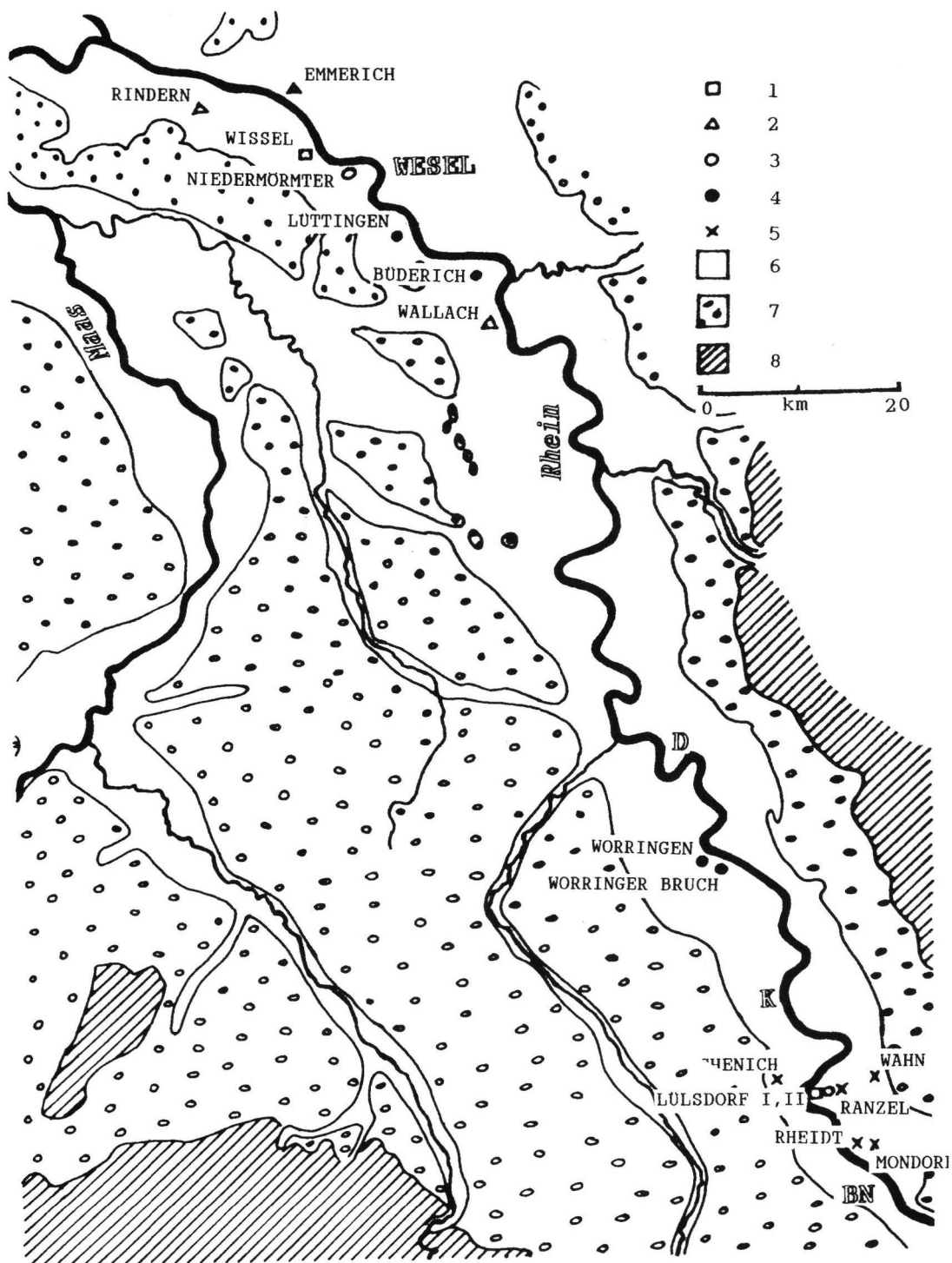


Abb.1: Lage der untersuchten Profile

1 seit dem Mittelalter, 2 seit der Römerzeit, 3 nach dem Atlantikum, 4 ab Boreal oder Atlantikum, 5 seit Beginn des Holozäns oder länger entwickelte Böden, 6 Niederterrassen, 7 übriges Quartär, 8 Präquartär.

Karte nach ZONNEVELD & QUITZOW aus SCHRÖDER (1979), verändert.

### 3 Mikromorphologie ausgewählter Profile

Die Bodenprofile, deren Lage in Abb. 1 dargestellt ist, wurden nach der zeitlichen Gliederung durch BRUNNACKER (1978) ausgewählt und haben etwa folgendes Alter (pg pseudovergleyt):

#### Holozän

500 Jahre	LÜLSDORF I, WISSEL,	Auenpararendzina Auenpararendzina
1800 Jahre	EMMERICH,  WALLACH,  RINDERN,	Auenpararendzina, schwach pg Auenpararendzina, sehr schwach pg Auenbraunerde, schwach pg
3000 Jahre	NIEDERMÖRMTER,	Auenbraunerde, schwach entwickelt, sehr schwach pg
4000 Jahre ?	LÜLSDORF II,	Parabraunerde-Auen- braunerde, sehr schwach pg
6000 Jahre	LÜTTINGEN, WORRINGER BRUCH,	Auenbraunerde Parabraunerde- Auenbraunerde
8000 Jahre	BÜDERICH,  WORRINGEN,	Parabraunerde- Auenbraunerde Parabraunerde
10000 Jahre	RANZEL,	Parabraunerde, sehr schwach pg
<b>Spätpleistozän</b>		
11000 Jahre	MESCHENICH, MONDORF	Parabraunerde Parabraunerde bis Pseudogley- Parabraunerde
	RHEIDT	Parabraunerde
13000 Jahre	WAHN	Parabraunerde

Die meisten Profile wurden von SCHRÖDER (1979) beschrieben und systematisch eingestuft. Der vorliegende Text behandelt die Mikromorphologie und Genese dieser Böden. Tab. 2 gibt die Schätzwerte für die wichtigsten mikromorphologischen Merkmale wieder. Römische Zahlen unterscheiden verschiedene Böden gleichen Ortsnamens (nur bei LÜLSDORF), a und b unterscheiden eng benachbarte Parallelprofile.

#### 3.1 Seit dem Mittelalter entwickelte Böden

Diese jungen Profile zeigen, wie sich die Sediment-Inhomogenitäten mikromorphologisch auswirken, bevor eine stärkere Überprägung durch die Bodenbildung stattgefunden hat.

#### LÜLSDORF I

Auenpararendzina aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5107 Brühl, PQ 69/34, innendeichs unmittelbar am Rhein-deich.

Das feinsubstanzarme Material (Taf. 2 Fig. 1) ist schwach kohärent bis krümelig. Carbonat erscheint unterschiedlich stark und ist nur schwach konzentriert. Die Matrix ist reich an ererbten doppelbrechenden Tondomänen, die fleckweise unvermittelt fehlen und nicht zusammenfließen.

#### WISSEL

Auenpararendzina aus Hochflutlehm, TK 25 Bl.4203 Kalkar PQ 69/34. Dichteres, feineres Sediment mit angedeuteter Schichtung im Untergrund. Wenig Kalk im Oberboden. Die reichlichen Tondomänen sind gelegentlich fleckweise eingeregelt. In der Tiefe starke Eisenanreicherungen und Bleichflecken durch Grundwassereinfluß.

Tab.1: Mikromorphologische Merkmale und Bewertungsstufen (in Großbuchstaben Bezeichnungen für Tab.2)

LOCKERHEIT: 1 sehr locker, kaum aggregiert, 2 sehr locker, gut aggregiert, 3 locker, 4 stellenweise dicht, 5 mäßig dicht, Risse, 6 dicht
POREN (Menge und Art): 1 zahlreich, weit, keine Risse, 2 porös, innen schwammartig, 3 mäßig porös, 4 nur einige Leitbahnen, 5 keine Poren
RISSE (Menge und Art): 1 wenige, rau, 2 mäßig bis viele, rau, 3 viele, glatt
SCHICHTUNG: 1 ausgeprägt, 2 deutlich, 3 angedeutet, 4 zu Flecken aufgelöst, 5 keine
GROBKALK: 1 viel, 2 wenig, 3 sehr wenig oder fehlend
FEINKALK: 1 viel, 2 mäßig, 3 wenig, 4 fehlend
CAKONZ (Carbonatkonzentration): 1 keine, 2 gering, 3 mäßig, 4 viel, 5 sehr viel
TONDOMÄNEN (doppelbrechende): 1 fehlend, 2 wenig, 3 mäßig, 4 viel
TONORIENTIERUNG (in der Matrix): 1 keine Differenzierung, 2 etwas orientiert, 3 stärkere Orientierung, 4 schwache Streifskutanen, 5 starke Streifskutanen, 6! viele Stücke von Tonbelägen eingearbeitet
TONPoren (Bezugs-porenraum für Tonbeläge): 1 keine Tonbeläge vorhanden, 2 vorwiegend Spalten, 3 Spalten und Leitbahnen, 4 vorwiegend Leitbahnen, 5 Leitbahnen, Sandlücken, 6 vorwiegend Sandlücken
TONBELÄGE (Porenwände mit): 1 keine, 2 fleckweise, gering, 3 unter 1/4, 4 1/4 bis 1/2, 5 1/2 bis 3/4, 6 über 3/4
BELAGDICKE (Dicke der Tonbeläge): 1 keine, 2 dünn, 3 dick, 4 sehr dick
FEKONZ (Eisenkonzentration): 1 keine, 2 wenig, 3 mäßig, 4 stark, 5 sehr stark, 6! stark, vorwiegend allochthone Kon-kretionen
BLEICHUNG: 1 nicht merkbar, 2 schwach, 3 mäßig, 4 stark

Tab. 2: Mikromorphologie (Abstufung der Werte nach Tab.1, \* kolloidfrei)

Merkmale → cm Tiefe	LOCKERHEIT		SCHICHTUNG		KAKONZ		TONPOREN		FEKONZ		BLEICHUNG
	POREN	RISSSE	GROBKALK	FEINKALK	FONDOMANEN	TONORIENT	TONBELÄGE	BELAGDÜCKE	FEKONZ		
<b>LÖLSDORF I a</b>	2	2	1	5	2	3	1	1	1	1	1
25-33	3	1	1	5	2	3	1	1	1	1	1
40-48	3	1	1	5	1	3	1	1	1	1	1
62-69	3	1	1	4	1	3	1	1	1	1	1
92-99	3	1	1	5	1	3	1	1	1	1	1
120-128	2	1	1	5	1	2	1	1	1	1	1
<b>LÖLSDORF I-b</b>											
17-25	3	2	1	5	2	3	1	1	1	1	6
42-49	3	1	1	5	1	3	2	2	1	1	2
66-74	3	1	1	5	1	2	2	3	1	1	1
94-102	3	2	2	5	1	2	3	1	1	1	1
123-131	3	1	2	5	1	2	1	4	1	1	1
<b>WISSEL a</b>											
18-25	3	2	2	5	2	4	2	3	1	1	6
52-59	3	3	2	5	1	2	2	3	1	1	6
65-72	3	3	2	3	1	1	2	3	1	1	6
93-100	3	2	2	4	1	1	3	2	2	1	1
<b>WISSEL b</b>											
30-38	4	2	2	5	2	3	2	4	1	1	6
65-72	4	3	2	5	1	2	3	1	1	1	6
115-122	3	2	2	5	1	2	2	3	2	1	4
162-169	3	3	1	3	1	2	2	2	2	1	4
<b>EMMERICH a</b>											
5-12	5	3	2	5	1	3	2	3	1	1	6
43-51	3	2	2	4	1	2	2	3	1	1	2
90-103	3	3	2	4	1	2	2	3	1	1	2
115-122	3	3	2	4	1	2	2	3	1	1	2
160-167	5	3	3	4	1	3	2	3	2	4	3
175-182	6	3	2	4	2	3	2	3	4	1	5
218-225	5	3	2	5	1	1	2	2	4	1	5
<b>EMMERICH b</b>											
10-17	5	3	2	5	2	2	2	2	1	1	1
38-45	3	2	2	5	1	2	2	2	1	1	2
71-78	3	4	2	3	1	1	2	1	1	1	2
93-100	5	3	2	4	2	2	4	2	4	2	3
166-174	5	3	2	4	2	3	2	4	4	1	4
<b>WALLACH a</b>											
8-15	5	3	2	5	1	3	2	2	1	1	1
31-40	3	2	2	5	1	2	2	3	1	1	2
63-70	3	2	1	5	1	1	2	4	1	1	2
125-132	3	2	1	2	1	2	3	4	1	1	1
<b>WALLACH b</b>											
3-12	3	2	1	5	1	2	2	3	1	1	1
31-38	4	3	2	5	1	2	2	3	2	1	1
62-69	4	3	2	5	1	2	2	3	1	1	1
105-112	4	3	1	4	1	1	3	2	1	1	4
123-122	2	3	2	4	1	1	2	3	1	5	2
<b>RINDERN a</b>											
3-10	4	2	2	5	3	4	1	3	1	1	1
23-30	5	3	2	5	3	4	1	4	1	1	1
40-50	5	3	2	4	3	4	1	4	1	1	1
57-64	4	3	2	4	2	3	1	4	4	2	2
74-81	4	3	2	4	1	2	4	5	1	1	1
97-103	3	3	2	3	1	2	3	4	1	4	2
110-117	1	4	2	1	1	1	2	2	1	1	1
<b>RINDERN b</b>											
12-14	4	2	2	3	3	4	1	3	1	1	6
22-29	5	3	2	5	3	4	1	4	1	1	1
33-40	5	3	2	5	3	4	1	3	1	1	1
52-60	5	3	2	5	1	2	2	1	4	2	4
60-76	5	3	2	4	1	2	2	4	1	1	1
107-115	3	4	2	4	1	1	2	2	4	1	1
<b>NIEDERHÖRMTER a</b>											
18-25	3	3	1	5	2	3	2	2	2	1	2
58-65	3	3	2	4	3	2	3	2	4	2	2
78-85	3	3	2	3	1	2	3	3	2	4	2
102-109	1	3	2	3	1	2	4	1	1	1	1
<b>NIEDERHÖRMTER b</b>											
10-17	3	2	1	5	3	4	1	3	1	1	1
57-64	4	3	2	4	3	2	1	4	4	2	2
73-80	4	3	2	5	1	1	2	2	1	4	2
95-102	5	3	2	5	2	3	2	3	4	4	2
<b>LÖLSDORF II a</b>											
10-18	3	1	1	5	3	4	1	3	4	1	1
39-47	6	3	3	4	3	4	1	4	3	3	6
76-84	6	3	2	4	3	4	1	4	3	5	4
90-100	4	2	2	4	3	1	1	2	2	3	2
100-108	5	3	3	3	1	1	5	2	1	4	2
120	5	3	2	3	1	1	5	2	1	1	2
124-132	2	4	2	1	1	*	3	1	1	1	1
<b>LÖLSDORF II b</b>											
30-38	5	2	2	5	3	4	1	4	3	3	3
50-58	5	3	3	4	3	4	1	4	3	3	3
85-93	5	3	2	5	3	4	1	4	3	6	3
120-128	5	3	2	4	3	1	5	2	1	4	2
128-136	1	3	1	3	3	* 3	1	1	1	1	1
<b>LOTTINGEN a</b>											
15-22	3	2	1	5	2	2	2	2	1	1	2
37-44	3	1	1	5	1	2	3	2	1	1	1
55-62	3	2	1	4	1	2	2	3	2	1	1
75-82	3	3	1	4	1	2	2	3	2	4	2
90-97	2	3	2	4	1	1	2	2	2	4	2
<b>LOTTINGEN b</b>											
12-19	3	2	2	5	2	3	1	2	3	2	3
35-42	3	3	2	5	2	2	2	2	3	1	1
60-67	4	2	4	2	4	2	2	4	3	4	2
80-87	3	2	2	4	2	3	2	4	2	2	4
97-104	3	2	1	4	2	1	2	4	1	3	2
<b>WORRINGER BRUCH a</b>											
5-12	3	2	1	5	3	4	1	4	1	1	1
30-37	4	2	1	5	3	4	1	4	4	1	1
40-47	3	2	2	5	3	4	1	4	2	3	2
57-64	4	3	2	5	3	4	1	4	1	6	3
77-84	2	2	4	2	3	4	1	4	4	6	2
100-107	1	4	2	2	1	2	2	4	1	1	1
<b>WORRINGER BRUCH b</b>											
12-18	3	1	1	5	3	4	1	4	1	1	1
32-38	3	3	2	5	3	4	1	4	2	4	3
49-56	3	2	2	4	3	4	1	4	4	3	2
83-90	3	3	2	4	1	2	2	4	2	2	2
101-108	3	3	1	4	1	2	3	4	2	2	1
<b>BODERICH a</b>											
15-22	3	3	1	5	3	4	1	4	1	1	1
35-42	5	2	2	5	3	4	1	4	4	2	2
47-55	3	3	2	5	3	4	1	3	1	4	2
70-77	3	3	1	5	3	4	1	3	1	4	2
107-115	4	3	1	4	3	4	1	4	4	5	3
132-129	4	3	1	4	3	4	1	4	2	5	3
<b>BODERICH b</b>											
18-25	4	3	2	5	3	3	1	4	1	1	1
38-45	3	2	1	5	3	3	1	4	1	4	2
58-65	3	2	2	5	3	4	1	3	1	5	3
79-86	4	4	1	4	3	4	1	4	4	6	2
109-116	4	4	2	5	3	4	1	4	3	6	3
130-137	4	4	1	5	3	4	1	4	3	6	3
145-152	4	4	1	4	3	4	1	4	3	5	3
154-161	2	4	1	1	3	3	1	4	1	5	2
<b>WORRINGER a</b>											
20-29	3	2	1	5	3	4	1	2	1	1	1
47-55	3	2	1	5	3	4	1	3	1	6	3
83-90	5	3	1	5	3	4	1	4	1	6	5
128-136	1	4	1	3	3	4	1	4	1	6	4
150-155	1	5	1	5	3	*	1	1	1	1	1
<b>WORRINGER b</b>											
18-26	3	3	1	5	3	4	1	3	1	6	2
50-58	3	2	1	4	3	4	1	4	1	5	3
78-86	2	2	1	4	3	4	1	4	1	5	2
95-103	5	3	2	5	1	4	4	1	4	5	2
136-144	1	5	1	4	4	3	4	1	4	1	6
<b>RANZEL b</b>											
30-37	5	4	1	3	2	3	1	3	2	1	1
70-77	3	3	1	5	3	4	1	4	5	5	3
110-117	3	3	1	5	3	4	1	3	5	3	4
<b>RANZEL c</b>											
5-12	3	1	1	5	3	4	1	2	1	1	1
30-37	4	2	2	5	3						

Der Kalkgehalt liegt in Profil b höher, das Solum von a zeigt eine gewisse Verdichtung. Teils engräumige Materialunterschiede, in a deutliche Schichtung in 125-132 cm. In b, 125-132 cm, fleckweise etwas Fließton in Sandlücken. Auffällige autochthone Eisendynamik mit sichtbarer Bleichung in b, 105-112 cm.

### RINDERN

Schwach pseudovergleyte Auenbraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 4102 Elten.

Das rezente, feinsubstanzreiche Solum ist bis 50 cm entkalkt. Tonkutanen erscheinen erst unten fleckweise, selten und dünn in Leitbahnen. Das Eisen tritt oben vor allem in Form umgelagerter Konkretionen auf; unterhalb 50 cm ist meist reichliche Eisenfleckung neben mäßiger Bleichung festzustellen. In Parallelprofil a gehört die Probe aus 57-64 cm zu einem begrabenen Boden oder Bodenrest. Ebenfalls in a treten unterhalb 90 cm Kalkflecken auf, die vom Grundwasser bedingt sind und nach oben mit einer porösen Kruste abschließen.

### 3.3 Böden mit Entwicklungsbeginn nach dem Atlantikum

Diese Profile mit fortgeschrittener Entkalkung und angedeuteter Tonwanderung werden als Auenbraunerden bezeichnet. Da das Sediment hohe Anteile an Solum-Material enthält, ist die Silicatverwitterung nur zu geringeren Teil autochthon. Entsprechend hängt die Ausprägung stark vom Bodenanteil im Sediment ab.

### NIEDERMÖRMTER

Sehr schwach pseudovergleyte, schwach entwickelte Auenbraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 4204 Rees, PQ 34/27.

Der Boden hat in 60 cm Tiefe eine zu Flecken aufgelöste Schicht. Das 70 cm mächtige Solum enthält meist noch Feinkalk und im Unterboden Kalkflecken (Taf. 1 Fig. 1). Unter der Krume treten fleckweise dünne Tonkutanen in Leitbahnen auf. Sonst sind die eng benachbarten Parallelprofile a und b mikromorphologisch sehr unterschiedlich: a ist tonärmer und stärker geschichtet, mit Bimstuff in 58-65 cm, erreicht bei ca. 90 cm den Terrassensand. Die Fließton-Aktivierung beginnt im Oberboden und bis zur Terrasse treten Tonorientierung in der Matrix und starke Eisenkonzentration auf.

b ist tonreich. Tonorientierung in der Matrix und Streßkutanen kommen in den Proben aus 57-64 und 95-102 cm vor. Das unregelmäßige Auftreten orientierten Tones weist ihn als synsedimentär aus. Die Eisenkonzentration ist stark.

### LÜLSDORF II

Sehr schwach pseudovergleyte Parabraunerde-Auenbraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5108 Porz, PQ 72/33.

Das Sediment - oberhalb 90 cm Lehm, darunter Sand und Schluff - zeigt in 55 cm eine Sohle aus kleinen Geröllen und ist unter 90 cm schichtig. Ein braunes Sandbändchen in b zeigt feinsubstanzarmes Einzelkorngefüge. Die Schichten sind durch dünne Kalkkrusten, das Sandbändchen durch eine dickere Kruste markiert. Die Pedogenese geht bis in den feinsandigen Schluff, der Boden ist bis 90 cm entkalkt. Der angereicherte Kalk im Liegenden stammt aus Solum oder Grundwasser. Die intensive Tonverlagerung (Taf. 2 Fig. 2) reicht bis in den Kalkanreicherungs-horizont und ist in den Sandlücken wesentlich stärker, als in Leitbahnen (vgl. Tab. 2). Die Eisenverteilung ist mäßig. Dies kann mit ca. 4000 Jahren terrestrischer Entwicklung der jüngste Boden mit deutlicher Tonwanderung sein; doch läßt die Steinsohle vermuten, daß unterhalb 55 cm eine ältere Bodenbildungsphase beteiligt ist.

### 3.4 Böden mit Entwicklungsbeginn in Boreal oder Atlantikum

Bis auf das recarbonatisierte Profil LÜTTINGEN ist hier die Tonwanderung im Solum deutlich nachzuweisen.

### LÜTTINGEN

Auenbraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 4304 Xanten, PQ 31/27.

Parallelprofil a ist oberhalb 45 cm sandig, darunter lehmig-schluffig, b in der Krume lehmig-schluffig und darunter schluffig-lehmig. Beide Profile sind jetzt durchgehend carbonathaltig und zeigen nur schwache Kalk-Umverteilung (Taf. 2 Fig. 3). Schwache und sporadische Tonverlagerung in Leitbahnen unterhalb 60 cm deutet eine Phase tiefer Entkalkung an oder eine zweiphasische Sedimentation. Die Eisenverteilung ist unten mäßig bis stark.

### WORRINGER BRUCH

Parabraunerde-Auenbraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 4097 Leverkusen, PQ 58/61.

Der Boden ist bis 70 cm entkalkt und zeigt darunter schwache Kalkfällung. Die Feinsubstanz ist reich an doppelbrechendem Ton, der ab 30 cm fleckweise orientiert und teils zu Streßkutanen eingeregelt ist. Im Unterboden fleckweise, aber regelmäßig, Fließtonbeläge in Sandlücken (Parallelprofil a) und Leitbahnen (b), und in b reicht die Tonwanderung in Sandlücken bis unter 1 m hinab. Die Beläge können dick sein, ein Al-Horizont ist nicht vorhanden. Die autochthone Eisendynamik ist gering.



**BÜDERICH**

Auenbraunerde-Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl.4305 Wesel, PQ 23/29.

Im Gelände fiel die 70-80 cm tief reichende dunkle Färbung auf. Der Boden ist kalkfrei, enthält reichlich Tondomänen, die oft eingeregelt sind und zeigt keine autochthone Eisenanreicherung. Im Parallelprofil a sind in Leitbahnen fleckweise dünne Tonbeläge entwickelt (zwischen 35 und 77 cm); dagegen sind bei den Sandlücken bis zu 25% dick mit Fließton belegt (zwischen 107 und 129 cm). Störung der Tonbeläge ist häufig. b ist durchgehend sandig, und zwar von 70-130 cm mit rostfarbenem, tonhaltigem Sand, der beim Trocknen fest wird. In Leitbahnen sind wenige dünne Beläge entwickelt (38-45 cm); aber über 75% der Sandlücken sind mit dicken Belägen ausgekleidet (zwischen 79 und 137 cm, Taf. 2 Fig. 4). Im schluffreicheren Material darunter findet die Tonverlagerung wieder in Leitbahnen statt und läßt nach. Diese Profile zeigen die große Bedeutung des Porenraumes und damit der Bodenart für die Fließton-Verlagerung.

**WORRINGEN**

Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl.4907 Leverkusen, PQ 59/60.

Das sandig-tonige Sediment ist kalkfrei. Der Bt-Horizont löst sich nach unten in wellige, teils zapfenartig ausgestülpte, von der Schichtung teils unabhängige Bänder auf, die bei 2 m Tiefe noch nicht aufhören (SCHRÖDER, mündl. Mitt.).

Im Parallelprofil a sind im Unterboden die Sandlücken mit Ton ausgekleidet, am stärksten in 83-90 cm. Reichliche, dicke Beläge zeigt ein tonreiches Band in 128-136 cm, während der Sand darunter sehr kolloidarm ist. In b kommen auch lehmige Lagen mit Leitbahnen vor, wo die Tonanreicherung aber viel geringer ist, als in den Sandlücken. In Sandlücken findet man überall dicke Beläge, besonders in 1 m Tiefe. Die autochthone Eisendynamik ist gering.

### 3.5 Seit Beginn des Holozäns oder länger entwickelte Böden

Die Bodenbildung der Profile erfaßt mindestens das gesamte Holozän (RANZEL), teils auch die Jüngere Tundrenzeit (MONDORF, RHEIDT, MESCHENICH) oder sogar noch das Alleröd (WAHN). Die Böden aus diesem Zeitraum sind ausgeprägte, teils pseudovergleyte Parabraunerden.

**RANZEL**

Sehr schwach pseudovergleyte Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5108 Porz, PQ 72/34.

Beide Parallelprofile sind im Unterboden kalkfrei. a ist in einer schwachen Depression ausgebildet. Der doppelbrechende Ton zeigt in 30-37 cm nur schwache Orientierung, darunter aber ausgeprägte Streßkutanen sowie sehr dicke Beläge in Sandlücken und Leitbahnen. Redoxprozesse führten zu Fe-Umverteilung. b hat in 1 m eine poröse Kalkkruste an der Grenze zum liegenden grauen, kalkhaltigen Sand. In 30-37 cm finden sich dünne Tonbeläge in einigen Sandlücken und Leitbahnen, darunter sehr dicke Kutanen in vielen Spalten und Leitbahnen, die teils bis in die Poren der Kalkkruste reichen, aber im liegenden Sand fehlen. In 55-62 cm ist viel Kutanenton in die Matrix eingearbeitet. Die Fe-Umverteilung ist im Solum mäßig und fehlt in Kalkkruste und liegendem Sand.

**MESCHENICH**

Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5107 Brühl, PQ 66/35.

In 2 m Tiefe mit Bimstuff (in b als schluffiges Band auch makroskopisch sichtbar). Der obere Meter ist kalkfrei. In a findet sich Fließton nur gelegentlich in Leitbahnen, außer in 140-148 cm, wo Aggregatwände und Leitbahnen starke Fließtonbeläge tragen. In b enthält der gesamte Unterboden starke Tonbeläge in Leitbahnen und zwischen Sandkörnern und in 92-100 cm reichlich Bruchstücke von Tonbelägen in der Matrix (Taf. 1 Fig. 5). Darunter fehlt der Fließton ganz. Die Eisendynamik ist im unteren Teil von a sehr stark, in b schwächer.

**MONDORF**

Parabraunerde bis Pseudogley-Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5208 Bonn.

Die Entkalkung reicht mindestens bis 1 m; in ca. 170 cm ist eine poröse Kalkkruste ausgebildet. In Parallelprofil a zeigt der doppelbrechende Ton eine stetige Zunahme an Menge, Orientierung und Wanderung in Leitbahnen bis in 1 m Tiefe, wobei schon in 60 cm die Tonbeläge sehr dick sind (Taf. 2 Fig. 5). In b ist die Tonverlagerung geringer, aber in 60-67 cm sind Streßkutanen ausgebildet. Die Eisendynamik wechselt stark.

**RHEIDT**

Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5208 Bonn.

Der Boden ist bis unter 70 cm entkalkt und hat bei ca. 1 m eine poröse Kalkkruste. Die Fließtonbeläge nehmen nach unten zu und sind in der Kalkkruste sehr stark. Im liegenden Sand keine Fließton-Aktivität. Im Unterboden gibt es Stellen, in denen zahlreiche Reste von Tonbelägen in der Grundmasse enthalten sind. Die Eisenanreicherung ist mäßig und fehlt im Sand.

**WAHN**

Parabraunerde aus Hochflutlehm, TK 25 Bl. 5108 Porz, PQ 75/36.

Dieser älteste unserer Böden, der schon vor den spätpleistozänen Wärmeschwankungen in den terrestrischen Bereich kam, ist in einer Parallele (b) als Rinnenfüllung ausgebildet und kann dort im oberen Teil jünger sein. Die Profile sind kalkfrei bis in die untersuchte Tiefe von 130 cm und zeigen einen deutlichen Fließton-Gradienten mit intensiven Belägen in den tieferen Proben (Taf. 1 Fig. 3). Die Eisen-dynamik wechselt und ist in der Rinnenfüllung stärker. Hier gibt es schon in 70 cm deutliche Bleichflecken (Taf. 2 Fig. 6) und in 122-130 cm stärkere Bleichung (Taf. 1 Fig. 6).

**4 Beziehungen einzelner Merkmale zum Bodenalter**

Um die Beziehung der mikromorphologischen Merkmale zum Bodenalter festzustellen, wurden die Tabellenwerte der Probentiefe entsprechend in Profilsäulen eingetragen (Tab. 3-6). Dabei zeigte sich, daß die Entwicklung im Auflandungsgebiet des Niederrheins langsamer abläuft als in der Kölner Bucht. Das Profil LÜLSDORF II wird wegen seines unsicheren Alters nicht für Schlußfolgerungen herangezogen. Nachfolgend werden die pedogenetisch wichtigen Merkmale erläutert.

**4.1 Körnung**

Die Korngrößenzusammensetzung hat starken Einfluß auf die Pedogenese; deshalb werden hier die Ergebnisse der Sieb- und Schlämmanalyse entspre-

chend ihrer pedogenetischen Bedeutung dargestellt (Tab. 3). Die Bodenarten werden zu fünf Gruppen so zusammengefaßt, daß sie innerhalb jeder Gruppe ein relativ einheitliches Porensystem bedingen (das die Pedogenese weitgehend steuert), und daß sie durch die pedogenetische Verschiebung der Korngrößenanteile im allgemeinen nicht aus ihrer Gruppe herausfallen. Gruppe 1 (Sand) hat Einzelkorngefüge, Gruppe 2 (tonhaltiger Sand) ermöglicht Tonwanderung zwischen Sandkörnern, Gruppe 3 (schluffhaltige, tonarme Bodenart) bedingt instabiles Gefüge, Gruppe 4 (leichtere lehmige Bodenart) fördert stabiles Gefüge mit Leitbahnen, und Gruppe 5 (schwere lehmige Bodenart) führt zu groben Segregaten mit Streßkutanen. Die pedogenetisch (durch Verlehmung und Tonwanderung) bedingten Veränderungen der Bodenart betreffen in den untersuchten Böden weitgehend die Gruppe 4 (leichtere lehmige Bodenart) und führen im Rahmen der holozänen Prozesse im allgemeinen nicht aus der Gruppe 4 heraus.

Die Gruppen setzen sich aus folgenden Bodenarten (Symbole nach AG BODENKUNDE 1982) zusammen: 1 = S, Su2; 2 = St, Ts4; 3 = U, Us, Su4, Su3; 4 = Sl, Ls, Lu, Ul, Ul2; 5 = Lt.

**4.2 Kalkgehalt**

In Tab. 4 ist der Kalkgehalt (größere Körner und Feinsubstanz der Tab. 2 wurden addiert) dargestellt. Der Wert 7 gibt völlige Entkalkung an, eine Voraussetzung für die Mobilität der Tonsubstanz im terrestrischen Milieu. Bei Einfluß von kalkhaltigem Grundwasser ist die Entkalkung gehemmt. So ist das Profil RINDERN (1800 Jahre) bis in 50 cm entkalkt,

Tab. 3: Körnung (Werte aus SCHRÖDER 1979, ergänzt). 1 = Sand; 2 = tonhaltiger Sand; 3 = schluffhaltige, tonarme Bodenart; 4 = leichte lehmige B.; 5 = schwere lehmige B.

Jahre cm	500 LÜLI	500 WISS	1800 EMME	1800 WALL	1800 RIND	3000 NMÖR	6000 LÜTT	6000 WOBR	8000 BÜDE	8000 WORR	10000 RANZ	11000 MESCH	11000 MOND	11000 RHEI	13000 WAHN
50-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
100-	4	4	4	4	4	4	4	3	4	2	4	4	4	5	4
	2	4	4	4	4	3	4	1	5	2	4	4	4	4	4
150-					4	4			4	4	4	4		4	4
			4	5					4	4	1				
200-				5					4	4		4	4	1,3	

Tab. 4: Entkalkung  
Summe von grobem und feinem Kalk; von 2 = kalkreich bis 7 = entkalkt

Jahre cm	500 LÜLI	500 WISS	1800 EMME	1800 WALL	1800 RIND	3000 NMÖR	6000 LÜTT	6000 WOBR	8000 BÜDE	8000 WORR	10000 RANZ	11000 MESCH	11000 MOND	11000 RHEI	13000 WAHN
50-	5 4 4	5 6 3	4 5 3	4 3 2	5 3 2	3 3 2	7 7 5	7 7 6	7 6 7	7 7 7	7 6 7	7 7 7	7 7 7	7 7 7	7 7 7
100-	4 3	3 3	2 3	7 4 3	4 2 2	3 2 2	5 2 2	5 3 3	4 4 5	5 5 3	7 7 7	7 7 7	7 7 7	2 2	2 2
150-			3	4 5	5				7 7 6	7 7		7	3		7
200-				2								7	3		

während das Profil LÜTTINGEN (6000 Jahre) bis oben Kalk führt. In einigen Böden zeigen die Werte eine spätere Kalkzufuhr von oben an. Bei allen mindestens 8000 Jahre alten Böden ist der größte Teil des Solums kalkfrei.

### 4.3 Tonwanderung

Während Streßkutanen auch in primär noch kalkhaltigem Material entstehen können, wie das von Vertisols bekannt ist, und sich bereits nach 1800 Jahre zu bilden beginnen (EMMERICH), wird für die

Tonwanderung angenommen, daß sie Entkalkung voraussetzt. Die Tonwanderung, deutlichster Ausdruck der Bodenentwicklung, ist in Tab. 5 als Produkt aus Häufigkeit und Dicke der Fließtonbeläge eingetragen. Die bei Tonwanderungen stark bevorzugten Sandlücken wurden gekennzeichnet.

Die mittelalterlichen Profile, die durch Eindeichung der Sedimentation entzogen sind, aber noch bis ins Solum Druckwasser bekommen können, besitzen keinerlei Tonbeläge; doch bereits in römischerzeitlichen Profilen (1800 Jahre) stellen wir sie hier und da fest, in EMMERICH und WALLACH zwar nur in der Tiefe

Tab. 5: Fließtonbeläge. Produkt der (um für fehlenden Fließton = zu erhalten) jeweils um 1 reduzierten Maßzahlen für belegte Porenwände und Dicke der Beläge; \* = viele Sandlücken

Jahre cm	500 LÜLI	500 WISS	1800 EMME	1800 WALL	1800 RIND	3000 NMÖR	6000 LÜTT	6000 WOBR	8000 BÜDE	8000 WORR	10000 RANZ	11000 MESCH	11000 MOND	11000 RHEI	13000 WAHN
50-	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 2 4	0 1 1	0 4* 4*	2* 6* 6*	0 1 1	0 2 6	0 2 4	0 2 6
100-	0 0	0 0	1 0	1 0	0 1	1 0	1 1	1* 1*	1 8*	2* 10*	8* 8*	9 1	9 9	9 8	9 6
150-			0	1*	0				10* 3*	4* 1*	2*	12	0	0	9
200-			0	0								2	0	0	





auch Tondurchschlammungsmerkmale. Es ist daher auch möglich, daß die Tonwanderung ziemlich rasch nach der Entkalkung beginnt ...". Tatsächlich enthält der holozäne Auenlehm vorverwittertes Material, das nach Entkalkung der Tonwanderung unterliegt. Dabei werden die Tondomänen, die im Liefergebiet durch Silicatverwitterung oder beim Transport aus Tonbelägen entstanden sind, dispergiert, und der Ton bewegt sich mit dem Bodenwasser in Hohlräumen. Dann sind in Poren doppelbrechende Tonbeläge nachzuweisen; doch sind die Wanderstrecken anfangs gering, und eine meßbare Verarmung des Oberbodens tritt erst viel später ein. Bei der Tonwanderung handelt es sich eindeutig um einen Prozeß aus der terrestrischen Pedogenese (ein Zusammenhang mit Grundwasserschwankungen wurde nicht beobachtet und ist auch nicht wahrscheinlich, da dieses kalkhaltig ist), der zur Parabraunerde überleitet. Deren Sondercharakter, der in der frühzeitigen und durchgreifenden Mobilisierung des ererbten Tons bei zunächst geringer Horizontdifferenzierung besteht, wird lediglich auf der Ebene der Form gekennzeichnet: "Parabraunerde aus Hochflutlehm". Obwohl die Tonwanderung beschleunigt abläuft und schnell durchgreifen kann, weil das Sediment reaktivierbares Bt-Material aus dem Liefergebiet enthält, muß sie immerhin nach der Materialverlagerung neu beginnen, und so kommt es schließlich doch zu einer altersabhängigen Horizontdifferenzierung. Nach etwa 6000jähriger Entwicklung ist in der Regel ein Bt-Horizont abgrenzbar, ist die Parabraunerde aus Auenlehm entstanden.

Dies gilt für lehmige Substrate, wogegen die Tonwanderung zwischen Sandkörnern extrem schnell verläuft und kaum vom pH-Wert abhängig ist. Das Ergebnis ist ein ausgeprägtes Hüllengefüge (Taf. 2 Fig. 4), das sich bis zur vollständigen Porenfüllung entwickeln und dem Sediment dann einen honigsandartigen Charakter geben kann.

Die alten Böden wurden aus spätpleistozänem Sediment gebildet, das mindestens zum Teil primär kalkarm oder -frei war. Das Profil WAHN liegt auf der Älteren Niederterrasse, MONDORF, RHEIDT und MESCHENICH gehören zu spätpleistozänen Sedimenten der Jüngeren Niederterrasse, und auch die Entwicklung des Profils RANZEL geht bis zum Ende der Jüngeren Tundrenzeit zurück. Da das Ausgangsmaterial tonreich war und eine starke Beteiligung umgelagerter Tonbeläge zeigen kann (Taf. 1 Fig. 5), ist die Beteiligung von kurzstreckig transportiertem Bt-Material wahrscheinlich. Es dürfte sich um Solifluktionsmaterial von den Talflanken handeln, das Anteile des Eem-Bodens enthält und sich zu den Flußrinnen hin mit Auensedimenten verzahnt, entsprechend der Darstellung bei ROHDENBURG (1989:

26). Die randliche Überdeckung kalkfreien spätweichselzeitlichen Sedimentes, wahrscheinlich solifluidalen Decklehms, durch kalkhaltigen holozänen Hochflutlehm beschreibt HANNA (1966: 30). Der Ton des ererbten Bt-Materials wurde am neuen Ort reaktiviert und bildet Tonbeläge und -füllungen, die meist reich mit Eisenoxid-Körnchen durchsetzt sind (Taf. 2 Fig. 5). Diese Böden zeigen auch verstärkt Eisenumverteilung (Taf. 2 Fig. 6). Kalkarmut und stärkere Vorverwitterung dieser spätpleistozänen Sedimente wirken in der gleichen Richtung wie die regionale terrestrische Bodenentwicklung im Holozän, so daß nur schwer auf deren Intensität geschlossen werden kann.

Diese älteste Gruppe von Böden hat sich aus der (pleistozänen) Hauptlage entwickelt, die jüngeren aber aus dem holozänen Hochflutlehm. Sie gehören auch nicht zur selben Entwicklungsreihe. Im Hochflutlehm spielen nur fluviatile Sedimente eine Rolle. Aber auch deren Zusammensetzung war Veränderungen durch naturgeschichtlich und anthropogen bedingte Substratunterschiede unterworfen, so daß mit gewissen Abweichungen in der Bodenentwicklung gerechnet werden muß:

Im Frühholozän nahmen im Zuge der Vegetationsansiedlung Bodenabtrag und Sedimentbildung schnell ab und wurden deutlich geringer. Im Liefergebiet standen die verschiedenen Decksedimente (Substrate mit reichlich eingearbeitetem Verwitterungsmaterial bis fast zum Löß), äolischer Löß und offener Fels an. Nach der Konsolidierungsphase dürften besonders die jungen, gering verwitterten Böden aus Löß vom Abtrag betroffen gewesen sein, so daß sich aus dem Sediment mäßig tonhaltige Auenpararendzinen bildeten, die sich nach Art der autochthonen Lößböden durch Silicatverwitterung zu Braunerden s. str. und durch nachfolgende Tonverlagerung zu Parabraunerden entwickeln konnten. Noch bis zum Atlantikum waren im Liefergebiet kaum rezente Parabraunerden vorhanden; aber durch die fortschreitende rezente Bodenbildung nahm der Anteil an verwittertem Material zu und der Carbonatgehalt der Fracht ab. In der Aue wurde das Stadium der Auenpararendzinen kürzer, soweit der Grundwasserkontakt die Entkalkung nicht behinderte, und das folgende Stadium stand der Auenbraunerde vielleicht näher, als der Braunerde. Tonverlagerung führte zur Parabraunerde.

Bei Auenlehmen, deren Sedimentation nach Beginn des Atlantikums, aber vor über 5000 Jahren abgeschlossen war, war die Bodenentwicklung im Liefergebiet weiter fortgeschritten, in den meisten Lößgebieten bis zur Parabraunerde, während der landwirtschaftlich bedingte Bodenabtrag noch keine große Rolle spielte. An der Fracht des Stromes war daher Material aus Ah-, Bv- und Bt-Horizonten reichlich

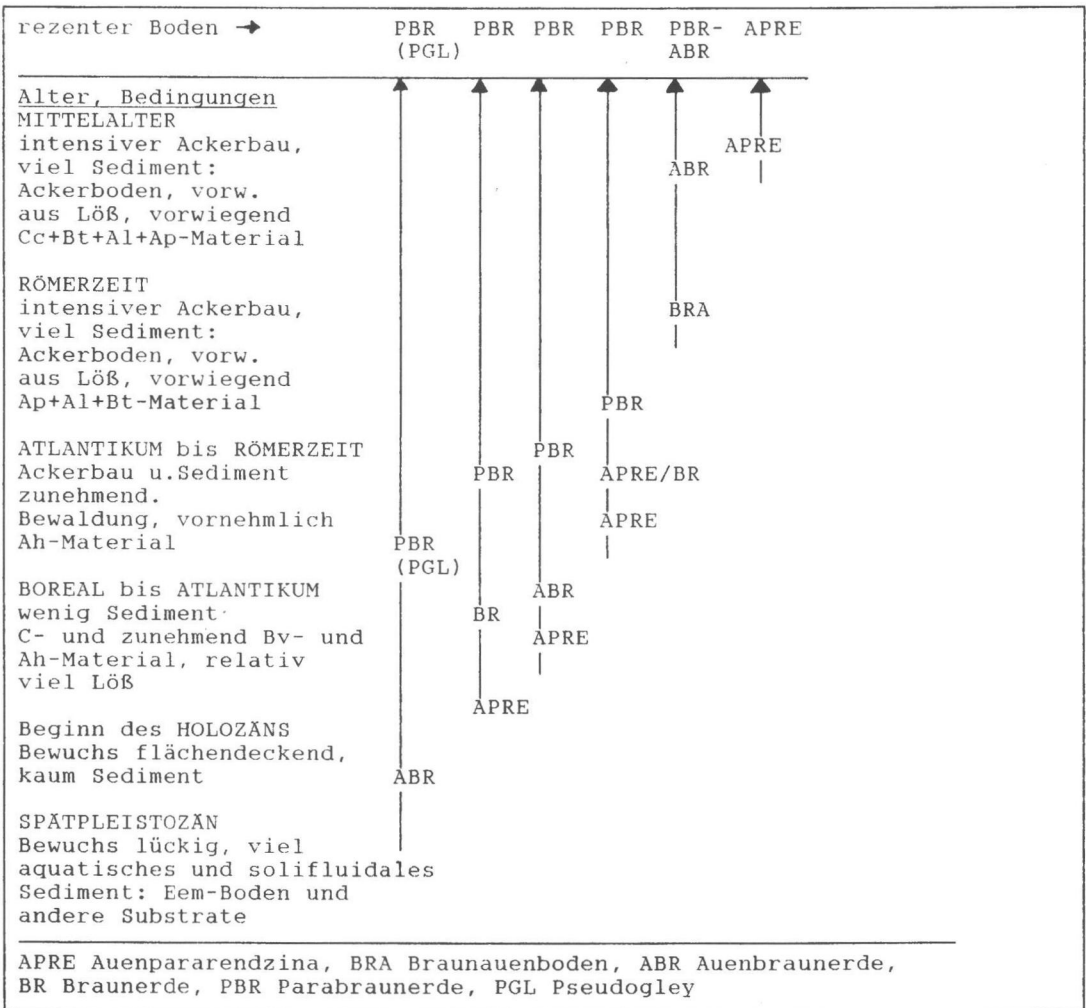
beteiligt, die Sedimentmenge je Zeiteinheit war jedoch gering. Die Bodenentwicklung in der Aue hätte demnach von der Allochthonen Vega zur Parabraunerde laufen können; wegen relativ hoher Beteiligung der alpinen Komponente ist aber die Reihe Auenpararendzina - Auenbraunerde bis Braunerde - Parabraunerde wahrscheinlicher.

Bei den jüngeren Sedimenten ist durch Intensivierung der Landnutzung die Sedimentmenge stark angestiegen. In einer Übergangszeit stand noch reichlich vorverwittertes und humoses Material im Sediment zur Verfügung, so daß sich wohl der Braunauenboden (Allochthone Vega, Profil Ah - M - C) bildete, der durch Entkalkung und Humusschwund bei geringer Silicatverwitterung zur Auenbraunerde (Profil Ah - B - C) wurde und nun als Parabraunerde-Auenbraunerde einer zunehmenden Tonwande-

rung unterliegt. Schließlich beteiligte sich zunehmend Material des Untergrundes, was eine Abnahme des Humus- und Tongehaltes und aus den am meisten betroffenen Kalk- und Lößlandschaften des Einzugsgebietes einen Anstieg der Carbonatgehalte bedeutet. Nun verschob sich der Schwerpunkt am Beginn der Bodenbildung wieder von den A-M-Böden zu den A-C-Böden, d. h., die meisten jungen Auenböden stehen der Auenpararendzina näher als der Allochthonen Vega. Diese Auenpararendzinen könnten in ihrer Weiterentwicklung der Braunerde näherkommen, als der Auenbraunerde, da sich in den Sedimenten der Gehalt an verwitterbaren Silicaten erhöht und der Gehalt an Verwitterungsprodukten vermindert hat.

Die folgende Tab. 8 ist ein Versuch, die dargelegten Befunde zu ordnen und die mutmaßliche Geschichte der vorwiegenden rezenten Böden darzustellen.

Tab. 8: Rekonstruktion der Bodenentwicklung



## 6 Schnelle Tonverlagerung in Ackerböden

Am Beispiel von Böden des Versuchsgutes Wahn zeigt sich, wie schnell die Tonwanderung in gestörtem Material mit Bt-Komponente ablaufen kann, wenn Sandlücken zur Verfügung stehen. Von der Jüngeren Niederterrasse des Rheins wurden uns im November 1970 Bodenproben aus dem Versuchsgut der Landwirtschaftskammer Rheinland durch Herrn MERBITZ übergeben. Der dichte Unterboden ist hier in der Lage, sich bereits ein bis zwei Jahre nach Einsatz des Zweischichtenpfluges erneut zu verdichten, wobei die Tonverlagerung eine wichtige Rolle spielt.

Die Proben zeigten folgende Bodeneigenschaften: Farbe (MUNSELL) in der Krume 10 YR 4/2 oder 7,5 YR 4/2, im Unterboden 7,5 YR 4/4; pH-Werte zwischen 6,2 und 6,9 (KCl), potentielle Kationen-Austauschkapazität 10-17 mval/100 g, meist zu 96-99% mit Basen gesättigt, und zwar mit Ca (70-)82-94%, Mg 0,6-1,2%, K 0,6-3,6% (Unterboden bis 1,7%), Na 0,6-2% (Unterboden bis 1,3%); die Krume enthält 1,5-1,8% organische Substanz; Tonminerale sind neben Illit etwas Chlorit und Spuren von Kaolinit. Die Körnung (Abb. 2) zeigt eine starke Tonanreicherung im Unterboden an, der entsprechend ein Polyedergefüge besitzt, während die Krume Subpolyeder- bis

Plattengefüge hat. Unter Klee reicht das Subpolyedergefüge noch in den Unterboden hinein, während unter Wintergerste schon in der Krume neben Subpolyedern auch Polyeder gefunden werden. Das auffallende Merkmal dieser ackerbaulich schwierigen Böden ist die starke Tonanreicherung im Unterboden (Bt-Horizont). Unter dem Mikroskop zeigt sich, daß die Matrix von doppelbrechendem, verfließendem Ton in unterschiedlicher, teils sehr großer Menge durchsetzt ist (Taf. 3 Fig. 1). Der ge grubberte Oberboden ist deutlich verarmt (Taf. 3 Fig. 2). Wo dagegen der Zweischichtenpflug eingesetzt wurde, da ist reichlich Fließton in die Krume gebracht worden (Taf. 3 Fig. 3). Der Unterboden zeigt nicht nur eine tonreichere Matrix, sondern eine Infiltration der Poren mit Fließton (Taf. 3 Fig. 4), die besonders bei Schluffmangel intensiv ist, im Sand ein Hüllengefüge erzeugt und zunehmend die Sandlücken füllt (Taf. 3 Fig. 5, 6), wobei die entstehende Staunässe zur Eisen- und Manganumverteilung führt. Vorbedingung für die schnelle Verdichtung ist das Vorkommen sandig-toniger Bodenarten, weil hier die Tonwanderung unmittelbar ablaufen kann. Dieses Beispiel vom Versuchsgut Wahn zeigt, wie extrem kurz die für eine Tonverlagerung nach Materialumlagerung notwendigen Zeitspannen sind, wenn die genannten Bedingungen vorliegen.

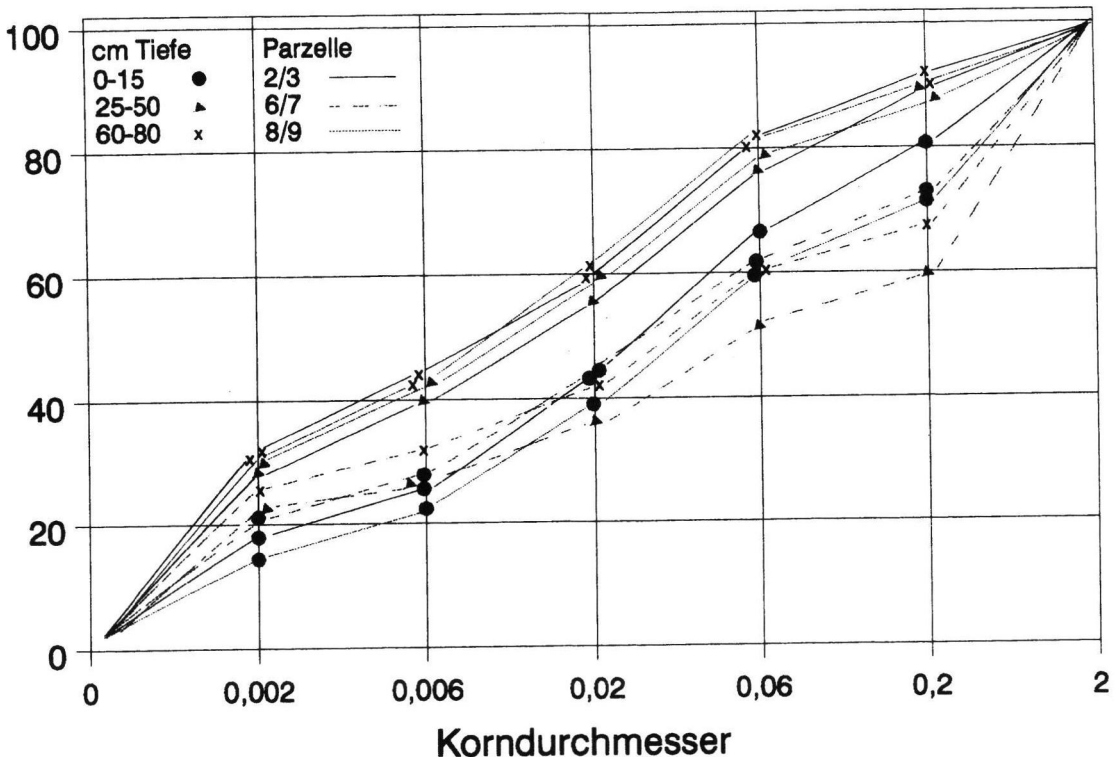


Abb. 2: VERSUCHSGUT WAHN, kumulative Kurven der Korngrößenfraktionen.

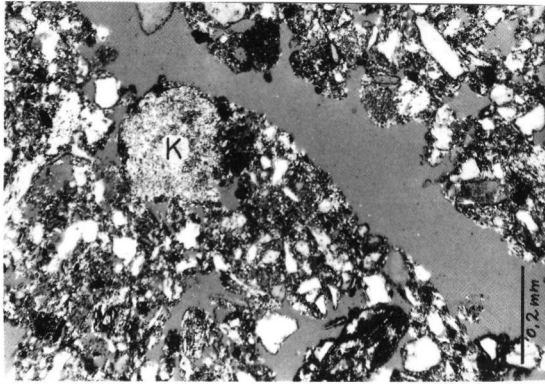


Für die Verfestigung dieser Böden ist vor allem ein mikroskopisch schwer darstellbarer Anteil der Tonfraktion verantwortlich. Neueste Untersuchungen (BRAUN 1991) auf der Niederterrasse im Bereich des Versuchsgutes Wahn zeigen, daß eine hoher Anteil an löslicher Kieselsäure vorliegt, die bei der Verwitterung von Trachyttuff freigesetzt wird. Von den großen Trachyttuff-Decken am Nordrand des Rheinischen Schiefergebirges kommt vor allem die vom Laacher See in Frage, deren Auswurfmassen während der gesamten Dauer von Jüngerer *Dryas* und Holozän ausgeräumt wurden und als Komponente des Hochflutlehmes der Silicatverwitterung und Auslaugung unterliegen.

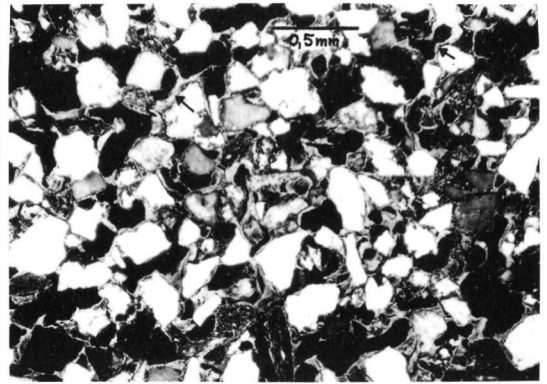
## 7 Schriftenverzeichnis

- ALTEMÜLLER, H.-J. (1974): Mikroskopie der Böden mit Hilfe von Bodendünnschliffen.- Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Band 4, Teil 2, 309-367, 45 Abb., Frankfurt a. M. (Umschau-Verlag).
- ALTERMANN, M. & M. WÜNSCHE (1991): Ausgangsgesteine und Bodeneigenschaften. - Z. geol. Wiss. 19, 3-12, 5 Abb., 3 Tab., Berlin.
- AG BODENKUNDE (1982): Kartieranleitung, 2. Aufl.- 331 S. 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil., Hannover, In Komm.: Stuttgart (Schweizerbart).
- Arbeitskreis für Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (1985): Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. Kurzfassung.- Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, **44**, 1-90, Göttingen.
- BRAUN, P. (1991): Gefügeverfestigung in Auenböden des Mittelrheins. - Bonner Bodenkdl. Abh. **3**, 354 S., 204 Abb., 60 Tab., Bonn
- BRUNNACKER, K. (1978): Der Niederrhein im Holozän.- Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., **28**, 399-440, 14 Abb., 4 Tab., 1 Taf., Krefeld.
- DUCHAUFOR, PH. (1976): Atlas écologique des sols du monde. - 178 S., 11 Tab., 20 Taf., Paris (Masson)
- GEBHARDT, H., P. HUGENROTH & B. MEYER (1969): Pedochemische Verwitterung und Mineral-Umwandlung im Trachyt-Bims, Trachyt-Tuff und in den Tuff-Mischsedimenten der Laacher Eruptionsphase. - Göttinger Bodenkundliche Berichte **11**, 1-83, 14 Abb., 7 Tab., Göttingen.
- HANNA, F. S. (1966): Untersuchung und Einteilung der Talböden im unteren Mittelrheintal. - Diss. Bonn, 120 S., 30 Abb., 11 Tab., Bonn.
- HEIDE, G. (1988): Boden und Bodennutzung. - In: Geologie am Niederrhein, 4. Aufl., S. 73-78, 1 Abb., 1 Taf., Krefeld (Geol.Landesamt NRW).
- KLOSTERMANN, J. (1988): Quartär. - In: Geologie am Niederrhein, 4. Aufl., S. 40-63, 12 Abb., 2 Tab., Krefeld (Geol. Landesamt NRW).
- KOPP, E. (1964): Zur Genese der Böden aus Hochflutlehm auf der Niederterrasse im Raume Bonn-Köln-Krefeld.- Eiszeitalter und Gegenwart, **15**, 81-91, 4 Tab., Öhringen.
- MIEDEMA, R. (1987): Soil formation, microstructure and physical behaviour of Late Weichselian and Holocene Rhine deposits in the Netherlands.-Diss. Agric. Univ. Wageningen, XI+339 S., 60 Abb., 78 Tab., Wageningen.
- MÜCKENHAUSEN, E. & H. WORTMANN, m. Beitr. v. F. ERDMANN & E. KLAPP & H. KLUG & E. SCHRÖDER & H. WERNER (1962): Erläuterungen zur Bodenübersichtskarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 300 000.-144 S., 7 Abb., 10 Taf., Krefeld (Geol. Landesamt NRW.)
- PAAS, W. (1961): Rezente und fossile Böden auf niederrheinischen Terrassen und deren Deckschichten. - Eiszeitalter und Gegenwart, **12**, 165-230, 32 Abb., Öhringen.
- ROHDENBURG, H. (1989): Landschaftsökologie - Geomorphologie. - 220 S., 33 Abb., 1 Taf., Cremlingen (Catena-Verlag).
- SCHNEIDER, F. K. (1983): Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 50000, Blatt L 5308 Bonn.- Krefeld (Geologisches Landesamt NRW).
- SCHOLZ, A. D. & SCHRÖDER & H. ZAKOSEK (1983): Erfassung der Bodenentwicklung in Hochflutlehm des Niederrheins mit Hilfe multipler Korrelations-, Regressions- und Clusteranalysen. - Z. Pflanzenenernaehr. Bodenk., **146**, 353-364, 5 Abb., 4 Tab., Weinheim.
- SCHRÖDER, D. (1979): Bodenentwicklung in spätpleistozänen und holozänen Hochflutlehm des Niederrheins. - Habil. Bonn, 296 S., 63 Abb., 56 Tab., Bonn
- STEPHAN, S. (1981): Zur Mikromorphologie der Tonverlagerung im Alluvium des Niederrheins. - Sonderveröff. Geol. Inst. Univ. Köln **41** (Festschrift Brunnacker); 243-247., Köln.
- WOLLERSEN, TH. W. (1982): Zur Boden- und Sedimententwicklung in spätpleistozänen und holozänen Hochflutlehm von Rhein und Neckar im nördlichen Oberrheintalgraben. - Diss. Bonn, 260 S., 53 Abb., 8 Tab., weitere Abb. u. Tab. im Anhang., Bonn.
- ZAKOSEK, H. (1991): Zur Genese und Gliederung des Rheintal-Tschernosems im nördlichen Oberrheingraben.- Mainzer geowiss. Mitt. **20**, 159-176, 6 Tab., Mainz.

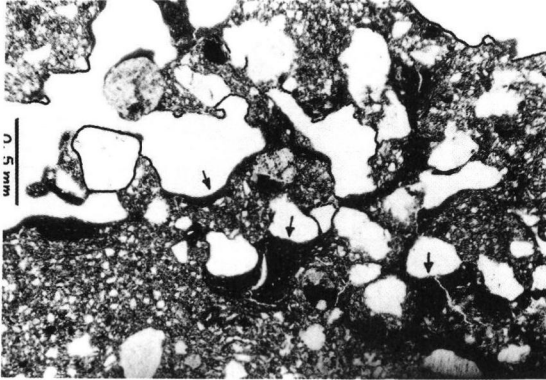
Manuskript eingegangen am 30.1.1992



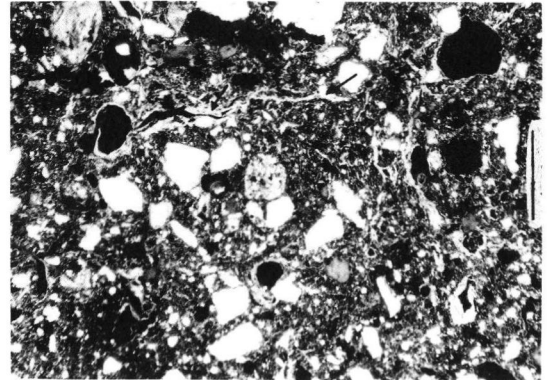
1



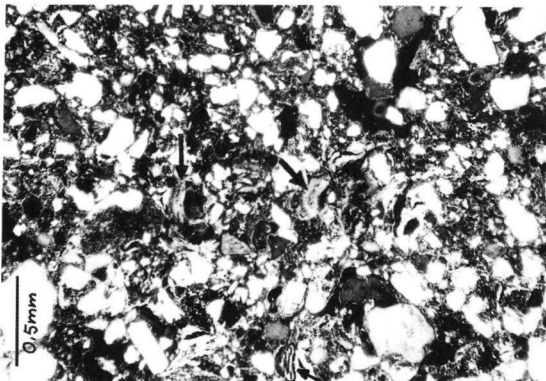
2



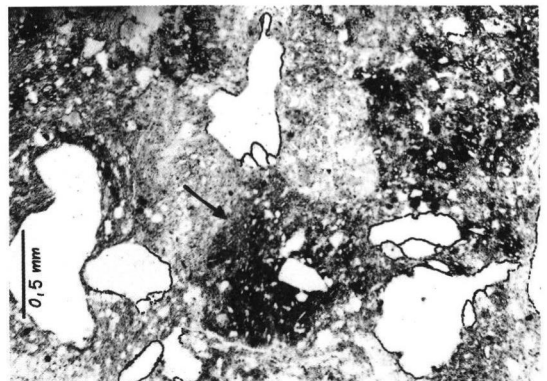
3



4



5



6

## Tafel 1

Fig. 1: Kalk-Konkretion (K), Poren hellgrau; NIEDERMÖRMTER a, 58-65 cm; teilweise gekreuzte Polarisatoren

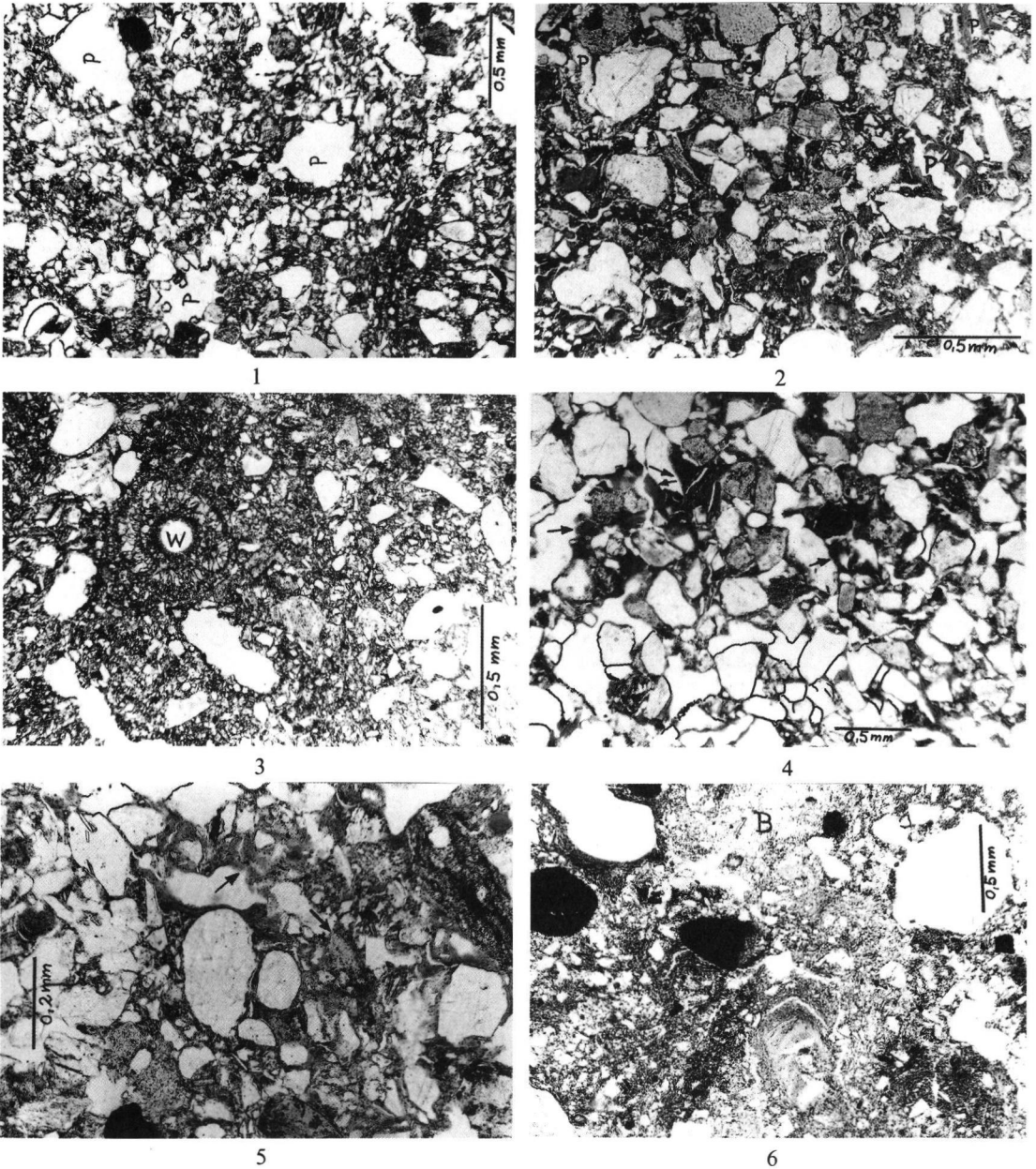
Fig. 2: In diesen Sandlücken sind 3/4 der Porenwände mit Tonkutanen belegt, die grau bis weiß erscheinen, Sandkörner weiß, Poren schwarz; BÜDERICH b, 109-116 cm; gekreuzte Polarisatoren

Fig. 3: An den Porenwänden eines Schwammgefüges sieht man sehr dicke Tonbeläge (Pfeile), Poren und viele Mineralkörner weiß, Fließton dunkel; WAHN b, 66-73 cm; ohne Polarisatoren

Fig. 4: Tonbeläge weiß (Pfeile!) zwischen Aggregaten und in Leitbahnen, Mineralkörner hell bis weiß, Poren schwarz; MONDORF b, 60-67 cm; gekreuzte Polarisatoren

Fig. 5: In präholozänem Material ist Kutanenton eingearbeitet (Pfeile); MESCHENICH b, 92-100 cm; gekreuzte Polarisatoren

Fig. 6: starke Bleichflecken hellgrau, Stellen mit Fe-Mn-Anreicherung sehr dunkel, Poren und durchsichtige Körner weiß; WAHN b, 122-130 cm; ohne Polarisatoren



Tafel 2

Fig. 1: Junger Boden vor dem Rheindeich, Unterboden ohne pedogene Veränderungen; Poren (P) und durchsichtige Körner weiß; LÜLSDORF I; ohne Polarisatoren

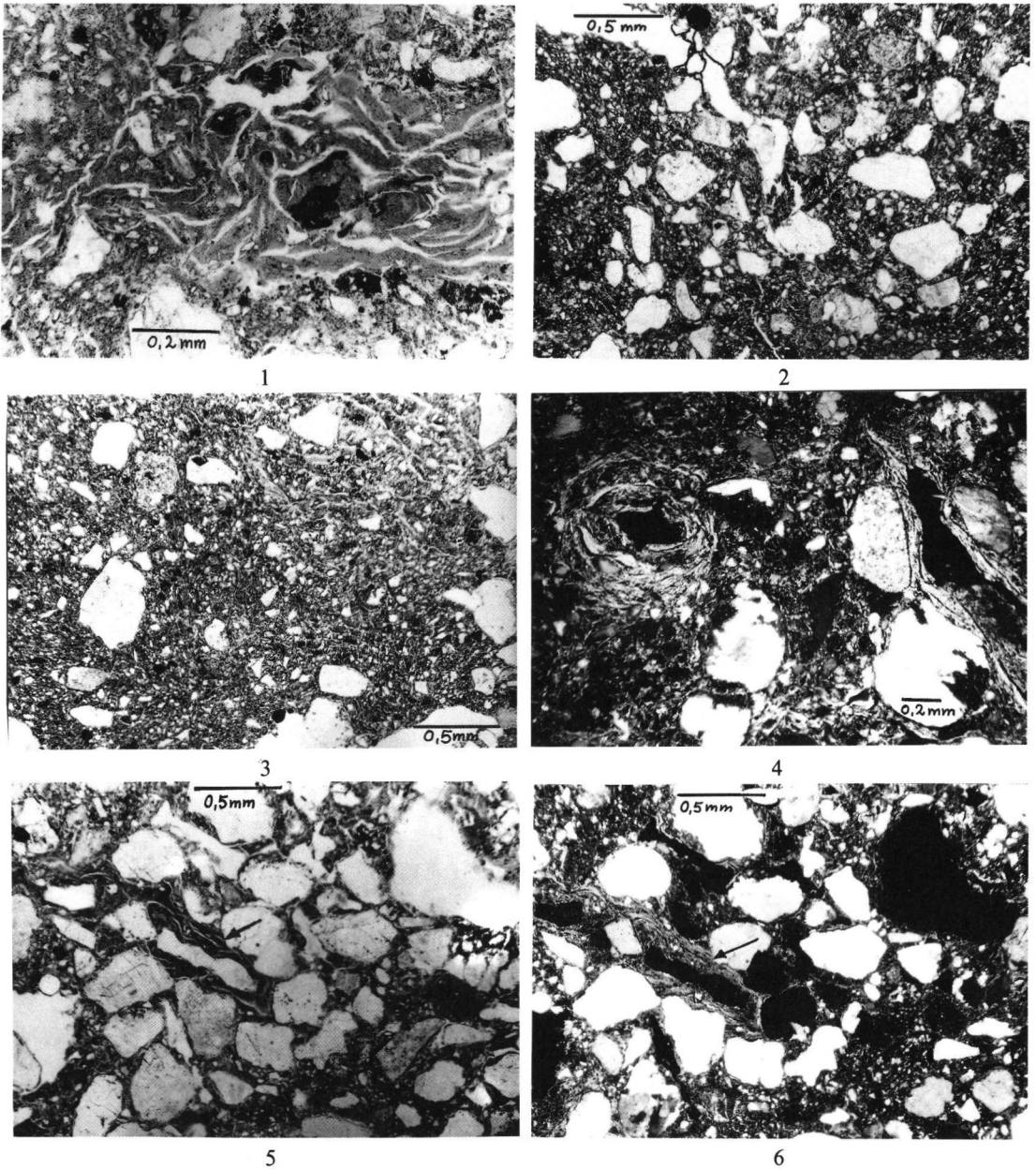
Fig. 2: Bt-Horizont; Poren mit Tonbelägen (P); LÜLSDORF II; ohne Polarisatoren

Fig. 3: Kalkausscheidung um eine Wurzelröhre (W) herum; LÜTTINGEN, 80 cm; ohne Polarisatoren

Fig. 4: Fließton im Sandlückensystem; der eisenreiche Ton erscheint sehr dunkel (Pfeile); BÜDERICH b, 80 cm; ohne Polarisatoren

Fig. 5: Eisenkörnige Tonbeläge und -füllungen (Pfeile); MONDORF a, 60 cm; ohne Polarisatoren

Fig. 6: Eisenumverteilung, Bleichzone um B; Anreicherung vor allem in der linken Bildhälfte; WAHN, 70 cm; ohne Polarisatoren



## Tafel 3

Fig. 1: Fließton-Bereich grau, Poren und durchsichtige Minerale weiß; im Unterboden; ohne Polarisatoren

Fig. 2: Verarmter Oberboden: weniger Feinsubstanz zwischen den hellen Mineralkörnern; gegrubbert; ohne Polarisatoren

Fig. 3: Der Pflug hat Fließton in die Krume gebracht; Fließton z. B. Bildmitte und oben rechts; ohne Polarisatoren

Fig. 4: In den Poren des ohnehin tonreichen Unterbodens ist von oben Fließton eingewandert und umgibt den restlichen Porenraum als längliche, helle Strukturen, Sandkörner hell, Poren schwarz; gekreuzte Polarisatoren

Fig. 5: Im Sandlückensystem intensive Toninfiltration (z. B. Pfeil); Fließtonbeläge dunkel, Mineralkörner und Poren hell; ohne Polarisatoren

Fig. 6: gleiche Stelle, Fließtonbeläge grau, Poren schwarz, Mineralkörner weitgehend weiß; zwischen gekreuzten Polarisatoren