

GÖTTINGER
BODENKUNDLICHE
BERICHTE

11

1969

Im Selbstverlag der Anstalten für
Bodenkunde der Universität Göttingen

Herausgeber: B.Meyer und B.Ulrich

Schriftleitung: H.Scholz

Bestellungen über:

Institut für Bodenkunde, Göttingen, von-Siebold-Str. 4

Institut für Bodenkunde und Waldernährung,
Hann. Münden, Mitscherlichstr. 3

oder den Buchhandel (Gewährung von Wiederverkäufer-Rabatt)

Selbstkostenpreis DM

GÖTTINGER BODENKUNDLICHE BERICHTE

11

1969

Göttinger Bodenkundliche Berichte 11, 1 - 83
(1969)

INHALT

Gebhardt, H., Hugenroth, P., u. Meyer, B. :

Pedochemische Verwitterung und Mineral-Umwandlung
im Trachyt-Bims, Trachyt-Tuff und in den Tuff-
Mischsedimenten der Laacher Eruptionsphase 1 - 83

Hase, D., u. Meyer, B. :

Feuchte-Jahresgang, Wasser-Bewegungen und -Bilanzen
in dicken Würmlöb-Decken und ihren holozänen Böden
(Parabraunerde, Griserde, Feuchtschwarzerde) bei un-
terschiedlichem Grundwasserstand im Raum Niedersach-
sen 85 - 183

Gebhardt, H., Hugenroth, P., u. Meyer, B. :

**Pedochemische Verwitterung und Mineral-
Umwandlung im Trachyt – Bims, Trachyt – Tuff
und in den Tuff – Mischsedimenten der
Laacher Eruptionsphase**

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 11, 1 – 83
(1969)**

G L I E D E R U N G

	Seite
1 <u>ÜBERBLICK UND PROBLEM - STELLUNG</u>	3
1.1 <u>AUSGANGSPUNKT</u>	3
1.2 <u>DIE SEDIMENTE</u>	4
1.2.1 <u>Entstehungs- und Verwitterungs-Zeit</u> .	4
1.2.2 <u>Die Sediment-Typen</u>	5
1.2.3 <u>Verbreitung. Profil-Auswahl</u>	7
1.3 <u>DIE METHODEN</u>	10
2 <u>AUSGANGS- und VERGLEICHS-MATE- RIAL: DER LAACHER BIMS</u>	10
3 <u>GRUNDZÜGE der VERWITTERUNG von "REINEM" BIMS</u>	13
3.1 <u>DAS UNTERSUCHTE PROFIL</u>	13
3.2 <u>BEOBACHTUNGEN zur VERWITTERUNGS-DIFFERENZIE- RUNG innerhalb der UNTERSUCHTEN BIMS-DECKE und ihre URSACHEN</u>	14
3.3 <u>VERWITTERUNGS-INTENSITÄT im LICHT der MINERAL-UMWANDLUNGS-BILANZEN</u>	15
3.3.1 <u>Fremd-Beimengungen</u>	19
3.3.2 <u>Chemische Differenzierung</u>	20
3.3.3 <u>Korngrößen-Umverteilung und Übersicht über beobachtete Mineral-Um- und Neu- bildungen</u>	23
3.3.4 <u>Die mikromorphologischen Umwandlungs- Reihen, I:</u>	24
a) Glas → Kaolinit (Entkieselung)	
b) Plättchen-Allophan → Kaolinit (Aufkieselung)	
3.3.5 <u>Die Tonfraktionen</u>	28
4 <u>DIE VERWITTERUNG von TUFF - MISCH-SEDIMENTEN</u>	31
4.1 <u>CHRONOLOGISCHE IDENTITÄT DER VERGLICHENEN SEDIMENTE</u>	32

	Seite
4.2 <u>FREMDSTOFF-BEIMENGENGEN</u>	33
4.2.1 <u>Die Mengen-Anteile</u>	33
4.2.2 <u>Mineralarten-Zusammensetzung</u>	36
4.2.3 <u>Korngrößen-Zusammensetzung</u>	37
4.3 <u>DER TUFF-ANTEIL und seine VERWITTERUNG</u>	40
4.3.1 <u>Umwandlungs-Zustand der Tuff-Komponente</u>	40
4.3.2 <u>Topographie der Mineral-Umwandlung</u> (Die mikromorphologische Umwandlungs-Reihe:III)	44
4.4 <u>VERWITTERUNG der FREMDSTOFF-BEIMENGENGEN, SPEZIELL der GLIMMER</u>	63
4.4.1 <u>Glimmer-Kaolinit-Umwandlung in den Schluff-Fractionen (lichtmikroskopische Untersuchungen)</u> Die mikromorphologische Umwandlungs-Reihe IV	63
4.4.2 <u>Allophanisierung der Dreischicht-Tonminerale in den Ton-Fractionen (elektronenmikroskopische Untersuchungen)</u>	67
4.4.3 <u>Einfluß der Fremdstoff-Menge auf den Verwitterungs-Grad</u>	73
4.5 <u>DER CHEMISCH-MINERALOGISCHE EINFLUSS VERWITTERNDER BIMS-, TUFF- und MISCHSEDIMENTDECKEN auf UNTERLAGERENDE (bzw. überlagernde) SEDI-MENT-SCHICHTEN</u>	74
5 <u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	76
6 <u>LITERATUR-VERZEICHNIS</u>	79

1 ÜBERBLICK UND PROBLEMSTELLUNG

1.1 AUSGANGSPUNKT

Die Fragestellung, die den hier mitgeteilten Untersuchungen zugrunde liegt, hat sich aus Forschungsarbeiten ergeben, die einem ganz anderen Problemkreis gewidmet waren: Es handelte sich dabei um die Frage nach den Entwicklungsprozessen und dem Entwicklungsstand der Bodenbildung im Alleröd. Es ist dies die bedeutendste der kurzen vorholozänen Bodenbildungs-Phasen, in der aus den spätglazialen Periglazial-Ablagerungen, dem im bodenkundlichen Sinne "frischen Ausgangs-Material", wie Löß, Frost-Wanderschutt, Flugsand etc., die ersten schwach entwickelten "Böden" hervorgingen. Die Kenntnis der allerödzeitlichen Bodenbildung ist insofern von Bedeutung, als die Böden in der auf das Alleröd folgenden jüngeren Tundrenzeit meist nur noch in geringem Maße zerstört wurden und als "präformative Bodenentwicklungsphase" den Ablauf der später einsetzenden holozänen Bodenentwicklung beeinflußt oder vorzeichnet haben können.

Als geeignetes Studienobjekt bieten sich die begrabenen Alleröd-Böden im Bereich und in der Umrandung der Rheinischen Masse an, deren zeitliche Begrenzung nach "oben" an vielen Stellen durch die mächtige Sediment-Decke der trachytischen Asche der Laacher-See-Eruptionen festgelegt ist. Wir nahmen zunächst an, daß die unter den mehrere Meter mächtigen Bims-Decken begrabenen Böden und Sedimente ohne nachträgliche holozäne Veränderungen konserviert worden seien. Im Laufe der angestellten Untersuchungen an den Alleröd-Böden und ihren Ausgangs-Sedimenten wurden wir jedoch belehrt, daß dies nicht der Fall ist. Die in den Bims-Decken ablaufenden Verwitterungs- und Stoff-Abfuhr-Prozesse wirken sich gravierend auf die Unterlage aus, so daß von einer "Fossilierung" im engeren Sinne nicht gesprochen werden kann. Diese Feststellung machte es erforderlich, sich mit den Verwitterungs-Prozessen der Laacher Bims-Ablagerungen auseinanderzusetzen, was in der vorliegenden Arbeit geschehen soll. Die Kenntnis dieser Verwitterungs-Abläufe im Tuff ist darüber hinaus für bodengenetische Betrachtungen im westdeutschen Raum von genereller Bedeutung. Ein erheblicher Teil der allerödzeitlichen Landoberfläche dieses Raumes hat eine m.o.w. starke Beimengung vulkanischer Asche erfahren, die sich bei bodengenetischen Bilanz-Untersuchungen schwer einkalkulieren läßt. Die Ansprache bestimmter Mineral-Neubildungen (wie z.B. Kaolinit, Allophan) als "aschenbürtig" könnte hierbei wichtige Hinweise liefern.

1.2 DIE SEDIMENTE

1.2.1 Entstehungs- und Verwitterungs-Zeit

Die zeitliche Einordnung der Laacher Trachyt-Glas-Eruption geht aus der folgenden von VAN DER HAMMEN et al. (42) aufgrund von Radiocarbon-Daten aufgestellten Zeit-Tabelle hervor (vgl. auch WOLDSTEDT, 45 und LOZEK, 29):

Jüngere Tundren-Zeit		8500 - 9000 v.Chr.
Alleröd - Interstadial	500	9000 - 9500
Bims-Tuff-Eruption		9500 - 9600
Alleröd - Interstadial	200	9600 - 9800
Ältere Tundren-Zeit		9800 - 10000 v.Chr.
Bölling - Interstadial		10000 - 10400 v.Chr.
Älteste Tundren-Zeit		10400 - 18000 v.Chr.

Den fünf Sediment-Schichten der Laacher Eruption wird hier ein Ablagerungs-Zeitraum von nur 100 Jahren zugebilligt. Nach FRECHEN (20) ist "nicht mit einer Tätigkeit der Vulkane über Jahre hinweg zu rechnen, sondern die verschiedenen Ausbrüche geschahen in einem zeitlich sehr eng umrissenen Abschnitt des Alleröds.

Zwischen den einzelnen Bimsstein-Lagen konnten bislang keine Bodenbildungs-Horizonte und auch keine Vegetations-Spuren nachgewiesen werden. Dies deckt sich mit Befunden aus mitteldeutschen Moorbildungen, in denen die Schichten "Laacher-See-Tuff 3 bis 5" ohne Zwischenschaltung von organischem oder anorganischem nicht-vulkanogenem Material unmittelbar aufeinander folgen.

Eine erste pedochemisch-biologische Anwitterung der Pyroklastika konnte sich demnach in der zweiten Hälfte des Alleröds vollziehen. In der vegetationsarmen jüngeren

Tundren-Zeit wurden Bims und Tuff erneut äolisch, solifluidal und fluvial umgelagert (vgl. STÖHR, 38) und mit nicht-vulkanischem Material (z. B. umgelagertem Löß oder anderen lokalen detritischen Gesteins-Materialien) vermischt, in örtlich verschieden großer Mächtigkeit angehäuft und sehr häufig begraben.

Die im folgenden untersuchten Verwitterungs-Erscheinungen der Trachyt-Glas-Ablagerungen sind dann entweder das Ergebnis der holozänen Oberflächen-Bodenbildung - sofern diese den Bims oder den Tuff erreichte - , oder das Ergebnis der holozänen hydrochemischen Tiefen-Verwitterung - wenn das Glas unterhalb der Einwirkungszone der Bodenbildung liegt. Ersteres ist immer bei den lockeren oberflächenbildenden Bims-Decken der Fall, die wegen ihrer Lockerheit selbst bei Mächtigkeiten von über 10 Metern bis zu ihrer Basis von den bodenbildenden Prozessen (z.B. Ton-Verlagerung) durchsetzt werden können. Letzteres ist dann gegeben, wenn Bims oder Tuff in der jüngeren Tundrenzeit von stärkeren kalkfreien oder kalkhaltigen Schluff- oder Lehm-Decken begraben wurden.

Die natürliche holozäne Bodenentwicklung ist ferner sehr häufig durch eine anthropogene, gelegentlich auch natürliche Sediment-Überdeckung unterbrochen oder modifiziert worden.

1.2.2 Die Sediment-Typen

Die Ablagerungen der Laacher Eruptionen zeigen primär eine große Mannigfaltigkeit im Hinblick auf Körnung, Mächtigkeit und Gehalt an Fremd-Beimengungen. Diese hängen z.T. von der Ausblasungs-Phase, weit mehr aber von der Entfernung des Sedimentations-Raumes vom Ursprungs-Ort ab. Sekundär unterscheiden sich die Sedimente durch ihren Verkittungs- und Verwitterungsgrad.

Um bei der bestehenden Vielfalt der petrographischen Begriffe Verwirrungen zu vermeiden, wollen wir uns bei der

Sanidin- und pyroxenhaltiges,
blasiges
TRACHYT-GLAS
"Laacher Bimsstein"

**grobkörnig, locker
geschüttet**

"BIMS"

(Laacher Bims,
lockere poröse
Auswurf-Masse)

**feinkörnige lokale
und/oder fern-trans-
portierte nichtvul-
kanische, äolische
Beimengungen (Fremd-
stoffe)**

**feinkörnig, sekun-
där m.o.w. ver-
festigt (ver-
kittet)**

"TUFF"

grob ↔ fein
(Trachyt-Tuff,
aus Aschen ent-
standen (Glas-
Aschen-Tuff),
stellenweise als
"Traß" Glasanteile
porös

"BIMS - MISCH - SEDIMENT"

"TUFF - MISCH - SEDIMENT"

BMS
"primär"

TMS
"primär"

**können sekundär umge-
lagert sein (fluvial,
solifluidal, äolisch)
und dabei weiteren
lokalen, nicht vulka-
nischen Detritus
(Fremdstoff) aufge-
nommen haben**

BMS
"sekundär"

TMS
"sekundär"

Weitere Modifikationen

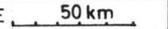
- | | | |
|--------------------|---|------------------|
| fremdstoffreich | ↔ | fremdstoffarm |
| mächtig | ↔ | geringmächtig |
| oberflächenbildend | ↔ | fossil |
| wenig verwittert | ↔ | stark verwittert |

Benennung unserer Untersuchungs-Objekte an das nebenstehende Nomenklatur-Schema halten.

1.2.3 Verbreitung. Profil-Auswahl

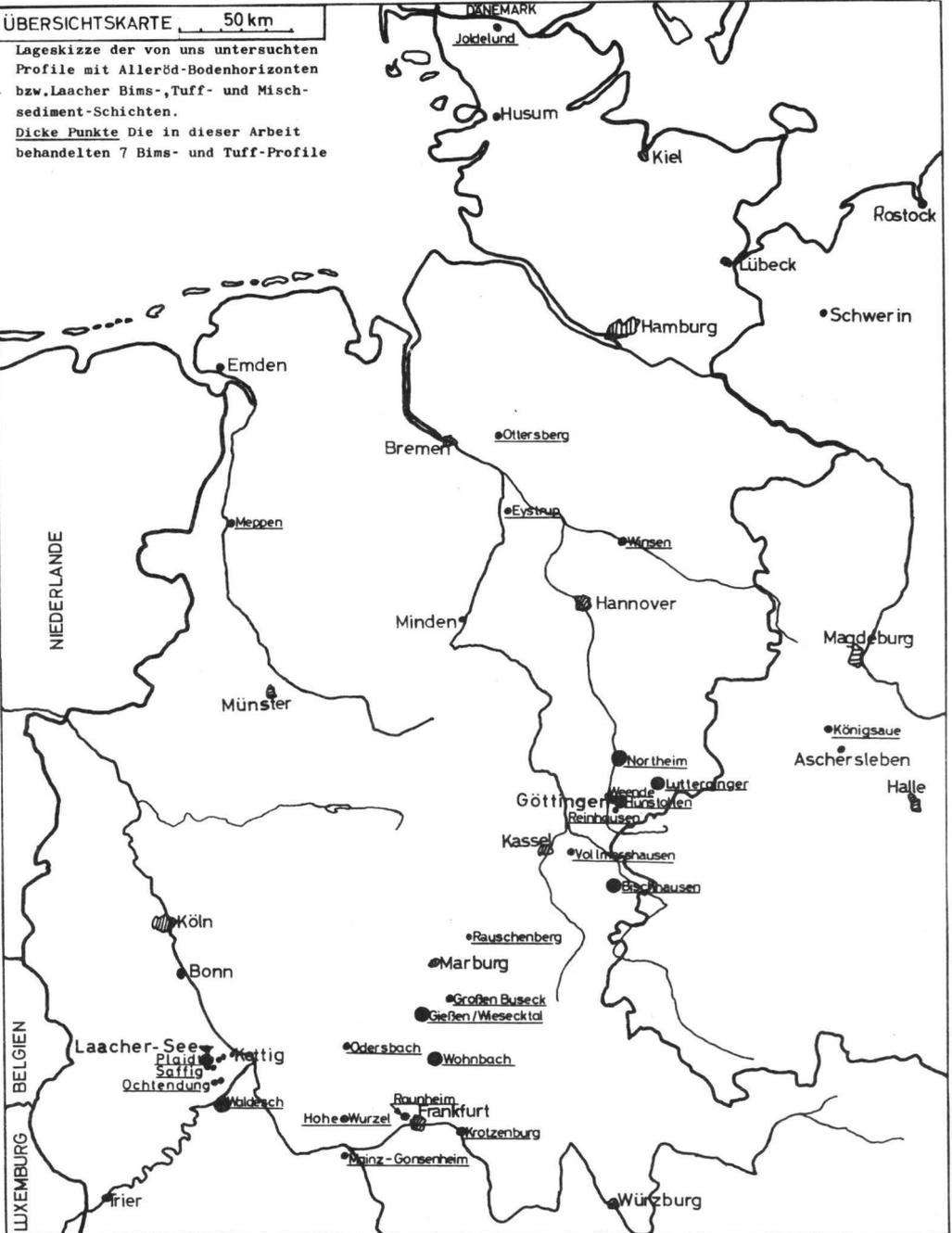
Aus der Kartenskizze sind die in dieser Arbeit behandelten Profile mit Laacher Bims bzw. Laacher Tuff zu entnehmen. Die in Klammern eingetragenen Abbildungs-Nummern beziehen sich auf die Arbeit über die allerödzeitlichen Böden unter Bims (GEBHARDT, HUGENROTH u. MEYER, 24), wo diese Profile schematisch dargestellt werden. Die nichteingeklammerten Angaben beziehen sich auf die vorliegende Arbeit.

Profil 1 (Burgberg/Plaidt) Neuwieder Becken Zentral-Zone	Eine 6 m mächtige, <u>sehr grobkörnige</u> Bims-Decke über Löß, oberflächlich in der jüngeren Tundren-Zeit mit umgelagertem Löß-Material vermischt. Bims bis zur Basis durch Tonverlagerung gebändert. Intakte Bimsbrocken von der Basis dienen als " <u>frisches Bezugs-Material</u> " (Abb. 2)
Profil 2 (Konderbach-Tal) Waldesch/Mosel Mittel-Zone	1 m mächtige Decke von fossilem <u>grobem Bims</u> über Schutt und anstehendem Koblenz-Quarzit. Begraben unter 1 m jungtundrenzeitlicher Hangschutt-Decke. Beispiel für Verwitterungs-Modifizierung durch unterschiedliche Hangwasser-Durchfeuchtung im kalkfreien Milieu. Abb. 1
Profil 3 (Wohnbach) Wetterau Rand-Zone	7 cm-Lage eines fossilen, fremdstoffarmen, grauen Grobtuff-Mischsedimentes über: kalkhaltigem Löß, <u>begraben</u> : unter kalkhaltigem Schwemmlöß-Material mit Schwarzerde A-Horizont - unter Auenlehm. Hydrochemische Tiefen-Verwitterung im Stauwasser - Hydrogen-carbonat-Milieu (Abb. 7)

ÜBERSICHTSKARTE 

Lageskizze der von uns untersuchten Profile mit Alleröd-Bodenhorizonten bzw. Laacher Bims-, Tuff- und Mischsediment-Schichten.

Dicke Punkte Die in dieser Arbeit behandelten 7 Bims- und Tuff-Profile



Profil 4 (Gießen) Wieseck-Tal	10 cm-Lage eines fossilen, <u>mäßig fremdstoff-</u> <u>haltigen grauen Mitteltuff-Mischsedimentes</u> <u>über:</u> sandigem Anmoor mit Torflage <u>begraben:</u> unter mächtigem braunem Schwemm- tuff-Mischsediment - unter schwerem schwach kalkhaltigem Hoch- flutlehm mit Smolnitza - A - Horizont - unter braunem Auenlehm. Hydrochemische Verwitterung im kalkarmen Grundwasser-Milieu.
Rand-Zone	(Abb. 15)
Profil 5 (Hünstollen) Göttingen	10 cm-Schwemm-Lage eines grauen, fossilen <u>fremdstoffarmen Mitteltuff-Mischsedimentes</u> und 30 cm Schwemm-Lage eines gelbbraunen fossilen, <u>fremdstoffreichen Feintuff-Misch-</u> <u>sedimentes</u> <u>über:</u> Alleröd-Rendsina-A aus Kalkmergel- Schutt- und -Schluff, <u>begraben:</u> unter Kalkmergel-Schutt mit 3 holozänen Kalkstein-Braunlehm-Decken in einem dolinenartigen Graben-Einbruch im unteren Muschelkalk. Hydrochemische Verwitterung im Sickerwas- ser-Hydrogencarbonat-Milieu.
Fern-Zone	(Abb. 9)
Profil 6 (Northeim) Leine	10 cm Schwemm-Lage eines fossilen, weißgrau- en, im Grundwasser-Saum befindlichen, <u>fremd-</u> <u>stoffarmen Feintuff-Mischsedimentes</u> <u>über:</u> kalkhaltigem Alleröd-A aus Löß über Niederterrasse <u>begraben:</u> unter entkalktem Auen-Schwemm-Löß unter jungem Auen-Lehm. Hydrochemische Verwitterung im Grundwasser- Hydrogencarbonat-Milieu.
Fern-Zone	(Abb. 6 u. 6a)
Profil 7 (Bischhausen) Hoher Meißner	20 cm dicke Linse eines fossilen, grauen <u>fremdstoffreichen Feintuff-Mischsedimentes</u> im kalkfreien, heute zum Parabraunerde- B ₁ /B _v -Horizont umgewandelten Buntsandstein- Sänd / Löß-Mischsediment. Pedochemische Verwitterung im carbonat- freien B-Horizont-Milieu.
Fern-Zone	(Abb. 8)
Profil 8 (Lutteranger) Untereichsfeld	5 cm starke fossile, graue <u>fremdstoffarme</u> <u>Feintuff-Lage</u> im Torf des verlandeten Lutter- angers, der von STEINBERG (4, 37) pollen- analytisch und vegetationsgeschichtlich untersucht wurde.
Fern-Zone	

Es war unser Bestreben, Profile auszuwählen, in denen der Bims bzw. der Tuff möglichst unterschiedlichen Verwitterungsbedingungen ausgesetzt war. Dabei wurde auf das Vorhandensein oder die Abwesenheit von Ca-Hydrogen-carbonat, auf ein unterschiedliches Feuchte-Regime (Stau-, Grund-, Sicker-, Hangwasser) mit verschiedenen hydrochemischen Eigenschaften und auf den Gegensatz "pedochemische" und "hydrochemische" Verwitterung Wert gelegt. Mit der Vergrößerung des Abstandes der Profile von den Liefergebieten konnten wir bei der Profil-Auswahl die Korngröße (Bims ↔ Tuff) variieren. Die in der Übersicht aufgeführten Profile sind nach zunehmendem Abstand von den Liefergebieten und damit nach abnehmender Korngröße des Glas-Anteiles geordnet. Gleichzeitig wurde auch nach dem Grade der Fremd-Beimischung selektiert.

1.3 DIE METHODEN

Die zur mineralogischen, chemischen und physikalischen Analyse angewendeten Serien-Methoden sind ausführlich in der Arbeit von GEBHARDT, HUGENROTH u. MEYER (24) über die allerödzeitlichen Böden angegeben. Modifikationen und Spezial-Untersuchungen werden - soweit erforderlich - bei der Besprechung der einzelnen Untersuchungs-Objekte im Text laufend mitbehandelt.

2 A U S G A N G S - u n d V E R G L E I C H S - M A T E - R I A L : D E R L A A C H E R B I M S

Zur Beurteilung des Verwitterungs-Zustandes der in dieser Arbeit untersuchten Böden, Boden-Horizonte und Schichten aus Laacher Bims, Tuff und Tuff-Mischsedimenten benötigen wir den Vergleich mit dem unverwitterten Bims, d.h. frischem Trachyt-Glas als dem Ausgangs-Material der Bodenbildung.

Zu diesem Zweck haben wir unter mehreren scheinbar "frischen" Bims-Materialien aus dem Neuwieder Becken diejenige Probe ausgewählt, die wir nach allen durchgeführten Untersuchungen als die am wenigsten verwitterte anzusehen haben. Sie stammt aus dem untersten Abschnitt der ca. 6 m mächtigen Bims-Decke vom Burgberg bei Plaidt.

Wie überall im Neuwieder Becken befindet sich auch hier die Bims-Decke nicht mehr in ihrer ursprünglichen sedimentären Gesteins-Beschaffenheit. Die Perkolation des Sickerwassers reicht von der Oberfläche bis in den unterlagernden Würm-Löß —erkennbar an den zahlreichen horizontalen braunen Infiltrations-Bändern aus Ton, die z.T. aus der den Bims überlagernden jung-tundrenzeitlichen Deckschicht aus Tuff-Löß-Mischsediment gespeist werden. Diese Bänder ziehen sich quer durch die einzelnen, hier bis zu 4 cm starken Bims-Brocken. Meist sammelt sich dabei der Ton im unteren Drittel der Brocke. Die Stärke der horizontal durchlaufenden Bänder wechselt. In breiten Sickerwasser-Trichtern (bis zu 4 m Ø und 15 m Abstand) können sie doppelte bis dreifache Stärke erreichen, während sie zwischen diesen Trichtern ausdünnen. Unsere Probe stammt aus einem Zwischen-Trichter-Bereich mit minimaler Ton-Bänderung und aus einer offensichtlich selten befeuchteten Zwischenbänder-Lamelle. Somit dürfte eine infiltrative, nicht tuffbürtige Fremdmaterial-Beimengung nahezu auszuschließen sein. Das Auffinden solch einer reinen Probe bedurfte einer erheblichen Suche. Wir befürchten daher, daß die zum Teil beträchtlichen Abweichungen, die in Literatur-Angaben über die Zusammensetzung des Laacher-Trachyt-Glases auftreten, wohl meist auf infiltrativen Beimengungen nicht pyrogenen Ton-Materials beruhen, die sich bei der Lockerheit und damit hohen Perkulations-Bereitschaft des Bims selbst noch in großen Tiefen bemerkbar machen.

Die ausgewählte Vergleichsprobe (V) hat glühverlustfrei bezogen folgende chemische Zusammensetzung:

V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Mol SiO ₂	Q
	=										
	57,2	20,4	7,4	7,9	2,4	0,3	0,2	0,4	2,7	Mol Al ₂ O ₃	
										4,75	

Zum Vergleich hiermit stehen uns 14 Analysen von "frischem" Bims der Laacher-See-Eruptionen (FRECHEN, 20) zur Verfügung. Ferner sind in die folgende Übersicht Angaben über die glühverlustfreie durchschnittliche Zusammensetzung von

Syenit, Trachyt und Phonolith (CORRENS, 13) aufgenommen, die unserem Bimsstein als Tiefen- bzw. Erguß-Gesteine entsprechen.

Durchschnitt 14 Proben	57,7	19,8	5,7	7,2	3,5	1,5	0,4	0,6	3,7	4,95
Phonolith	58,0	22,0	5,4	9,7	1,2	0,2	0,1	0,2	0,3	4,52
Syenit	59,4	17,3	4,4	4,4	4,8	2,4	n.b.	1,0	5,8	5,83
Trachyt	62,0	18,0	8,2	3,4	3,1	0,1	n.b.	0,1	4,5	5,88
Sanidin Or ₅₀ , Ab ₅₀	67,0	19,0	8,6	5,6						6,0

Unsere Probe V deckt sich recht gut mit der Durchschnittsanalyse der 14 Bimsproben, doch ist sie etwas K-reicher, dafür aber Erdalkali-ärmer.

Im Dünnschliff ist die Probe V - bis auf die wenigen Sanidin- und Pyroxen-Einsprenglinge - glasig isotrop. Es lassen sich - abgesehen von kleinen Pünktchen - keine regelungs-doppelbrechenden Anwitterungs- oder Infiltrations-Schlieren erkennen.

Ton-Gehalt:

Trotzdem enthält auch diese Probe schon etwas toniges Verwitterungs-Produkt. Durch intensive Auswaschung lassen sich 0,5% Substanz $\varnothing < 2 \mu$ gewinnen.

Wie deren glühverlustfreie chemische Analyse zeigt, ist die abreibbare Fein-Substanz relativ ärmer an SiO₂ und Alkalien,

V _T	46,0	36,0	2,0	n.b.	1,1	n.b.	0,3	n.b.	8,3	2,16
----------------	------	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

relativ reicher dagegen an Al₂O₃ und ganz besonders Fe₂O₃ gegenüber dem Bims-Glas.

Im Gegensatz zu dem röntgenamorphen Glas (mit Feldspat-Einschluß-Peaks bei $3,17/3,21/3,25$) zeigt der Detritus folgende Röntgenbeugungs-Eigenschaften:

1. Wie bei allen anderen im folgenden betrachteten Bimsboden-Tonen ist im Bereich zwischen 7 und 17 \AA eine starke sockelförmige Anhebung der Spektralkurve über die Untergrund-Zählrate zu beobachten.
2. Bei 10 \AA ist eine kleine aber deutliche Reflex-Spitze aufgesetzt, die bei Erhitzen zwischen 100 und 200°C verschwindet. Stattdessen entwickelt sich ein vorher nicht vorhandener schwacher $7,2 \text{ \AA}$ -Reflex, der nach $7,7 \text{ \AA}$ hin verbreitert ist.
3. Als erhitzungsstabil bis $> 600^\circ\text{C}$ erweist sich ein breiter Reflex von $4,43 - 4,48 \text{ \AA}$.

Der Röntgen-Befund zeigt somit ein Überwiegen von amorpher Substanz (deterioriertes Glas, Allophan?), das bereits deutliche Halloysit-Anteile erkennen läßt.

Die ermittelten Q-Werte des Laacher Bims-Glases sind mit $4,7$ bis $5,0$ eigentlich geringer als erwartet. Analog zum Trachyt bzw. Syenit müßten die Q-Werte bei ca. $5,8$ liegen. Die Tatsache, daß alle untersuchten Laacher Bims-Proben unterhalb dieses Wertes liegen, läßt sich nicht durch die Annahme einer überall gleichmäßig starken Verwitterungs-Abfuhr von SiO_2 im genannten Gebiet der Eifel erklären. Vielmehr müssen wir annehmen, daß die ursprüngliche Zusammensetzung der Laacher Pyroklastika bereits Q-Werten von ca. 5 entsprochen hat, d.h. daß die ausgeworfenen Gläser relativ Al-reicher gewesen sind als dem Trachyt entspricht.

3 GRUNDZÜGE DER VERWITTERUNG VON "REINEM" BIMS

3.1 DAS UNTERSUCHTE PROFIL

Am Beispiel begrabener und damit dem direkten Oberflächen-Einfluß entzogener Bims-Decken seien im folgenden einige allgemeine Grundzüge der Verwitterung von Sedimenten aus trachytischem Glas dargestellt. Später sind dann die Modifikationen zu betrachten, die der Verwitterungs-Ablauf durch Beimischungen von Fremd-Substanzen (z.B. Löß) zu den Tuff-Mischsedimenten erfährt.

Für die folgende Betrachtung des holozänen Zersatzes von Tuff haben wir eine 1 m starke Bimsdecke ausgewählt, die einem unterschiedlich starken Hangwasser-Einfluß ausgesetzt gewesen ist.

Lage des Profils: Talstraße Koblenz - Waldesch, im Konderbach-Tal, Straßen-Einschnitt in einer Kurve unterhalb Waldesch, Hangneigung ca. 25°.

Stratigraphie: (von unten nach oben): 1. Alt-tundrenzeitliche oder ältere Hangschutt-Decke mit Oberkoblenz-Tonschiefern bzw. anstehender Koblenz-Quarzit. — 2. ca. 1 m mächtige gleichmäßig geschichtet durchlaufende Bims-Decke. — 3. ca. 1 m mächtige jung-tundrenzeitliche Hangschutt-Auflage aus Tonschiefern mit Schluff-(Löß?)-Beimengung.

3.2 BEOBACHTUNGEN zur VERWITTERUNGS-DIFFERENZIERUNG innerhalb der untersuchten BIMSDECKE UND IHRE URSACHEN

In der lockeren schichtigen Bims-Decke bewegt sich oberhalb der dichten älteren Schutt-Decke oder dem anstehenden Gestein Hangwasser. Je nach der Art der Unterlage, der Reliefposition und der Wasser-Zulieferung ist der Bims permanent feucht oder im Wechsel trocknend. An ständig feuchten Stellen ist der Bims weich, leicht zerreibbar und scheinbar feinkörniger. Die großen Bimsbrocken sind schneidbar und z.T. grusig zerfallend. An den trockenen Stellen ein und derselben Schicht ist der Bims härter, körniger und scheinbar gröber. Im ursprünglichen Ablagerungs-Zustand muß aber die Bimsdecke aufgrund ihres Schicht-Aufbaues an beiden Vergleichs-Stellen völlig gleichartig beschaffen gewesen sein. Die heutige Verwitterungs-Differenzierung beruht somit ausschließlich auf dem modifizierenden Einfluß der unterschiedlichen Durchfeuchtung und damit der Lösungs-Abfuhr bzw. Zufuhr von Substanz. Über die Abfuhr läßt sich aufgrund der visuellen Beobachtungen nichts aussagen. Zufuhr von Ton mit dem Sickerwasser aus der überlagernden lößhaltigen Decke oder mit dem Hangwasser aus höheren Hangpartien ist besonders an den feuchten Stellen wahrscheinlich, da stellenweise Tonbänderung zu beobachten ist.

3.3 VERWITTERUNGS-INTENSITÄT im LICHT der MINERAL- UMWANDLUNGS-BILANZEN

Proben-Vergleich:

"tro" entstammt einer trockenen, körnigen Partie der Bims-
Decke im Konderbach-Tal,

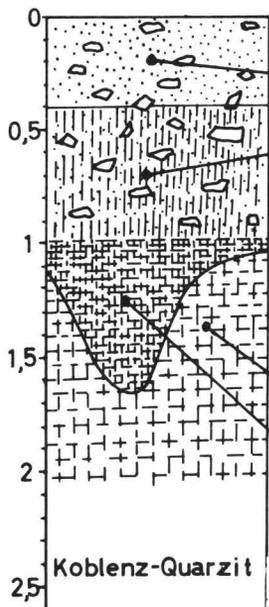
"feu" einer permanent feuchten, weichen schneidbaren Partie
der Bims-Decke.

Der Vergleich der Verwitterungs-Grade soll unter Zuhilfe-
nahme der Abb. 1 der Tabelle 1 (Korngrößen- und Mineral-
arten-Zusammensetzung) und der Tabelle 2 (chemische Analyse)
vorgenommen werden.

Die stärkere Verwitterung der feuchten Probe gegenüber der
trockenen geht aus der dann folgenden Übersicht (Tab. 3)
hervor, die einen Extrakt aus den obengenannten Tabellen
darstellt.

Tabelle 3 zeigt, daß in der feuchten Probe sehr viel mehr
vulkanisches Glas in feinkörnigen halloysit- und kaolinit-
haltigen Allophan-Ton umgewandelt worden ist als in der
trockenen Probe. Gleichzeitig hat sich in der feuchten
Probe das $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Mol-Verhältnis - im folgenden kurz
als "Q" bezeichnet - stärker als in der trockenen Probe
gegenüber dem Ausgangs-Zustand (Probe V) erniedrigt.

Vor der weiteren Diskussion der chemisch-mineralogischen
Daten ist die Frage nach den nicht tuffbürtigen Fremd-Bei-
mischungen zu klären.



Nr.	Horizont	B	A						
			>63 μ	63-36 μ	36-20 μ	20-6 μ	6-2 μ	2-0,6 μ	<0,6 μ
21	Al Hangschutt (jüngere Dryaszeit)	73,5	27,0	23,8	21,0	10,1	18,2		
			50,8			28,3			
22	Bt	51,7	12,2	18,1	17,0	9,6	43,2		
			30,3			52,8			

C	D	E
0	n.b.	2,37
0	n.b.	0,38

Nr.	Horizont	K							
			>63 μ	63-36 μ	36-20 μ	20-6 μ	6-2 μ	2-0,6 μ	<0,6 μ
"tro"	trockener, fester BIMS	79,6	0,6	2,4	5,6	3,7	3,6	4,5	
			8,6			8,1			
"feu"	feuchter, weicher BIMS	24,2	2,0	3,9	8,5	10,7	12,1	38,7	
			14,4			50,8			

E
2,37
2,05

A Korngrößenzusammensetzung % der nichtcarbonathaltigen Mineralanteile < 63 μ (= 100 %)
 B carbonatfreier Feinsand % bezogen auf A = 100
 C CaCO₃ % bezogen auf A = 100
 D Humus % (Cx1,724) bezogen auf A = 100
 E Fe_d % Gesamtboden

F carbonatfreier Sand % (= 100)
 G Korngrößenzusammensetzung % bezogen auf F = 100
 H CaCO₃ % bezogen auf F = 100
 J Humus % bezogen auf F = 100 (Cx1,724)
 K Korngrößenzusammensetzung % (Gesamtboden = 100)
 L Mineralverteilung (Gew.%)

Tab.1 KORNGRÖSSEN - und MINERALARTEN - ZUSAMMENSETZUNG von reinen BIMSVORKOMMEN und TUFF - MISCHSEDIMENTEN (TMS)
(Gew. % bezogen auf den humus - und carbonatfreien Gesamtboden)

Probe	112-630 μ		Feinsand (63-112 μ)						Grobschluff (36-63 μ)						Grobschluff (20-36 μ)							
	GF	Q	F	G	GA	K	T	GF	Q	F	G	GA	K	T	GF	Q	F	G	GA	K	T	GF
"tro"	78,9*	0,03	0,02	0,02				0,6	0,09	0,03	0,02		0,02	0,4	0,6	0,2	0,2	0,1		0,1	1,8	2,4
"feu"	20,1	0,1	0,2	0,1		2,6	0,3	3,4	0,07	0,22	0,02		1,1	0,5	2,0	0,4	0,2	0,3		2,0	0,9	3,9
Gie	16,0	0,01	0,08	0,01	0,7	0,5	0,1	1,4	0,3	0,5	0,1	0,9	0,9	0,2	3,0	8,0	0,9	1,1	2,3	2,3	0,3	15,7
grau	1,3	1,0	1,0	0,2	0,5	0,5	10,0	13,9	0,2	0,4	0,1	0,3	0,4	8,2	10,0	2,1	0,2	0,2	1,3	1,4	12,6	18,3
braun	0,5	0,4	0,5	0,1	1,8	1,9	1,4	6,4	0,2	0,4	0,2	3,0	3,0	2,1	9,2	7,1	0,5	0,4	2,2	2,3	2,1	15,1
Wo	30,0	0,5	0,4	0,3	1,9		6,6	9,9	0,1	0,4	0,2	2,1		4,9	7,8	2,2	0,1	0,3	2,7		9,9	15,4
No	1,6	0,03		0,1		1,1	0,4	1,7	0,2	0,05	0,1		1,1	0,05	1,6	2,0	0,2	0,2		0,9	1,0	4,5
Bi	4,7	10,2	0,5	1,0			2,5	14,4	5,9	0,4	0,6	0,6	0,8	0,6	8,8	10,3	1,6	0,4	1,0	1,3	0,4	14,6
Ei-C	0,9	1,9	0,4	0,3				3,2	7,4	1,9	0,3				11,8	24,5	4,3	2,5				36,1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Probe	Mittelschluff (6-20 μ)							Feinschluff (2-6 μ)							Grobton (0,6-2 μ)							<0,6 μ	Σ	Σ	Σ	
	Q	F	G	GA	K	T	GF	Q	F	G	GA	K	T	GF	Q	F	G	GA	K	T	GF					GF
"tro"	0,5	0,02		0,9		4,2	5,6	0,4	0,03		0,4		2,9	3,7	0,3			0,4		2,9	3,6	4,5	1,5	12,2	5,4	
"feu"	1,5	0,1	0,5		4,7	1,5	8,4	1,3		0,5		3,6	5,3	10,7	0,6			0,6	1,2	9,7	12,6	38,7	4,0	18,2	46,5	
Gie	11,8	0,4		9,2	4,6	2,7	30,5	3,5			12,3		1,4	17,7	1,6			3,8	3,9	1,6	10,9	4,4	25,2	6,3	40,0	
grau	2,0			1,8	1,8	29,1	35,1	1,2			1,2	1,2	7,8	11,6	0,2			0,3	0,4		3,3	4,3	5,1	6,7	71,0	15,9
braun	6,6	0,1		5,7	5,7	5,5	24,6	2,4	0,1		4,5	4,5	2,8	14,7	1,7			6,6	1,1	0,5	1,0	11,1	18,1	18,4	14,9	43,6
Wo	2,0		0,1	4,5		15,9	22,7	0,4			2,9		5,3	8,7	0,1			0,4	0,5		1,8	2,6	3,0	5,3	44,4	17,5
No	3,3	0,1	0,1	5,8		19,9	29,4	3,0	0,1	0,1	4,3		15,5	23,5	0,4			1,3		7,1	8,9	28,9	8,9	44,0	29,4	
Bi	9,7	0,6	0,6	1,8	1,0	2,5	16,2	2,6		0,1	1,9	0,6	1,7	7,1	0,8			3,6	1,1		2,4	8,0	26,2	39,5	10,1	27,3
Ei-C	9,4	1,9	2,1				15,8	1,5	0,3	2,1				4,3	1,3	0,1	3,9				5,3	2,2	46,0		22,1	
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	

* = 112-2000 μ , GF = GESAMTFRAKTION (einschließlich Schwerminerale, Opale und opake Teilchen), Q = QUARZ, F = ALKALIFELDSPÄTE, G = GLIMMER (Biotit, Muskovit und Chlorit), GA = PLÄTTCHEN - ALLOPHAN (n=1,590 überwiegend isotrop), K = KAOLINITISCH - HALLOYSITISCHE MINERALE (n=1,557, schwach doppelbrechend, z.T. zweiachsig negativ), T = TUFF (trachytisches Glas, n=1,510)

A (...Allophan) = $\frac{1}{2}$ GA + $\frac{1}{2}$ K + (GF < 0,6 μ - Fremdbeimischung)

Tab.2 Chem. Zusammensetzung von Bims und TMS (Gew. %)

Probe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	GLÜH- VERL.	MOL-VERH. SiO ₂ :Al ₂ O ₃
"tro"	45,3	21,2	4,7	1,6	2,6					17,6	3,57
"tro"(<0,6μ)	27,8	26,9	1,4	12,2	2,4					19,3	1,77
"feu"	38,6	29,5	2,7	1,2	4,6					18,1	2,21
"feu"(<0,6μ)	36,4	37,0	2,7	3,8	2,4					17,4	1,69
Gie(<0,6μ)	31,0	21,5	1,3	12,0	5,2					17,1	2,48
grau (<0,6μ)	27,8	23,2	1,1	12,3	3,7					22,5	2,0
braun	35,5	25,5	1,8	8,4	5,2					17,9	2,36
Wo(<0,6μ)	11,3	11,3	0,7	23,3	2,3					18,7	1,73
No(<0,6μ)	39,0	26,2	1,5	7,1	4,2					17,1	2,50
Bi(<0,6μ)	44,0	28,2	1,7	2,0	5,1					16,6	2,61
V _T (< 2μ)	40,0	31,8	1,7	1,0	7,2	0,3				12,8	2,16
V	56,0	20,0	7,2	2,3	2,6	0,2	0,4	0,3	7,2	2,1	4,75

Tab. 3: Gegenüberstellung von stark verwittertem feuchten und wenig verwittertem trockenem Bims

Probe	Fraktionen		T _{(Glas)⁺}	A ⁺⁺	$\frac{\text{mol SiO}_2}{\text{mol Al}_2\text{O}_3} = Q$
"tro"	< 0,6 μ	4	?	4	1,77
	0,6 - 112 μ	17	12	2	
	> 112 μ	79	74		
		100	$\underbrace{86 \quad 6}_{92}$		3,57
"feu"	< 0,6 μ	39		31	1,69
	0,6 - 112 μ	41	18	15	
	> 112 μ	20	18	?	
		100	$\underbrace{36 \quad 46}_{82}$		2,21

+) T = Tuff, trachytisches Glas, unverwittert $n = 1,510$ (vgl. TRÖGER, 41) verwittert $n \rightarrow 1,535$, meist mit deutlich erkennbaren Blasen-Räumen. Größere Bims-Brocken (Sand-Fraktionen) sind selbst nach Fe-Extraktion (mit Dithionit) z.T. noch mit Eisenoxid inkrustiert. In krustenfreien Partien kann man als Einsprenglinge Sanidin und Pyroxene erkennen.

++) A = "Allophan", röntgenamorph bzw. kaolinitisch-halloysitische Reflexe, - entsprechend: $n = 1,580 - 1,590$ ("Allophan") bzw. $n = 1,557$ (Kaolinit).

3.3.1 Fremd-Beimengungen

Die nicht aus Glas und nicht aus Allophan bestehenden Gemengteile der verglichenen Bims-Proben machen bei "tro" 8 , bei "feu" 18 aus. Dieser Unterschied geht hauptsächlich auf das Konto des Fein-Tones. In der Schluff-Fraktion wird der überwiegende Teil der Nicht-Gläser und Nicht-Allophane von Bims-Einsprenglingen, d.h. Sanidinen und Pyroxenen

gestellt. Diese zeigen fast noch keine Verwitterung und brauchen daher bei der Verwitterungs-Bilanz keine Berücksichtigung zu finden. Der fremdstoff-bürtige Quarz-, Glimmer-, Opal- und Opak-Gehalt (vgl. Tab. 1) in Schluff-Größe beträgt bei "tro" 2,7% bei "feu" 5,3% und läßt bei "feu" von vornherein etwas mehr Fremd-Beimischung vermuten, doch sind die Differenzen für unsere Bilanz-Betrachtung unerheblich und zu vernachlässigen.

Anders sieht es beim Ton aus. Die geschätzten Fremd-Beimengungen von Quarz-Illit-aufweitbarem Dreischicht-Ton betragen bei "tro" ca. 1 bis 1,5%, bei "feu" dagegen ca. 9%. Dies zeigt, daß an der permanent feuchten Stelle der Bims-Decke mit dem Hangwasser ständig Ton zugeführt sein muß. Es läßt sich damit nicht ausschließen, daß bei "feu" auch der Allophan-Tonanteil nicht vollständig autochthon ist.

Somit läßt sich eine chemische Verwitterungs-Bilanz praktisch nur von der Seite des vulkanischen Glases her berechnen, was im folgenden geschehen soll.

3.3.2 Chemische Differenzierung

Nehmen wir an, daß die in unserer Bims-Decke ursprünglich enthaltene Gesamt-Menge an Aluminium vollständig am Ort verblieben ist - wofür sich später die Berechtigung ergibt - so unterscheiden sich die beiden Vergleichs-Proben "tro" und "feu" durch die im folgenden angegebene Verwitterungs-Differenzierung:

"tro" hat gegenüber dem angenommenen Ausgangs-Zustand einen Gewichts-Verlust von ca. 20% erlitten, der sich wie folgt verteilt: SiO₂ 14%, K₂O 2,9%, CaO 0,9%. Das sind ungefähr 24% der im Ausgangs-Zustand vorhandenen SiO₂ und ca. 1/3 des K₂O und CaO. Durch die Abfuhr von Kieselsäure ist Al freigesetzt worden, das nicht in oxidischer Form, sondern als Allophan abgeschieden worden ist, wobei weitere Mengen an zusätzlich mobilisierter SiO₂ zur Verfügung gestanden haben müssen. Eine Aufrechnung ergibt, daß theoretisch 27

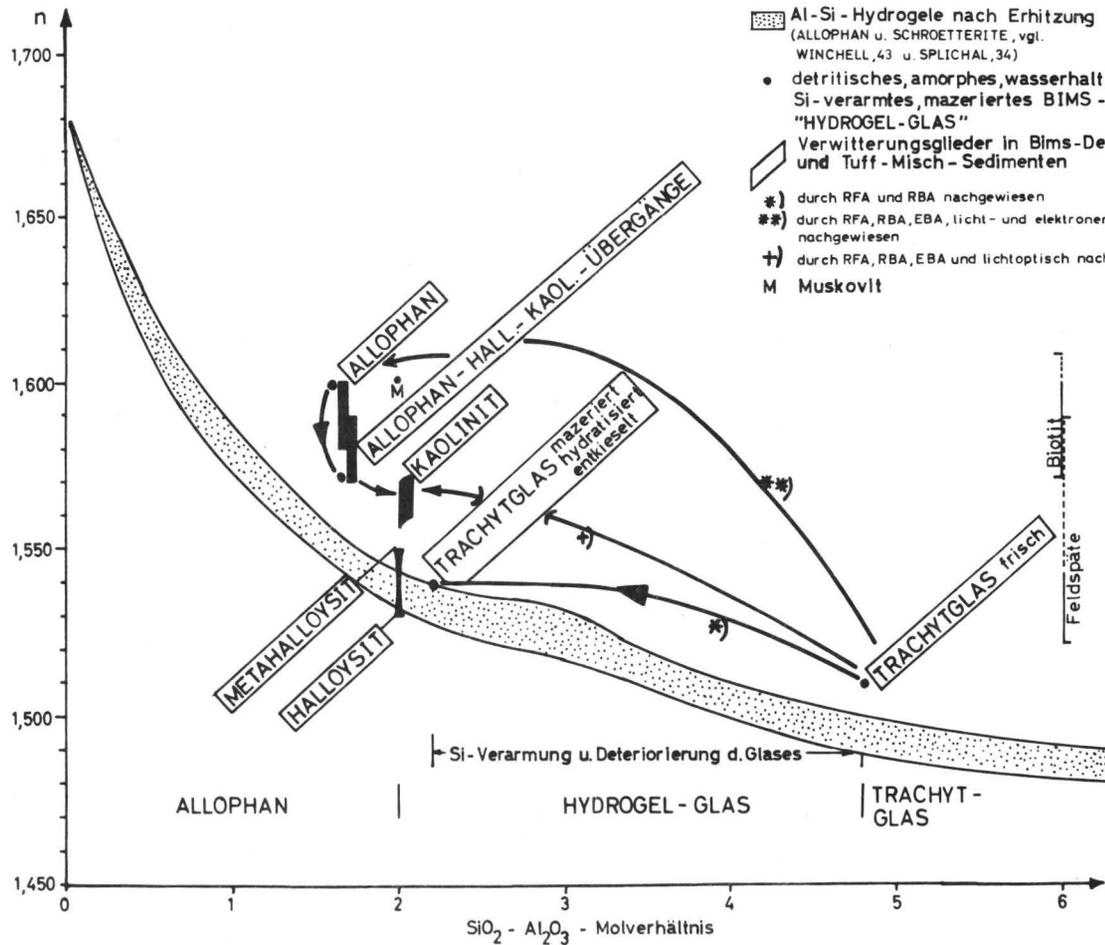
Gewichts-Anteile an Allophan in der heutigen Probe vorliegen müßten, wenn das neben dem Allophan erhalten gebliebene Glas seinen ursprünglichen Q-Wert beibehalten hätte. Tatsächlich sind aber nur 6% Allophan gebildet, während das Glas seinen Q-Wert von 4,75 auf 3,8 erniedrigt hat. Es ist also nur relativ wenig Allophan gebildet worden, dagegen aber ein erheblicher Teil des Glases an SiO_2 verarmt, hydrotisiert, deterioriert und mazeriert worden. Es erfolgt also zunächst eine Umwandlung zu "Hydrogel-Glas", dessen Q-Werte zwischen 4,75, dem des frischen Glases, und 2,16, vgl. die Glas-Detritus-Probe vom Burgberg bei Plaidt in Tab. 2, liegen können.

Diese Abgrenzung von "Allophan" und "Hydrogel-Glas" (vgl. hierzu Abb. 2) ist willkürlich und hängt davon ab, bei welchem Q-Wert oder bei welchem Lichtbrechungswert man die "Allophane" beginnen läßt. Aufgrund unserer später noch zu behandelnden mikromorphologischen Verwitterungs-Studien sollen hier lediglich diejenigen amorphen Bestandteile "Allophan" heißen, deren n größer und deren Q-Wert kleiner als beim Kaolinit (bzw. Metahalloysit/Halloysit) ist. Man vergleiche hierzu die in Abb. 2 dargestellten Q/n - Beziehungen. Die zwischen dem frischen Glas und dem Allophan stehenden amorphen Verwitterungs-Produkte werden als "Hydrogel-Glas" bezeichnet.

"feu" zeigt bei der chemischen Analyse eine wesentlich stärkere Verwitterung als sie aufgrund des äußerlich gegenüber "tro" kaum veränderten Gefüges zu erwarten war.

Die volumenmäßige Betrachtung der Analysen-Ergebnisse stellt folgendes klar: Als zugeführte Substanz kommt ausschließlich die überwiegend aus Dreischicht-Tonmineralen der überlagerten Schutt-Decke bestehende Ton-Substanz in Betracht; Allophan ist entweder in gleichen Mengenanteilen zu- oder abgeführt worden - was sich chemisch nicht nachweisen läßt. Mikromorphologisch und bilanzrechnerisch ist jedoch festzustellen, daß außer Dreischicht-Ton-Anreicherung keine Ab- oder Zufuhr von kolloidalen Bims-Verwitterungs-Produkten stattgefunden hat. Bei den folgenden Berechnungen ist die zugeführte Ton-Menge in Abzug gebracht worden.

Der Gewichts-Verlust ist mit 40% doppelt so hoch wie in "tro". Er verteilt sich zu 31% auf SiO_2 , 5,3% auf K_2O und 1,5% auf CaO . Durch Lösungs-Abfuhr sind damit ca. 54% der ursprünglichen Bims- SiO_2 - (das doppelte wie bei "tro") - 73% des K_2O und 62% des CaO verloren gegangen. Theore-



tisch hätten dabei aus dem Lösungs-Rückstand 58,7 Teile Allophan gebildet werden können. Tatsächlich sind nur 46 Teile Allophan entstanden, aber das residuale Bims-Glas ist in der gleichen Weise an SiO_2 verarmt wie bei "tro". Sein Q-Wert ist auf 3,6 gesunken.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß trotz unterschiedlich starker Entkieselung des Bims-Glases bei "tro" und "feu" die Verwitterung in derselben Richtung verläuft: Neben der Bildung verschieden großer Mengen an Allophan wird das gesamte Glas potentiell entkieselte und in Hydrogel-Glas überführt.

3.3.3 Korngrößen-Umverteilung und Übersicht über beobachtete Mineral-Um- und Neubildungen

Tabelle 1 bereits läßt den mit zunehmender Verwitterung eintretenden Zerfall der Glas-Bruchstücke von Sandgröße zu Schluff und Ton erkennen, der mit einer gleichzeitigen Umwandlung zu SiO_2 -ärmerem Hydrogel-Glas sowie Allophan - Halloysit-Kaolinit-Übergangs-Produkten und Kaolinit einhergeht.

Tabelle 1 zeigt, daß bei der Verwitterung viel Glas in die feineren Fraktionen übergeht. Dessen Brechungswerte steigen mit abnehmender Korngröße und abnehmendem SiO_2 -Gehalt von 1,510 auf 1,535 an. Die Gruppe "T" umfaßt sowohl frisches Bims- wie auch Hydrogel-Glas.

Bei "tro" liegt das Glas-Kornverteilungs-Maximum im Mittelschluff, bei "feu" im Grobton. Vermutlich tritt auch in den feineren Tonfraktionen noch detritisches Glas auf, doch konnte es hier nicht mehr anhand der Lichtbrechungs-Werte optisch nachgewiesen werden. Soweit es hier noch vorhanden ist, würde es unter die Sammelbezeichnung "Allophan" ("A") fallen.

In "tro" finden sich als spärliche Neubildungen von 20 μ

Durchmesser an abwärts blättchenförmige Allophane mit der Lichtbrechung $n = 1,570$ bis $1,590$ - entsprechend SiO_2 -Gehalten geringer als Kaolinit (vgl. Abb. 2), die röntgen- und elektronenamorph sind und diese Eigenschaft erst langsam beim Übergang zum Kaolinit verlieren.

Die Gläser und die letztgenannten Plättchen-Allophane sind Ausgangsminerale für die Kaolinit-Entstehung und werden daher im folgenden Absatz noch ausführlicher behandelt. Im stärker verwitterten "feu" fehlen diese Plättchen-Allophane fast ganz. Obwohl diese Plättchen-Allophane optisch noch isotrop erscheinen, zeigen ca. 80 % unter dem Elektronen-Mikroskop bereits Elektronen-Beugungs-Bilder, womit sich die beginnende Umkristallisation andeutet.

Statt der Plättchen-Allophane treten in allen lichtoptisch zugänglichen Fraktionen von "feu" Plättchen und verschobene oder tonige Plättchen-Stapel von Kaolinit auf, der sein Maximum in der Mittel-Schluff-Fraktion hat.

Auf allen Mineral-Oberflächen finden sich ferner häufig punktförmige Abscheidungen von reinem Opal mit der Lichtbrechung $n = 1,44$ bis $1,46$ (s.a. TRÖGER, 4i) die ein Zeichen für die Mobilität der Kieselsäure sind.

3.3.4 Die mikromorphologischen Umwandlungs-Reihen, I:

- a) Glas \longrightarrow Kaolinit (Entkieselung)
- b) Plättchen-Allophan \longrightarrow Kaolinit (Aufkieselung)

Trachyt-Glas \longrightarrow Kaolinit-Umwandlung (Desilifikation)

In Tabelle 1 sind die Gehalte der Schluff-Fractionen an "T" (Glas) und "K" (Kaolinit) aufgeführt. Die mineralogischen Untersuchungen zeigen einen kontinuierlichen Übergang vom Glas zum Kaolinit, so daß die Abgrenzung nicht ganz scharf ist.

Die Verwitterungs-Abfolge vom Trachyt-Glas zum Kaolinit ist in Abb. 3, Reihe I in 4 morphologischen Stufen eines ca. 50 μ \emptyset großen Glas-Teilchens, z.B. eines Wandbereich-Stückes des Bims dargestellt. Die Stufen 1 und 2 sind in Tab. 1 noch als "T" (Glas), die Stufen 3 und 4 bereits als "K" (Kaolinit) eingeordnet. Die Identifizierung des Kaolinitis ist anhand des Lichtbrechungswertes (Phasenkontrast) von $n = 1,557$ (s.a. GEBHARDT u.a., 23) und anhand der übrigen optischen Daten (Polarisationsmikroskop), $2v = 42^\circ \theta$ möglich.

Stufe 1 stellt das intakte Trachyt-Glas mit $n = 1,510$ und Blasenräumen dar, die teils mit Luft, teils mit Einbettungs-Flüssigkeit gefüllt sind.

Stufe 2 zeigt eine randliche Umwandlung des Glas-Stückchens zu Kaolinit ($n = 1,557$), der diffus in das Glas übergeht, und nach außen den für Kaolinit im Phasenkontrast-Verfahren typischen gelb-roten Farb-Saum zeigt (SALGER, 32). Ein Teil der Blasenräume ist mit Al-reichem Allophan ($n = 1,600$) gefüllt.

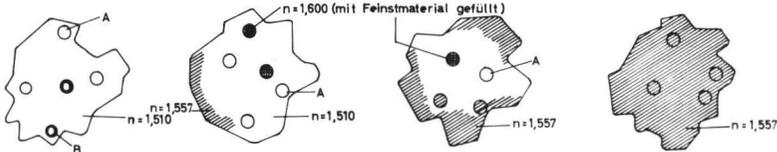
Stufe 3 Die Umwandlung zu Kaolinit schreitet vom Rand her weiter nach innen vor. Auch die Blasenräume können Ausgangspunkt der Kaolinitisierung sein. Sie füllen sich mit Kaolinit, sofern sie noch leer waren. In diesem Stadium sind in den breiteren Säumen schon gute Achsenbilder erhältlich.

Stufe 4 Das gesamte Glasteilchen ist in Kaolinit umgewandelt.

Der geschilderte Prozeß ist an den durch die mechanische Vorbehandlung oder allein durch Mazeration aus dem Bims-Verband herausgelösten schluff-großen Glas-Teilchen zu beobachten, was noch nichts über den natürlichen Ort der Umwandlung aussagt. In der trockenen Probe "tro" sind 12,3 % Teilchen zwischen 2 und 63 μ \emptyset vorhanden. Davon sind 9,3 % Glas, d.h. es handelt sich fast nur um die Umwandlungsstufen 1 und 2, höchstens 3, In "feu" sind dagegen 25% Teilchen 2 bis 63 μ vorhanden. Davon sind 8,2% Glas und 11,4% Kaolinit der Stufen 3 und 4. Allerdings ist nicht der gesamte Schluff-Kaolinit allein auf dem direkten Weg durch fortschreitende

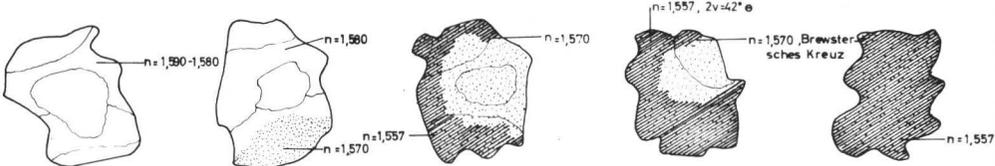
Abb. 3 MINERALUMWANDLUNGEN IN BIMS UND TUFF - MISCHSEDIMENTEN

Reihe I: GLAS→KAOLINIT - REIHE



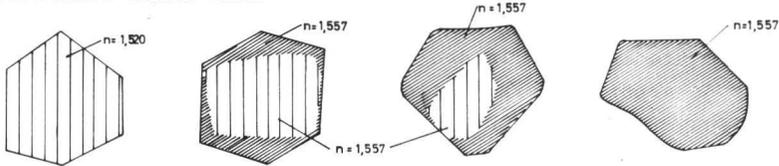
Stufe 1: Vulk. Glas, $n=1,510$
 A=mit Einbettungsflüssigkeit (B=mit Luft) gefüllte Blasenräume
 Stufe 2: Vulk. Glas, Kaolinitisierung beginnend
 Stufe 3: Vulk. Glas, periphere Bereiche und Blasenräume kaolinitisiert
 Stufe 4: Kaolinit ($n=1,557$, $2v=42^\circ \ominus$)

Reihe II: PLÄTTCHEN - ALLOPHAN→KAOLINIT - REIHE



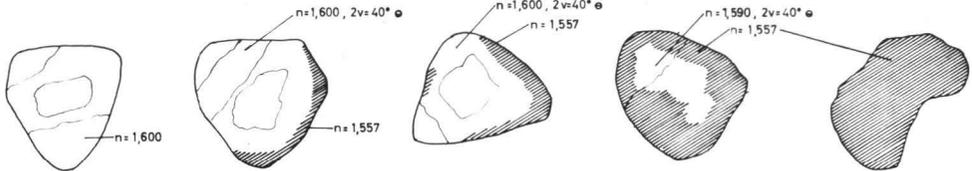
Stufe 1: Allophan (glimmerähnliches Mineral) (elektronenamorph)
 Stufe 2: Allophan (glimmerähnliches Mineral) Sprengung beginnend
 Stufe 3: Allophan (glimmerähnliches Mineral) Kaolinitisierung beginnend
 Stufe 4: Allophan (glimmerähnliches Mineral) randlich stark kaolinitisiert
 Stufe 5: Kaolinit

Reihe III: FELDSPAT→KAOLINIT - REIHE



Stufe 1: Feldspat (Sanidin) $n=1,520$
 Stufe 2: Feldspat (Sanidin), peripherer Bereich kaolinitisiert
 Stufe 3: Feldspat (Sanidin), fast ganz in Kaolinit übergegangen
 Stufe 4: Kaolinit ($n=1,557$, $2v=42^\circ \ominus$)

Reihe IV: GLIMMER→KAOLINIT - REIHE



Stufe 1: Muskovit ($n=1,600$, $2v=40^\circ \ominus$)
 Stufe 2: Muskovit mit beginnender Kaolinitisierung
 Stufe 3: Muskovit, Kaolinitisierung fortgeschritten
 Stufe 4: Muskovit, überwiegend kaolinitisiert
 Stufe 5: Kaolinit ($n=1,557$, $2v=42^\circ \ominus$)

90 μ n = mittlerer Brechungsindex (bei Schichtsilikaten Werte zwischen n_A und n_B)

Desilifikation unmittelbar aus dem Glas hervorgegangen. Kaolinit kann auch auf dem im folgenden dargestellten Umweg über Al-reiche Allophane durch Resilifikation entstehen.

Plättchen-Allophan → Kaolinit-Umwandlung (Resilifikation)

- Stufe 1 Völlig röntgen-, elektronen- und lichtoptisch amorpher Plättchen-Allophan, $n = 1,580 - 1,590$, mit lamellärem Aufbau, "glimmerförmig"
- Stufe 2 Randpartien des Plättchen-Allophans zeigen Sprenkelung durch Abscheidungen feinstkörnigen Materials und Absenkung der Lichtbrechungs-Werte auf $n = 1,570$ (SiO_2 -Zufuhr). Die gesprenkelten Partien zeigen bereits Elektronen-Beugungsbilder, die hexagonale Strukturen erkennen lassen.
- Stufe 3 Die Sprenkelung erfaßt das ganze Teilchen, welches jetzt fast durchweg im Elektronen-Mikroskop hexagonale Strukturen erkennen läßt, optisch aber noch isotrop ist. Randlich beginnt die Kaolinitisierung mit weiterer Absenkung des Brechungs-Index n auf $1,557$ (weitere Aufkieselung).
- Stufe 4 Der gesprenkelte Restbezirk zeigt jetzt öfter zusätzlich zu den übrigen optischen Erscheinungen ein m.o.w. vollständiges Brewster'sches Kreuz. Dies scheint durch schwache Doppelbrechung der Mineral-Substanz bei gleichzeitiger circulärer Aufkippung von Schüppchen bedingt zu sein und ist eventuell dem Halloysit zuzuordnen. Der halbkreisförmige kaolinitische Teil läßt bereits deutlich die Achsenwinkel des Kaolinitis erkennen.
- Stufe 5 ist ein vollständig in Kaolinit übergegangenes Plättchen-Allophan-Teilchen.

Der Mengen-Anteil von Plättchen-Allophanen im Schluff ist im Vergleich zum Glas sehr gering. Im wenig verwitterten "tro" sind die unterhalb $20 \mu \varnothing$ häufiger zu finden (Stufen 1, 2 und 3), während sie in "feu" fast ganz fehlen und nur noch

in Form der Stufen 4 und 5 auftreten und daher den "Kaoliniten" zugeordnet sind.

3.3.5 Die Ton-Fractionen

Die mineralogische Zusammensetzung der Grobton-Fraktion (2 - 0,6 μ) und der "Feinton"-Fraktion (<0,6 μ) wurde aufgrund der Röntgen-Beugungs-Analyse geschätzt. Eine Übersicht über die Unterschiede zwischen "tro" und "feu" gibt Tab. 4.

Tab. 4: Geschätzte Anteile der Ton-Komponenten im Bims-Zersatz

"tro"		"feu"		
2-0,6 μ	< 0,6 μ	2-0,6 μ	< 0,6 μ	
1	0,5	1	0,5	Fremdbeimengung an Quarz
2	0	2	2	Fremdbeimengung von Illit und etwas aufweitbaren Dreischicht Ton-Mineralen
10	10	10	10	Amorph
2	0	1	1	Kaolinit (Vorhandensein von 7,17 Å-Reflexen)
3	2	4	4	Metahalloysit (mit I (7,4) = 60, I (4,43) = 100), mit Rest-Wasser 7,7 bis 10 Å
3	1	4	3	Halloysit (hauptsächlich durch breites Wechsellagerungs-Band zwischen 10 und 7,7 Å gekennzeichnet.)

Sehen wir von den bereits besprochenen Fremdstoff-Beimengungen ab, so gleichen sich die Proben hinsichtlich der Dominanz an amorphen "Allophan"-Ton mit $Q \approx 1,7$. Imogolit (vgl. 25, 26, 43) ließ sich in keiner der von uns untersuchten Bims-, BMS- und TMS-Proben nachweisen.

In Abb. 4 ist eines jener typischen Allophan-Teilchen abge-

bildet, die z.B. in "tro" die Masse des Allophan-Tones stellen. Es handelt sich meist um lappig-fladige Körper, deren Peripherie meist zu zerfließen scheint. Die Oberfläche zeigt häufig wulstige bis netzförmige Strukturen. Das abgebildete Teilchen ist elektronen-amorph. Nur etwa 20% solcher Allophan-Teilchen sind jedoch nur amorph, während etwa 80% bereits - ähnlich wie in der Schluff-Fraktion - Elektronen-Beugungs-Bilder aufweisen, die hexagonale Gitter-Strukturen andeuten. Die Kaolinite sind sowohl aufgrund ihres mehr blättchenförmigen scharfkantigen Habitus als auch aufgrund ihrer guten Beugungs-Bilder klar von diesen Allophan-Teilchen zu unterscheiden. Mitunter ragen scharf hexagonal begrenzte elektronen-anisotrope Kaolinit-Plättchen aus der elektronen-amorphen Masse größerer Allophan-Körper heraus.

Untergeordnet zeichnen sich in allen Fraktionen die noch wenig ausgeprägten Röntgenreflexe des Metahalloysits und Halloysits ab, während der Kaolinit sehr schwach vertreten ist und in der Feinton-Fraktion der wenig verwitterten Probe "tro" noch ganz fehlt.

Beim Erhitzen bis 300°C schrumpfen alle Restwasser-Metahalloysit-Reflexe $> 7,4 \text{ \AA}$ auf ein Kaolinit-Metahalloysit-Reflexband (7,15 bis 7,4 \AA) zusammen. Zwischen 400 und 500°C verschwindet dieser Reflex, während sich der Metahalloysit-Kaolinit-Reflex $d_{020} = 4,43$ bis 4,48 \AA erst oberhalb 600°C auflöst (vgl. BROWN, 12).

Durch Behandlung des Tones mit 0,5 n NaOH (5 Min. Kochdauer, Abschreckung in Eiswasser) und Abfiltrieren der aufgelösten Allophan-Substanz läßt sich trotz Verbesserung der Teilchen-Orientierung keine Erhöhung und Verschärfung der Röntgen-Reflexe erzielen. Der Kristallisationsgrad der nicht aus Allophan bestehenden Ton-Substanz muß daher als sehr gering und unregelmäßig angesehen werden. Obwohl sich im Elektronen-Mikroskop erhebliche Anteile der Tonfraktion als in Kristallisation begriffen ausweisen (s.o.), ist im Röntgen-Beugungs-Diagramm davon noch nichts zu erkennen.

Abb. 4 :

Elektronenmikroskopische Aufnahmen
von Allophan und
Kaolinit aus der
Ton-Fraktion von
verwittertem Bims.

Allophan

Bildbreite $0,8 \mu$



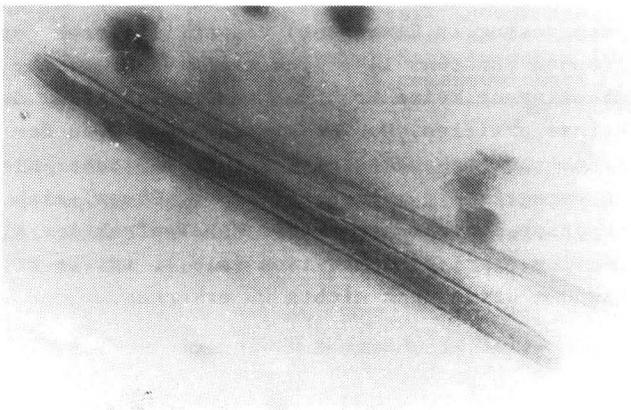
Halloysit

Bildbreite $0,3 \mu$



Halloysit

Bildbreite 1μ



Als untergeordneter und ebenfalls häufig mit dem Allophan vergesellschafteter Gemengteil ist in der stärker verwitterten Probe "feu" unter dem Elektronen-Mikroskop Halloysit in gut ausgebildeter Röhren-Form anzutreffen (vgl. Abb. 4), die bis zu 2 μ Länge erreichen.

Wie wir bereits in den Schluff-Fractionen mikroskopisch erkennen konnten, zeichnet sich auch in den Ton-Fractionen eine Tendenz der Verwitterungs-Umbildung ab, die einmal zu Produkten führt (Allophan), die Al-reicher als Kaolinit, Halloysit und Metahalloysit sind, die zum anderen die Bildung der genannten Zweischicht-Tonminerale ermöglichen. Die Wege auf denen dieses geschieht sind hier jedoch im Gegensatz zu der optischen Untersuchung der Schluff-Fractionen nicht zu erkennen, doch ist es wohl gerechtfertigt, ähnliche Sequenzen der Umwandlung anzunehmen.

4 DIE VERWITTERUNG VON TUFF - MISCH - SEDIMENTEN

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Bims-Decke aus dem Konderbach-Tal als Beispiel für einen "reinen" Bims angesehen. Ihre Verwitterungs-Produkte wurden als typisch für fremdstoff-freie Bims-Ablagerungen hingestellt. Dies ist nicht ganz korrekt: Bei "tro" enthält der Bims ca. 4%, bei "feu" ca. 14% Fremd-Beimengungen. Bei "tro" sind die gesamten 4% als primärer Fremdstoff-Anteil dem Bims während der Sedimentation beigemischt worden. Bei "feu" sind es etwa 8%, während hier die restlichen 6% als tertiäres Beimischungs-Produkt während der Boden-Bildung durch Ton-Infiltration zugeführt wurden. Es handelt sich demnach auch bei diesen der "Zentral-Zone" der Bims-Ablagerung angehörenden Sedimenten im Grunde genommen bereits um "Misch-Sedimente" (BMS). Lediglich die mächtigen Decken wie bei Plaidt (V) können als "rein" bezeichnet werden.

Wir wollen uns im folgenden den Tuff-Misch-Sedimenten (TMS) zuwenden. Diese enthalten im Gegensatz zu den reinen Tuffen Fremdstoff-Beimengungen, die andere Mineralarten beisteuern. Dieser Umstand läßt vermuten, daß dadurch zusätzliche Verwitterungs-Einzelprozesse und Neubildungen ermöglicht werden.

Eine tabellarische Übersicht über die in den folgenden Abschnitten behandelten TMS-Profile wurde bereits unter Punkt 1.2.3 gegeben. Ihre Lage ist aus der beigefügten Karten-Skizze zu entnehmen. Alle hier behandelten TMS sind als Sediment-Schichten eingebettet zwischen Ablagerungen des Spätpleistozäns (jüngere Tundren-Zeit mit Alleröd-Boden) als Liegendem, und jungtundrenzeitlichen Sedimenten als Hangendem. Profil-Skizzen mit den Analysen der Sediment-Folgen finden sich bei GEBHARDT et al., 24).

Zur Identität der ausgewählten fossilen Tuff-Schichten ist folgendes auszuführen:

4.1 CHRONOLOGISCHE IDENTITÄT DER VERGLICHENEN SEDIMENTE

Über die Verbreitung der Tuffe hat AHRENS (1, 2, besonders 3) berichtet. FRECHEN (18, 19, 20) teilt Untersuchungen an Tuffen aus verschiedenen Gebieten Deutschlands mit. Schon BRAUNS (10, 11) weist 1868 auf Bims in der Umgebung von Marburg hin. ROTH (31) beschreibt Tuffe aus der Umgebung von Gießen. SCHÄFER (33) weist deren Abstammung aus Vulkanen der Eifel nach. AHRENS und STEINBERG (4) nehmen an, daß der Tuff vom Luttersee bei Göttingen aus dem Vulkangebiet des Laacher-Sees stammt. FRECHEN (20) stellt schließlich die Identität des Tuffs vom Luttersee mit dem des Laacher-See-Gebietes fest und konnektiert wie folgt: Im Luttersee handelt es sich um die Schichten L-S-T 3 und L-S-T 4. Die grauen Tuffe der Schicht L-S-T 5 findet er bei Frankleben/Saale wieder. Nach FRECHEN stimmt die verbreitete graue Tuff-Lage der mitteldeutschen Vorkommen in ihrem Mineral-Gehalt mit den feinen grauen Tuffen L-S-T 5 des Laacher-See-Gebietes überein. Die in Mitteldeutschland verfolgbaren Teilschichten L-S-T 3 und L-S-T 5 der Laacher Bims-Decke bilden auch im westlichen Vogelsberg, sowie bei Marburg und Gießen die dort bekannten Bims-Vorkommen. FRECHEN (18) führt ferner den Beweis, daß die Laacher Bims-Decke mit den mitteldeutschen Alleröd-

Staubbändern gleichaltrig ist. Mit dem Bims vom Luttersee und dem von Frankleben identisch und damit auch mit dem Laacher-See-Tuff identisch sieht FRECHEN (18) die Tuffe der bekannten Aufschlüsse von Wallensen/Hils und vom Ascherslebener-See, Grube Georg an. Man kann nach diesen Ausführungen wohl annehmen, daß eine Verwechslung mit anderen Tuff-Bändern ausgeschlossen erscheint, zumal alle unsere Proben aus Gegenden stammen, die von den obengenannten Autoren behandelt wurden und in denen jene Tuffe aus dem Laacher-See-Gebiet eindeutig nachgewiesen sind. Die Liste der mineralogisch identifizierten Tuff-Vorkommen setzt sich mit den von FRECHEN (18, 20) beschriebenen Vorkommen vom Erlenbruch-Moor bei Hinterzarten fort (Schicht L-S-T 3 und L-S-T 4, im Mineralgehalt jedoch Verwandtschaft mit der Haupt-Britzbank der Laacher-See-Eruption). Ein weiteres Vorkommen ist auf der Frechen'schen Karte bei St. Blasien eingezeichnet. STÖHR (38) berichtet über Vorkommen im Hunsrück und BECKER (6) über solche im Gebiet des Oberrheintales. Ein Vergleich unserer Proben mit den bei Frechen angegebenen Daten gestattet uns folgende Zuordnung zu den im Frechen'schen Gliederungs-Schema angeführten Schichten der Laacher-Eruptionen: Lutteranger L-S-T 5, Hünstollen und Northeim L-S-T 3 und L-S-T 4, Bischhausen L-S-T 3, Wohnbach und Gießen L-S-T 3 und L-S-T 5. Plaidt vermutlich Meer-Boden-Tuff, L-S-T 1 und L-S-T 2 und Konderbach-Tal vermutlich L-S-T 1.

4.2 FREMDSTOFF-BEIMENGUNGEN

Die Menge und die Art der Fremdstoff-Anteile in den TMS kann eine erhebliche Rolle bei der Modifizierung des Verwitterungs-Ablaufes spielen. Es empfiehlt sich daher, die Frage nach der Herkunft dieser Fremdstoffe zu stellen und diese Frage aufgrund der Anteil-Mengen, der Korngrößen- und der Mineralarten-Zusammensetzung versuchen zu beantworten.

4.2.1 Die Mengen-Anteile

Sowohl im zentralen Ablagerungs-Gebiet des Bims (Probe V), als auch in der Mittel-Zone (Probe "tro" mit 4% Fremdstoff), in der Rand-Zone (Probe Wo mit 11%) und in der Fern-Zone (Lutter-Anger mit 4%) finden sich Tuffe, die als "fremdstoffarm" bis nahezu "fremdstoff-frei" angesprochen werden können. Diese Ablagerungen gehören darüber hinaus verschiedenen alten Eruptions-Phasen an, und somit läßt sich wohl grundsätzlich annehmen, daß mit der primären Sedimenta-

tion der Laacher-Tuffe kaum eine oder keine gleichzeitige äolische Beimischung nicht-vulkanogener Mineral-Substanzen erfolgte. Dies entspricht insofern der Erwartung als das Alleröd zur Zeit der Laacher Eruptionen als eine Epoche mit einer relativ geringen oder fehlenden physikalischen Aufbereitung und so gut wie keinem äolischen Oberflächen-Transport einzuschätzen ist. Man vergleiche dazu die relativ geringen detritischen Mineral-Anteile in den Torfbildungen des Alleröds.

Allerdings wäre denkbar, daß zerriebenes Gesteins-Material aus den Wänden des Eruptions-Schlotes zur primären äolischen Fremdstoff-Beimischung beigetragen hat. Doch dürfte dies theoretisch nur beim Ausstoß der Meerboden-Tuffe und der Schicht L-S-T I der Fall gewesen sein, da der Schlot sich danach nach FRECHEN (20) im Laufe der kurz aufeinanderfolgenden Ausbrüche kaum noch in seiner Form und Lage verändert hat.

Es ist schon aufgrund dieser Erwägungen anzunehmen, daß die Beimengungen von Fremdstoffen zu unseren Tuff-Misch-Sedimenten nicht primär, d.h. synchron mit der Tuff-Ablagerung, sondern im Zuge sekundärer Umlagerungs-Prozesse erfolgt ist. Wann haben diese stattgefunden?

In den alleröd-zeitlichen Seen Mitteldeutschlands können wir - was uns die mineralogische Analyse des Lutteranger-Tuffs bestätigt - mit einer ruhigen Tuff-Sedimentation rechnen, die ohne eine stärkere lokale Fremdstoff-Beimengung ablief und zu einer relativ gleichmäßigen Flächen-Bedeckung führte. Eine nachträgliche Umlagerung und flächenmäßige Umverteilung ist wegen der raschen Einbettung in organogene Sedimente weitgehend auszuschließen. Somit spiegeln uns gerade diese subaquatischen Tuff-Ablagerungen die originalen Sedimentations-Mächtigkeiten und petrographischen Ausgangs-Merkmale der allerödzeitlichen Tuff-Decken in den Rand- und Fern-Zonen des Ablagerungs-Raumes wider.

Ausgehend von den Tuff-Mächtigkeiten im Lutter-Anger können wir annehmen, daß der Göttinger Raum (vgl. die Lage-Skizze) zur Zeit der Laacher Eruptionen von einer insgesamt bis zu 5 cm mächtigen Tuff-Decke überzogen wurde. Allerdings ist hierbei im Gegensatz zu den Seen-Flächen mit einer erheblichen Disproportionierung der Sediment-Mächtigkeiten durch Wind und Gelände-Unebenheiten zu rechnen.

Visuell erkennbare Reste dieser flächenhaften terrestrischen Tuff-Sedimentation sind aus den folgenden Gründen nur noch äußerst selten anzutreffen:

1. Da in der auf das Alleröd folgenden jüngeren Tundren-Zeit nur noch gelegentlich eine stärkere sedimentäre Überdeckung der älteren Sedimente und Böden zu verzeichnen ist, wurden die an der Oberfläche lagernden Tuff-Schleier in der Regel restlos in die holozäne Bodenentwicklung einbezogen und dem aus verschiedenen Substraten (Löß, Kalk-Detritus etc.) hervorgegangenen Solum beigemischt. War die Menge des beigemischten Tuffs groß genug, so deutet sich diese Tuff-Beimengung heute bei pedogenetischen

Verwitterungs-Bilanz-Analysen unserer Böden gelegentlich durch bestimmte spezifische Verwitterungs-Produkte, wie z.B. Allophan oder Kaolinit an. Dies ist für Mineral-Bilanz-Analysen insofern recht unangenehm, als man die ursprünglichen Anteile des dem Boden beigemischten Tuffs kaum oder gar nicht abschätzen kann.

2. Ein großer Teil des lockeren allerödzeitlichen Tuff-Schleiers ist in den Rand- und Fern-Zonen des Ablagerungs-Raumes während oder kurz nach seiner Ablagerung durch Oberflächen-Wasser abgeräumt worden. Nur in sehr ausgeprägten Akkumulations-Lagen in Plateau- und Flachhang-Bereichen und besonders in Erosions-geschützten Abschnitten der spätglazialen Bach- und Fluß-Fluren besteht daher Aussicht, durch planmäßiges Suchen akkumulierte stärkere Reste des Laacher-Tuffs aufzufinden. Offensichtlich ist es die noch im Alleröd erfolgte sekundäre Verlagerung des Tuffs durch Wasser gewesen, die zur Fremdstoff-Anreicherung der meisten uns bekannten TMS-Vorkommen beigetragen hat.
3. Wo Reste des Tuff-Schleiers die alleröd-zeitliche Abspülung überstanden haben, können sie in der anschließenden jüngeren Tundren-Zeit durch mechanische Aufbereitung und äolische Verlagerung zerstört worden sein. Bei der Verfrachtung wurden sie mit nichtvulkanogenem Gesteins-Detritus vermischt und an bestimmten Akkumulations-Stellen als äolisches TMS abgesetzt.

Bei der sehr grob-porigen Bims-Decke vom Konderbach-Tal können wir annehmen, daß die sandigen und schluffigen nicht pyrogenen Gemeng-Teile aus der jungtundren-zeitlichen Hangschutt-Decke eingeschwemmt worden sind. Ein Teil des Dreischicht-Tones ist - wie bereits ausgeführt - holozänes Infiltrations-Produkt.

Die in Tab. 5 aufgeführten TMS-Vorkommen Lutter-Anger, Northeim (No) und Gießen (Gie) weisen sich durch hohe Diatomeengehalte als subaquatische Sedimente aus. Beim ersten handelt es sich, wie erläutert, um das primäre Tuff-Sediment, bei den letztgenannten um fluviale Umlagerungen während der Alleröd-Zeit.

Bei Bischhausen (Bi), Wohnbach (Wo) und den beiden Proben vom Hünstollen (grau und braun) haben wir es offenbar mit ganz lokalen Schwemm-Akkumulationen in Hang- und Mulden-Lage zu tun, bei denen das TMS nur Fremd-Material der aller-nächsten Umgebung aufgenommen hat. Beim Hünstollen sind wir allerdings nicht ganz sicher, ob nicht schon vorher eine über

das übliche Maß hinausgehende äolische Verstärkung der Sediment-Decke vorgelegen hat ("grau") und ob nicht nachher auch noch eine solifluidale Akkumulation ("braun") zur Verdickung der TMS-Plombe der Grabenfüllung beigetragen hat. Welche Hinweise kann uns die Mineralarten- und Korngrößen-Zusammensetzung der Fremdstoff-Beimengungen zur Stützung dieser Aussagen geben?

4.2.2 Mineralarten-Zusammensetzung

Die Tabellen 5 und 6 stellen Auszüge aus der Sammel-Tabelle 1 dar. Tabelle 5 zeigt, daß in den Schluff- und Sand-Fraktionen der Fremdstoff-Anteil des Quarz stark über die Feldspäte und Glimmer dominiert - viel stärker als das üblicherweise beim Löß der Fall ist, der bei allen Profilen in der unmittelbaren Nachbarschaft zugegen ist. Doch sollte diese Tatsache nicht zu der Annahme verleiten, daß die dem Tuff beigemischten Fremdstoffe einheitlicher Herkunft sein könnten. Dies läßt sich mit Hilfe der Korngrößen-Verteilungs-Tabelle widerlegen. Wie wir mineralanalytisch und experimentell nachweisen konnten, führt der frostmechanische Zerfall von Lößmaterial regelmäßig zu einer relativen Verarmung der Schluff-Fraktionen an Feldspäten und Glimmern und zu einer relativen Anreicherung der Ton-Fraktionen mit Feldspat-Detritus, sowie Illit und Chlorit als den chemisch noch nicht angegriffenen mechanischen Zerkleinerungs-Produkten der Schluff-Glimmer. Die zu Beginn des Alleröds vorliegende Sediment-Oberfläche des Lösses hat generell einer derartigen mechanischen Material-Veränderung unterlegen. Die äolische und fluviatile Aufbereitung und Sichtung solcher Löß-Materialien kann dann durchaus zur Ablagerung von Korn- und Mineral-Gemischen geführt haben, wie sie in unseren TMS anzutreffen sind.

Soweit die TMS größere Mengen an Ton-Korngrößen enthalten, bestehen diese überwiegend aus Dreischicht-Mineralen: Illite - Vermikulite - Montmorillonite (Illite - Hemiexpandite - Expandite, s.a. SCHEFFER et al., 34). Die anteils-

mäßige Zusammensetzung ist unabhängig vom Verwitterungsgrad der Tuffe. Dies und die Tatsache, daß solche Mineral-Kombinationen hier im wesentlichen nur aufgearbeiteten pleistozänen Locker-Sedimenten wie dem Löß entstammen können, unterstreichen den sekundären Charakter der Fremdstoff-Beimengungen. Abgesehen von der Probe Hünstollen "braun", - in welcher der überwiegend aus Illit bestehende Lösungs-Rückstand der umgebenden Gelbkalke (unterer Muschelkalk) dominiert - ähnelt das Verteilungs-Spektrum der Dreischicht-Tonminerale in den übrigen TMS dem des Lösses. Dabei zeigt sich allerdings auch hier wieder der bereits erwähnte Frost-Zerkleinerungseffekt: Die Ton-Fraktionen sind in der Grobton-Fraktion stark mit Illit- und Chlorit-Detritus angereichert.

4.2.3 Korngrößen-Zusammensetzung

Tabelle 6, die Korngrößen-Verteilungs-Tabelle, unterstreicht den lokalen Charakter der Fremdstoff-Beimengungen. Selbst in den wenig verwitterten TMS, bei denen die heutige Korngrößen-Zusammensetzung der Tuff-Komponente noch annähernd der ursprünglichen entspricht (Wo, Hü) ist die Diskrepanz zwischen der Korngrößen-Verteilung der tuffbürtigen Bestandteile und der Fremdstoffe so groß, daß sie eine gemeinsame äolische Sedimentation ausschließt.

Bei Bi kommt der Einfluß der Buntsandstein-Umgebung in dem hohen Sand-Anteil der Fremdstoff-Komponente zum Ausdruck, der bei den anderen Profilen fehlt. Ähnlich wie bei No und Hü "braun" drückt sich der schwemm-sedimentäre Charakter dieser Mulden-Ablagerungen in dem beachtlich hohen Ton-Anteil (Dreischicht-Tonminerale) aus, der bei Bi und No dem Löß, bei Hü "braun" den Lösungs-Rückständen der umgebenden Gelbkalke entstammt.

Tab. 5 : Fremdstoff - Anteile und tuffbürtige Umwandlungsprodukte der Tuff-Mischsedimente (Gew.%)

	Randzone,grob		Fernzone ← grüßer → feiner				
	Wo	Gie *	Hü"grau"	Hü"braun"	No *	Bi	Lutteranger*
Quarz	8,5	26,2	6,7	18,4	8,9	40,7	2,6
FREMD - Alk.-Feldspäte	1,3	1,5	0,8	0,8	0,3	1,6	-
STOFF Grob - Glimmer	0,6	1,2	0,5	0,7	0,5	2,7	1,0
Ton-≡ - Mineral	0,5	6,0	0,3	11,6	14,0	12,4	-
SUMME	11	35	8	32	24	57	4
Glas	70	21	72	15	46	14	89
Sanidin	1,3	1,0	0,8	0,8	0,3	0,8	1
Kaolinit	-	8	5	18	3	4	-
Plättchen - Allophan	15	25	6	18	10	6	5
Allophan (A)							
Halloysit (H)	3	8	6	15	16	17	
Kaolinit (K)							
SUMME	89	63	90	67	75	42	95

* enthalten bis zu 2% Diatomeen

Tab. 6: Korngrößen-Verteilungs-Tabelle der Tuff-Mischsedimente (TMS) Gew.%

		> f S	f S	gg U	fg U	m U	f U	g T	≤ g T
Wo	Fremdstoff Tuffbürtig	4,0	1,0	0,5	2,6	2,1	0,4	0,5	0,0
		26,0	8,5	7,0	12,6	20,4	8,4	1,8	3,0
Gie	F	2,0	0,1	0,7	9,6	12,0	3,5	5,4	2,2
	T	14,0	1,3	2,3	5,4	16,7	13,7	5,5	2,4
Hu grau	F	-	1,7	0,5	2,4	2,0	1,2	0,5	0,0
	T	1,3	11,5	9,1	15,4	32,7	10,2	3,7	5,1
Hu braun	F	-	0,8	0,6	7,8	6,7	2,5	8,3	5,0
	T	0,5	5,1	8,1	6,6	16,9	11,8	2,6	13,1
No	F	-	0,1	0,3	2,3	3,5	3,2	0,4	14,0
	T	1,6	1,5	1,2	1,9	25,7	19,8	8,4	15,0
Bi	F	1,2	11,5	6,1	11,5	10,6	2,7	4,4	9,0
	T	3,5	2,5	2,0	2,7	5,3	4,2	3,5	17,2
		> 112 μ	112-63 μ	63-36 μ	36-20 μ	20-6 μ	6 - 2 μ	2-0,6 μ	≤ 0,6 μ

4.3 DER TUFF-ANTEIL UND SEINE VERWITTERUNG

4.3.1 Umwandlungs-Zustand der Tuff-Komponente

Aus Tab. 5 leiten wir als Maßstab für den Verwitterungs-Grad der Tuff-Misch-Sedimente das Verhältnis von Glas : (Kaolinit + Allophan i. Schluffgröße) : (Allophan + Halloysit + Kaolinit i. Tongröße) ab. Danach läßt sich folgende Reihe zunehmender Verwitterungs-Intensität aufstellen:
 Wo = Hü (grau) < Gie < No < Bi < Hü (braun)

In diese Reihe können wir auch die Bims-Proben "tro" und "feu" vom Konderbach-Tal stellen. Dazu geben wir in Tab. 7, die entsprechend Tab. 5 angelegt ist, noch einmal in anderer Form die Daten dieser Proben an.

Tab. 7: Fremdstoff-Anteile und Umwandlungs-Produkte des Bims und BMS vom Konderbach-Tal

		"tro"	"feu"	
FREMD-STOFFE	Quarz	2,7	5,3	
	Alkali-Feldspäte			
	Grob-Glimmer			
	Ton-Dreischicht-Min.			1,5
SUMME		4,2	14,3	
	Glas	86	36	
	Sanidin	4	4	
	Kaolinit	Schluff- u. Sandgröße	15	
	Plättchen-Allophan			
	Allophan			Ton
	Halloysit	< 2 μ	4	31
	Kaolinit			
SUMME		96	86	

Nach dieser Tabelle würde die kaum verwitterte Probe "tro" die oben genannte Verwitterungs-Intensitäts-Reihe anführen (hinter "Lutteranger"). Die Probe "feu" würde ziemlich am Ende zwischen No und Bi einzuordnen sein. Somit liegen

unsere TMS-Proben etwa in dem Verwitterungs-Intensitäts-Rahmen, der durch die beiden "reinen" Bims-Proben abgesteckt war. Das erleichtert den Vergleich.

In allen Fällen sind als dominierendes Neubildungs-Produkt in der Schluff-Fraktion die Plättchen-Allophane, in der Ton-Fraktion der Allophan-Ton zu beobachten. Beide Allophan-Produkte liegen in ihren Q-Werten (vgl. Tab. 2, z.B. Wo und grau) links und in ihren Lichtbrechungswerten oberhalb vom Kaolinit in Abb. 2 .

Das Aufkieselungs-Produkt des Allophans, der Kaolinit, fehlt bei einigen Proben entweder in der Schluff- oder in der Ton-Fraktion - ohne daß eine Abhängigkeit von den Standorts-Bedingungen oder dem Ausgangs-Zustand des TMS rekonstruierbar wäre. Offensichtlich ist also der Allophan das regelmäßig auftretende Umwandlungs-Produkt bei der Verwitterung trachytischer Tuffe und Tuff-Misch-Sedimente, während der Kaolinit erst im fortgeschrittenen Verwitterungs-Zustand mengenmäßig stärker in Erscheinung tritt. Als dritte, zwar häufiger und in größerer Menge als Kaolinit, jedoch ebenfalls nicht regelmäßig auftretende, Mineral-Neubildung ist der Halloysit zu nennen, der in mancher der Tonfraktionen bis zu 50 Gewichts-Prozent ausmacht.

Die Abschätzung der relativen Anteile der 3 neugebildeten Minerale läßt sich für Kaolinit und Halloysit anhand der Röntgen-Beugungs-Diagramme verschiedener Erhitzungs-Stufen vornehmen. Der Allophan-Anteil, der sich in den Röntgenpräparaten durch Erniedrigung der Orientierungs-Fähigkeit der Schicht-Silikate störend bemerkbar macht, wurde elektronenmikroskopisch geschätzt. Dabei konnten in der Regel die röntgenographisch ermittelten Quantitäten des Kaolinit und Halloysits bestätigt werden. Schon die quantitative Ermittlung der Fremdstoff-Ton-Anteile war bei den allophan-reichen Proben auf Schwierigkeiten gestoßen, weil der Allophan die Orientierung der Phyllosilikate parallel 001 verhinderte. In einigen Fällen entsprach das Röntgen-Beugungs-Spektrum einer scheinbar völlig amorphen Ton-Substanz (z.B. No). Nach 5-minütiger Extraktion des Allophans mit 0,5 n kochender NaOH, Abschrecken in Eiswasser und Filtration zeigten diese Präparate dann wieder eine normale Orientierung mit gut ausgeprägten Phyllosilikat-Peaks. Ein Vergleich der Ton-Fraktion $< 0,6 \mu$ mit den entsprechenden Ton-Fraktionen $0,6 - 2 \mu$ zeigt, daß die feineren Ton-Fraktionen praktisch nur noch aus Allophan bestehen, dem

Halloysit beigemischt ist. In den größeren Fraktionen tritt dagegen der Kaolinit in Verbindung mit den Dreischicht-Tonmineralen der Fremdstoff-Beimengung in den Vordergrund. Überhaupt hat der Kaolinit seinen Korngrößen-Schwerpunkt eher in der Feinschluff-Fraktion als in den Ton-Fraktionen.

Unter dem Elektronen-Mikroskop zeigen die Ton-Fraktionen der TMS das gleiche Bild wie die des Bims und des BMS: Der Halloysit (Abb. 4) tritt in bis zu 2 μ langen gut ausgebildeten Zylindern mit deutlichem Mittel-Kanal in Erscheinung. Bei kleinen dünnen Röhrchen lassen sich bereits bei direkter Betrachtung mit 10-facher optischer Nachvergrößerung in der Draufsicht die 10 Å-Basis-Abstände in den Zylinder-Wänden erkennen und ausmessen.

Die Allophan-Einzelteilchen zeigen in allen Präparaten eigenartige Waben- oder Mäander-Strukturen auf ihren Oberflächen, die wie deutlich erhobene Auflagerungen anderer Substanzen aussehen und den Eindruck hervorrufen, als ob diese Allophane nicht einheitlicher Zusammensetzung seien. Die Elektronen-Feinbereichs-Beugung zeigt jedoch keine Spuren kristalliner Partien innerhalb solcher einzelner Allophan-Partikel. Es kommen auch dicke wulstige oder morula-artige Allophan-Körper vor, die randlich Ansätze zur Kristall-Kanten-Bildung zeigen und in diesen Partien im Elektronen-Beugungsbild ein hexagonales Kristall-Gitter erkennen lassen. Es scheint sich hier um die Stellen der beginnenden resilifikativen Kaolinit-Bildung aus Allophan zu handeln.

Die Tatsache, daß die am wenigsten verwitterten Proben gleichzeitig die geringsten Mengen an Kaolinit und auch Halloysit aufweisen, während Allophan schon in reichlichen Mengen gebildet ist, dienen uns als weitere Stütze für die bereits oben zum Ausdruck gebrachte Annahme, daß die Verwitterung des Glases in den TMS unter raschem Durchlaufen der Hydrogel-Glas-Phase zum Allophan verläuft. Unter Resilifizierung kann dann die Umwandlung zum Halloysit und Kaolinit weiterführen.

Dieser Umwandlungs-Weg des trachytischen Glases steht in voller Übereinstimmung mit den aus der Literatur erhältlichen Beobachtungen (5, 7, 8, 14, 15, 16, 21, 22, 30, 39, 40). Es scheint sich demnach hierbei um eine prinzipielle Erscheinung bei der Verwitterung und bodengenetischen Umwandlung von trachytischen, rhyolytischen und andesitischen Tuffen und von Tuff-Misch-Sedimenten zu handeln. Der visuelle morphologische 2. Schritt des Umwandlungsprozesses vom Allophan zum Kaolinit an schluffgroßen Teilchen wurde bereits oben vorgeführt. Neu war dagegen die Beobachtung, daß - zunächst im Schluffbereich - auch die direkte Umwandlung vom Glas zu Kaolinit möglich ist.

Zwei weitere aus Tab. 5 ersichtliche Umstände geben zu Fragen Anlaß:

1. Was hat die Erscheinung zu bedeuten, daß die Glas-Umwandlungsprodukte Kaolinit und Allophan - bis auf eine Ausnahme (Bi) - sich weit überwiegend in der feineren Schluff-Fraktion akkumulieren, während der Anteil an neugebildetem Ton wider Erwarten relativ gering bleibt? Hängt dies damit zusammen, daß die Neubildung von Mineralen - geschützt vor mechanischen Einfüssen - im Inneren der porösen Bims-Partikel vonstatten geht, wobei die Glaswände als Matritze dienen? Zur Beantwortung könnten Dünnschliff-Untersuchungen frischer und mazerierter Tuff-Teilchen dienen (Abschn. 4.3.2).
2. Besteht eine Beziehung zwischen dem Anteil an Fremdstoff-Beimengungen und dem Verwitterungsgrad des vulkanischen Materials. Die oben angeführte Intensitäts-Folge der Verwitterung deckt sich recht gut mit dem Grad der Fremdstoff-Beimengung. Wenn wir z.B. Hü grau und Hü braun betrachten, die unmittelbar nebeneinander liegen und heute etwa gleichen hydrologischen Bedingungen ausgesetzt sind, liegt dieser Verdacht besonders nahe.*) Es empfiehlt sich

*) Wir müssen einschränkend in diesem Fall noch einmal die bereits oben vermutete Differenzierung hervorheben, die darin bestehen kann, daß es sich bei "grau" um eine primäre äolische oder wenig verschwemmte Tuff-Akkumulation, bei "braun" um ein pedogen verwittertes und dann solifluidal umgelagertes Sediment handelt. Trotzdem dürfte der dadurch bedingte Verwitterungsunterschied nicht derartig groß sein.

daher auch dem Verwitterungs-Zustand der Fremd Beimengungen eine eingehende Beobachtung zuteil werden zu lassen (Abs. 4.3.3).

4.3.2 Topographie der Mineral-Umwandlung

Die aufgrund von Untersuchungen an Korngrößen-Fractionen gewonnenen mineralogischen Ergebnisse bereiten verschiedene Deutungs-Schwierigkeiten. Die bislang gegebenen Interpretationen scheinen nicht ganz frei von Widersprüchen zu sein. So überrascht z.B., daß wir auf der einen Seite Mineral-Teilchen begegnen, die eine Umwandlung im Sinne einer Desilifizierung erkennen lassen, auf der anderen Seite Mineral-Teilchen, die eine Veränderung im Sinne einer Resilifizierung aufweisen. Die Feststellung der Richtung, in der die Umwandlung erfolgt, geschieht aufgrund des mikromorphologischen Habitus der Einzelkörner mit Übergangs-Charakter und unterliegt wohl keinem Zweifel. Es drängt sich der Verdacht auf, daß die genannten gegenläufigen Prozesse der Desilifizierung wie der Resilifizierung, die an Teilchen ein und derselben Fraktion einer Probe konstatiert wurden, im Verwitterungs-Substrat räumlich dicht nebeneinander ablaufen und sich gegenseitig bedingen.

Auch erscheint es eigenartig, daß in den einzelnen Intensitäts-Stufen der fortschreitenden Verwitterung von Bims- und Tuff und deren Misch-Sedimenten unterschiedliche Kombinationen von neugebildeten Mineral-Arten und deren Mengen-Anteilen auftreten. So überwiegt in den Anfangs-Phasen der Anteil an deteriorierten Hydrogel-Gläsern und der Allophane. In den Spät-Phasen tritt dagegen der Kaolinit und dann der Halloysit zunehmend in Erscheinung. Das bedeutet: Mit fortschreitender Verwitterung mußte sich das chemische Milieu der Mineral-Umwandlung laufend verändern.

Unklar bleibt auch zunächst der Befund, daß einige der Neubildungs-Produkte, wie z.B. der überwiegende Teil des Allophans und Kaolinitis in Ton-Größe auftreten, während andere bevorzugt in Schluff-Größe erscheinen, was besonders für den kaolinit und die Übergänge vom hochlichtbrechenden Allophan zum Kaolinit gilt.

Eine zusammenfassende Deutung all dieser nur schwer auf einen Nenner zu bringenden Erscheinungen wäre dann zu erwarten, wenn es gelänge, den Ort der Umwandlungen innerhalb der Boden-Matrix oder innerhalb der einzelnen Matrix-Bestandteile zu fixieren. Das gilt besonders für alle bimsbürtigen Verwitterungs-Produkte, da die porösen Bims-Teilchen in ihren gekammerten Hohlraum-Strukturen Bereiche separater Verwitterungs- (Lösungs-) Systeme beherbergen können. Diese stehen nur über einen behinderten Lösungs-Austausch mit dem Außen-Milieu in Verbindung. Sie können daher erhebliche Abweichungen in ihren chemischen Bedingungen aufweisen und zur Bil-

dung spezieller Verwitterungs-Produkte Anlaß geben.

Wir dürfen also nicht in den Fehler verfallen, die Umwandlungs-Erscheinungen an den durch mechanische Fraktionierung gewonnenen Einzel-Teilchen so zu interpretieren, als ob sich der Prozeß der Verwitterung und Neubildung an diesem betreffenden einzelnen Mineral-Korn vollzogen habe - etwa in der Weise, daß man sich dieses Teilchen als in der Bodenlösung schwimmend oder ständig und allseitig von Bodenlösung umspült vorstellt. Vielmehr sind ja gerade bei Bims- und Tuff-Böden alle diese Einzelteilchen in situ aus einem ehemals größeren Verband, dem porösen Glas-Körper der Bims-Bröckchen hervorgegangen. Diese sind entweder infolge fortgeschrittener chemischer Mazerierung und/oder infolge unserer mechanischen Vorbereitung zur Korngrößen-Analyse zerfallen. Auf diese Weise entstehen Bruchstücke unterschiedlicher Korngröße. Der Ort der Verwitterung kann also in der Regel nicht das freie Einzelkorn (bzw. seine Oberfläche) von Sand-, Schluff- oder Tongröße sein, sondern nur der gesamte Verband des porösen Glas-Körpers, der eine hinreichende räumliche Differenzierung der Verwitterungs-Prozesse gestattet.

Der folgende Absatz soll sich daher mit der Frage nach der örtlichen und zeitlichen Differenzierung der Verwitterung, der Stoff-Abfuhr und -Zufuhr und der Umwandlung in den Mikro-Chemotopen (micro weathering sites) der verwitternden Bims-Bröckchen und Tuff-Aggregate befassen. *) Hierzu bedienen wir uns als Grundlage der mikromorphologischen Untersuchung von Dünnschliffen und Anschliffen des ungestörten Bodens und von Trümmerpräparaten einzelner isolierter Matrix-Partien. Die Mikromorphologie kann zur Beantwortung unserer Fragen nur in recht beschränktem Umfange als Hilfsmittel dienen, da die mineralogische Analyse von Einzel-Partien im Verband schwierig ist und die Auflösungsgrenze des Mikroskops die Ansprache sehr dünner Umwandlungs-Schichten und sehr feinkörniger Neubildungs-Produkte im Dünnschliff nicht gestattet. Um dennoch zu Modell-Vorstellungen zu gelangen, ist die Kombination aller Untersuchungs-Befunde unerläßlich, die an Proben der einzelnen Verwitterungs-Stufen gemacht worden sind: relative Mengen-Anteile und Korngrößen der Verwitterungs-Reste und Neubildungs-Produkte, elektronen- und licht-

*) Ähnlich wie in der Biologie handelt es sich hier um eine Kompartimentierung von distinkten Reaktions-Räumen, die miteinander in Wechselbeziehung treten.

mikroskopische Mengen-Auswertung der in einzelnen Bruchstücken möglichen Mineralarten-Kombinationen, Kontrolle der Bruchstücke durch Röntgen- und Elektronen-Beugung und chemische Analyse der Fraktionen.

Soweit es überhaupt möglich ist, mit Hilfe von Schwarz-Weiß-Aufnahmen aus Dünnschliff-Partien mikromorphologische Vorstellungen zu erwecken und Argumente für die Modell-Hypothese zu liefern, soll dieses anhand der Abbildungen 5 bis 10 geschehen. Es handelt sich dabei um Aufnahmen von einer unverwitterten und einer stark verwitterten Bims-Probe bei verschiedenen lichtoptischen Einstellungen im Polarisations-, Phasen-Kontrast- und Interferenz-Kontrast-Verfahren.

Abb. 11, obere Reihe, stellt den Versuch dar, alle gemachten Beobachtungen und gewonnenen Meß-Ergebnisse synoptisch in einem Entwicklungsschema der Bims-Verwitterung darzustellen.

Dazu stellen wir uns eine Blasen-Trennwand aus dem Inneren eines frischen, noch völlig intakten Bims-Bröckchens vor - etwa so wie man sich das anhand von Abb. 5a, der Aufnahme eines 200 μ großen Bimsbröckchen, das in feinen Bims-Detritus (Tuff) eingebettet ist, vorstellen kann. Wir verfolgen dann morphologisch in Teilschritten die Umwandlung dieser Wand-Partie wie sie sich im Laufe der pedogenetischen Verwitterung des Bims-Bröckchens vollzieht.

Die dabei ablaufende chemische Differenzierung, d.h. besonders die SiO_2 -Abfuhr und Aufkieselung in den einzelnen Wand-Zonen wird in Abb. 12 wiedergegeben, in welcher der Verwitterungs-Gang in 3 Stufen dargestellt ist.

PHASE I: Frischer Bims

Abb. 11,I

Abbn.: 5a,b / 6a,b / 10b

In diesem Zustand erscheinen die Glas-Wände innerhalb des Bims-Brockens völlig glatt und frei von jeglichem Belag. Man suche sich aus der Interferenz-Kontrast-Aufnahme (Abb.5a)

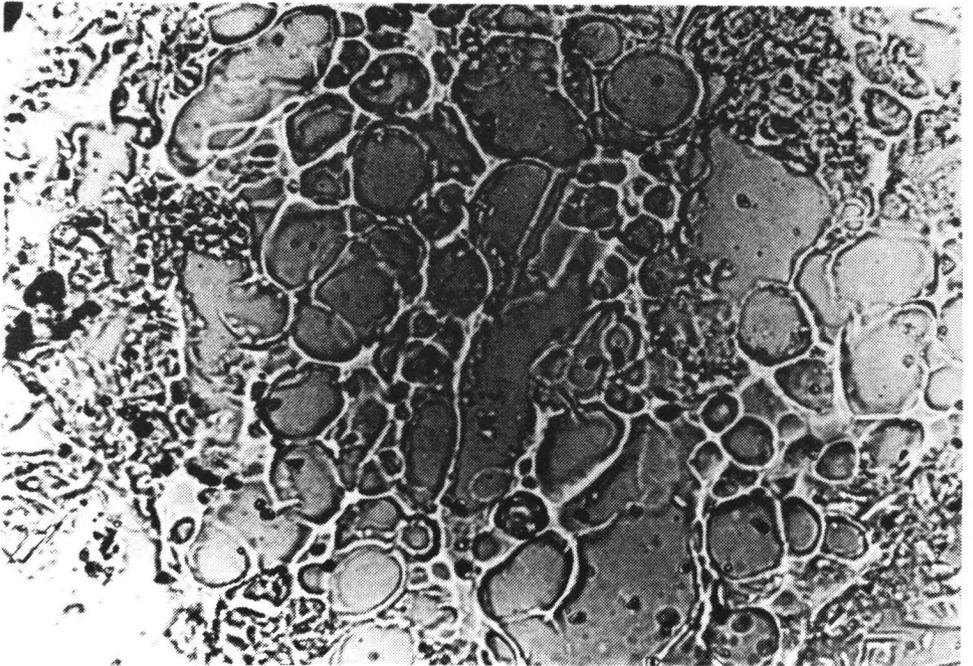
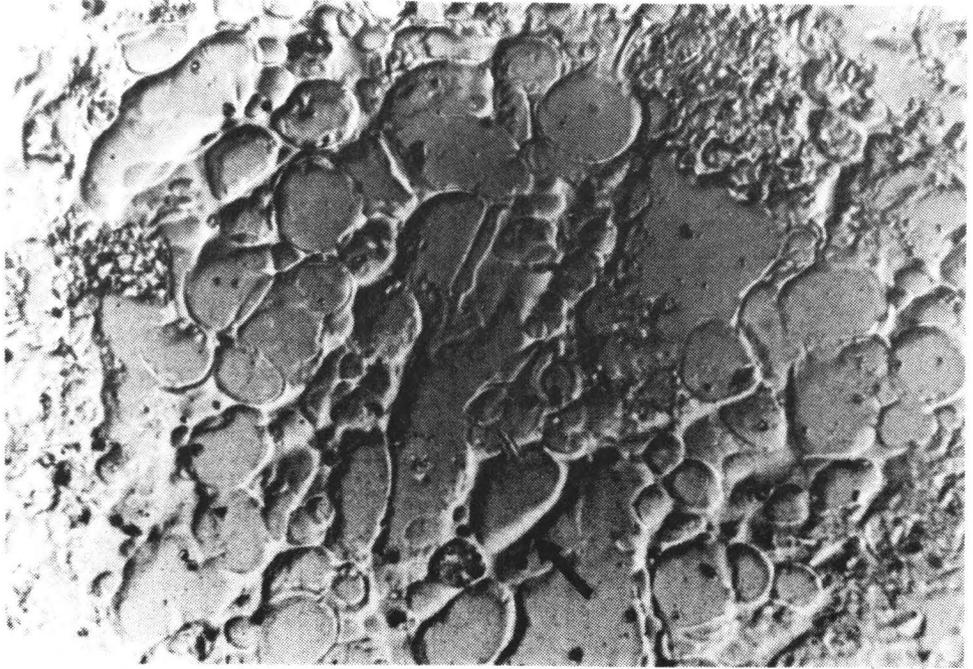


Abb. 5 : frischer Bims - Brocken aus TMS Hü - grau,
vertikaler Bild - Durchmesser = 175μ

5a: Interferenz - Kontrast

5b: Durchlicht Hellfeld Nicols II

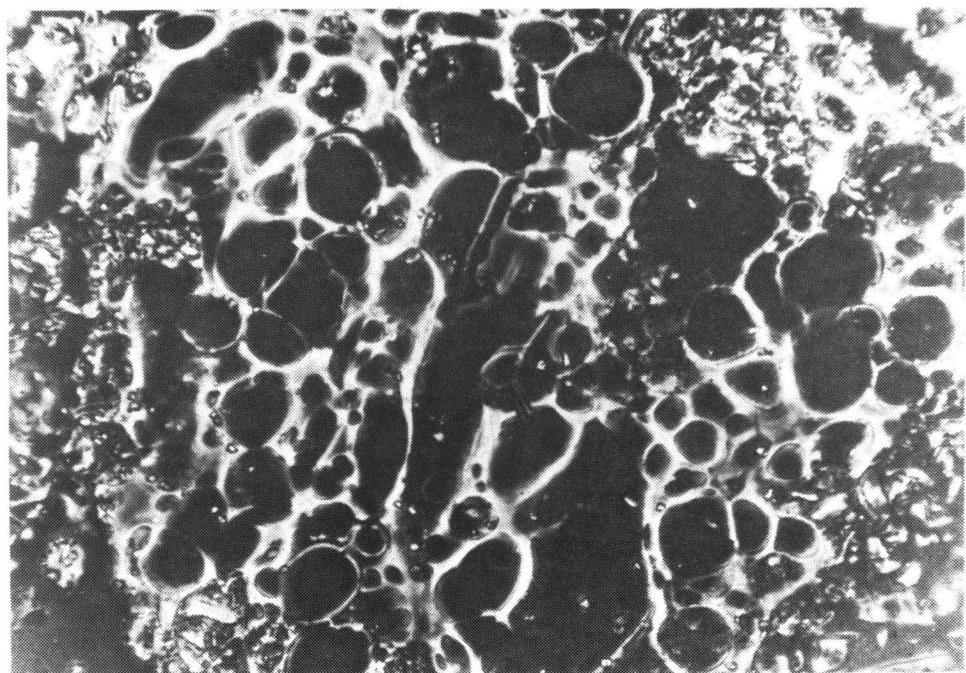
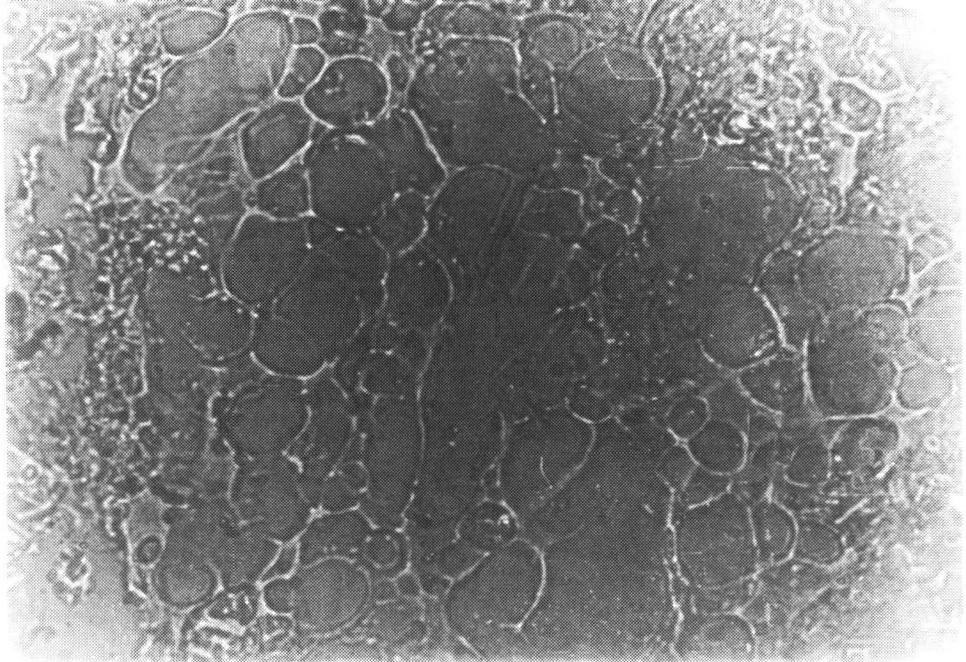


Abb. 6 : (wie 5)

6a: Durchlicht, Nicols mit 45° gekreuzt

6b: Phasen - Kontrast

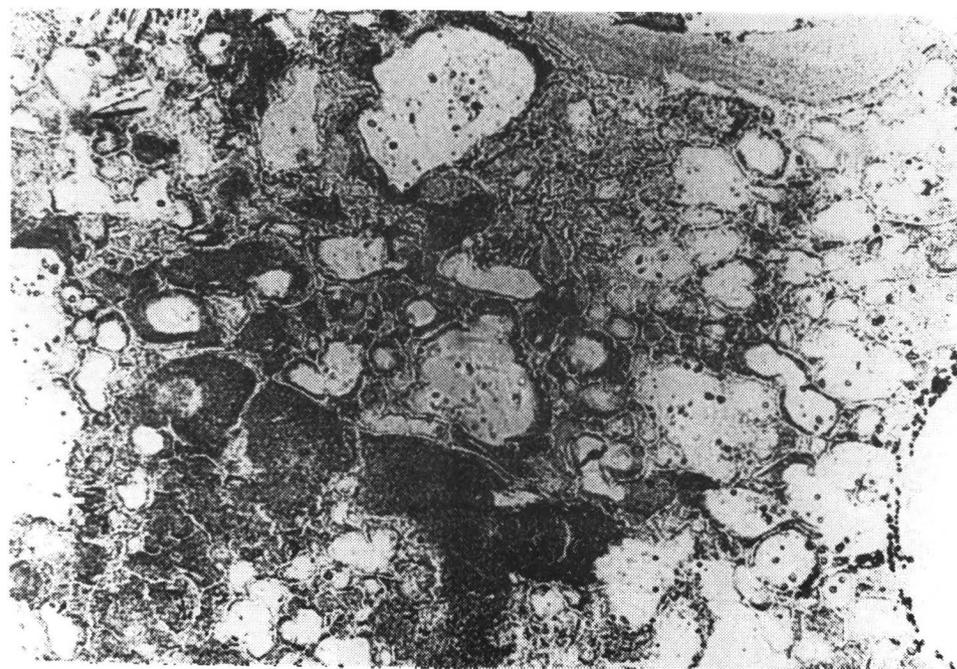


Abb. 7 : Stark angewitterter Bims - Brocken aus "feu",
vertikaler Bild - Durchmesser = 350 μ

7a : Interferenz - Kontrast

7b : Durchlicht, Hellfeld, Nicols II

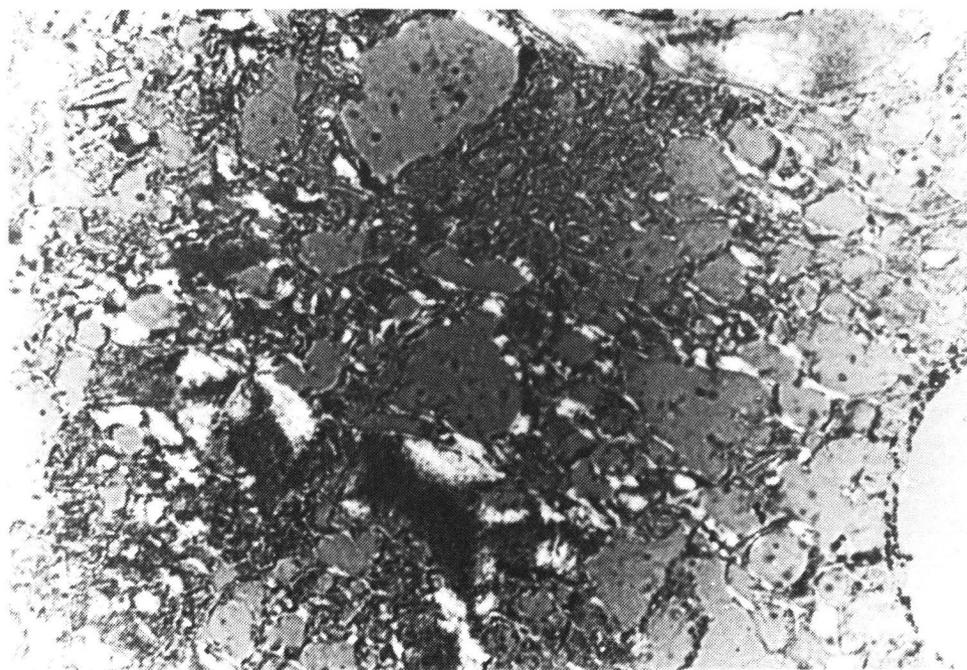


Abb. 8 : wie 7

8a : Nicols +

8b : Nicols 45°

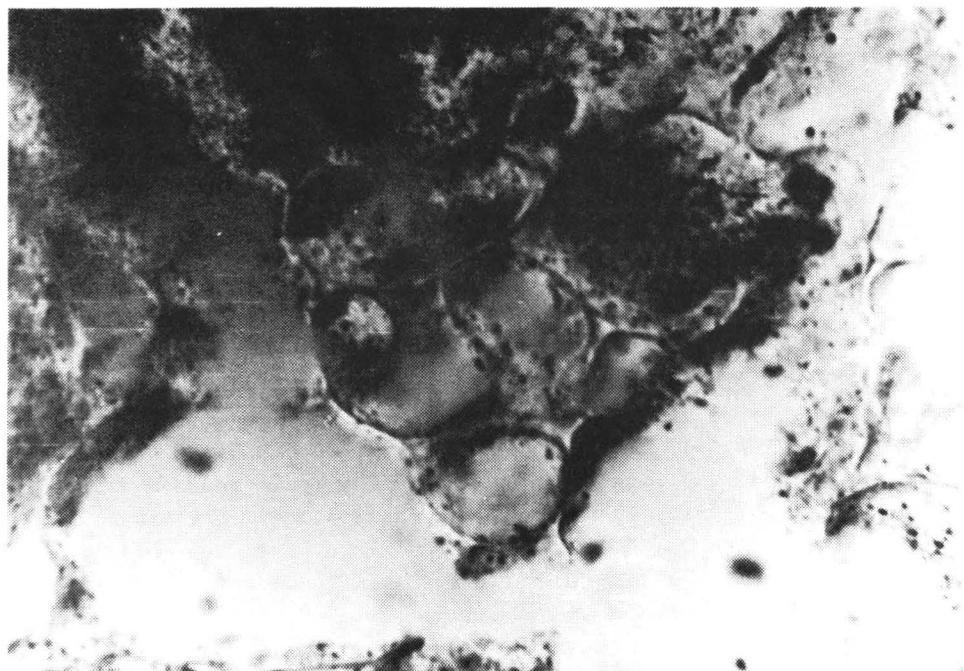
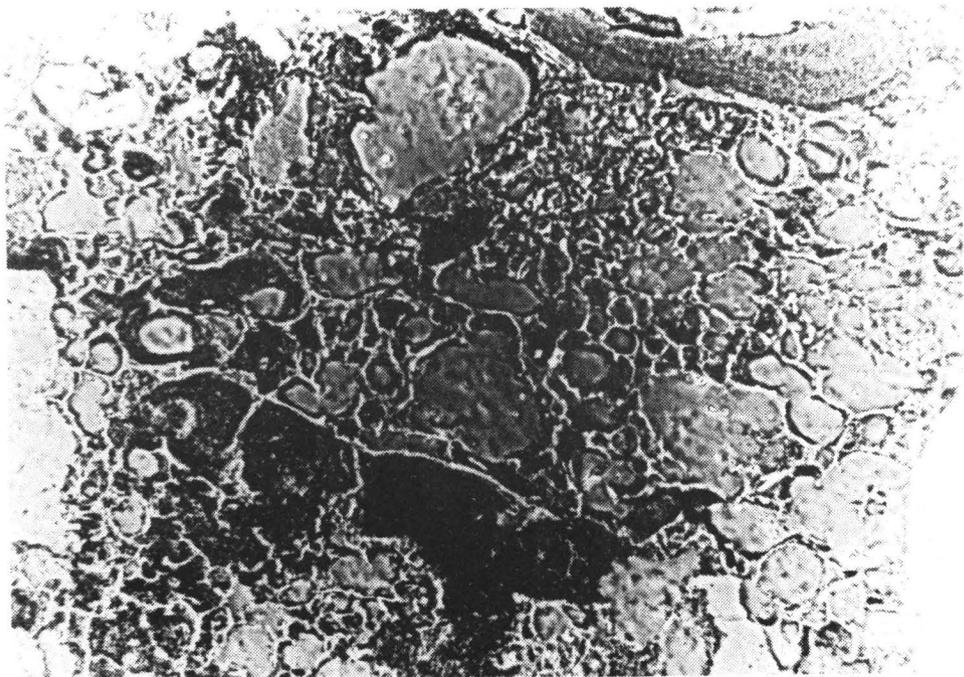


Abb. 9 : wie 7 u. 8

9a: Phasen - Kontrast, vert. Bild - $\phi = 350 \mu$

9b: Interferenz - Kontrast, " " = 50μ

Ausschnitt aus dem linken oberen Viertel von 9a

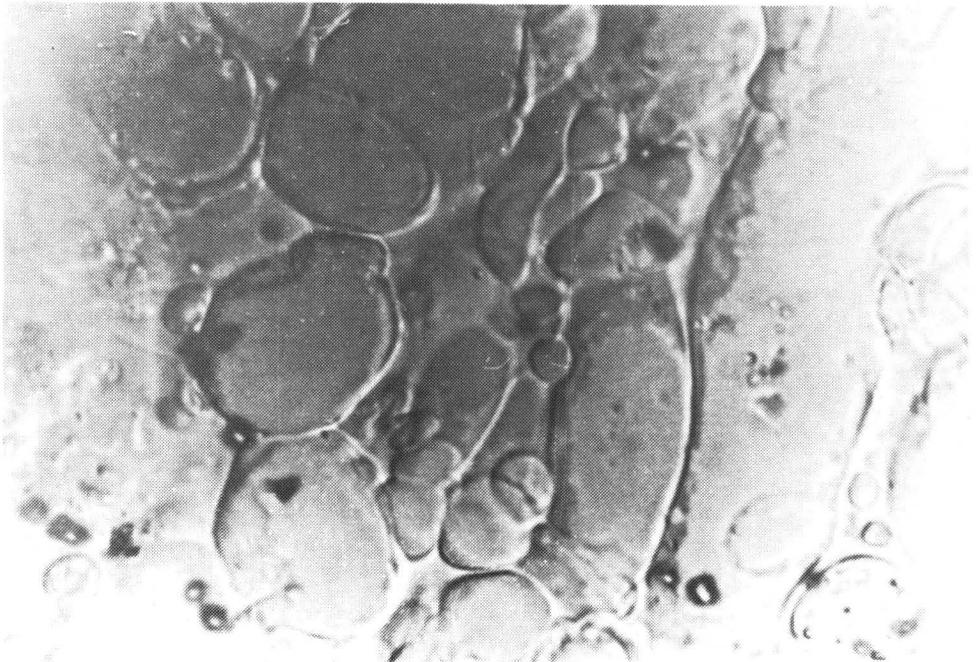
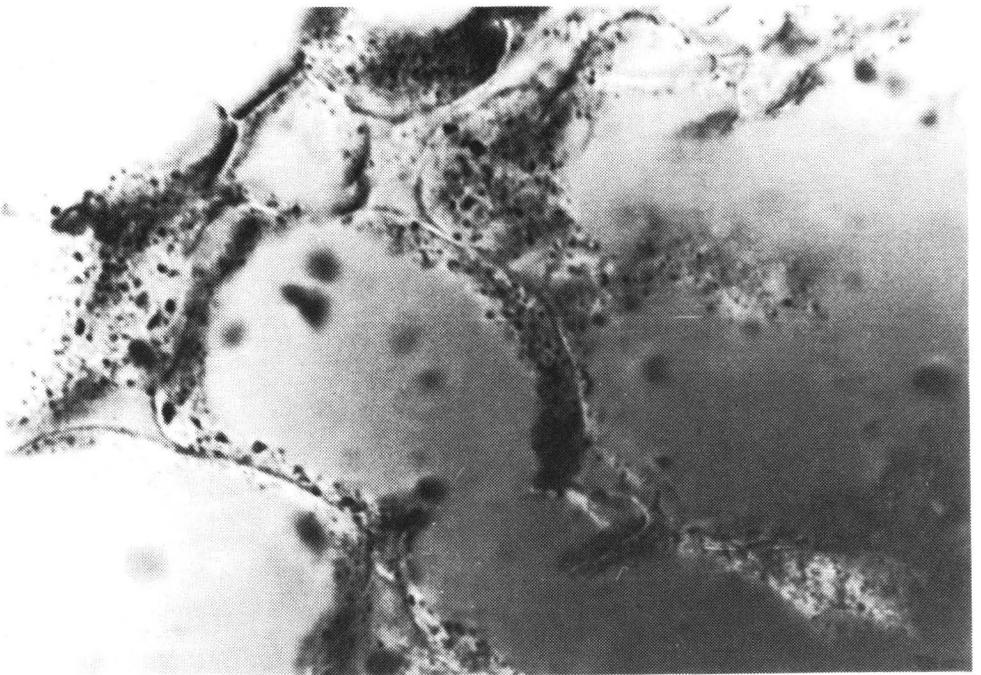


Abb. 10 : Vergleich zwischen verwittertem und frischem Bims
im Interferenz - Kontrast

10a: wie 9 b, Ausschnitt aus 9 a rechts, mitte, vert. $\varnothing = 50 \mu$

10b: wie 5 a, " " Zentrum, vert. $\varnothing = 70 \mu$

eine Wandpartie in Aufsicht (z.B. siehe Pfeil) und verfolge diese im Hellfeld-Durchlicht, Phasen-Kontrast und bei gekreuzten Nicols (Abb. 6a). Dabei wird die absolute Isotropie des frischen Trachyt-Glases deutlich. Bei rechtwinkelig gekreuzten Nicols wäre Abb. 6a völlig dunkel.

Als Einschlüsse in den Glaswänden zeigt Abb. 11,I intakte Sanidine und Pyroxene.

Die Dünnschliff-Bilder 5 und 6 lassen Konturen eines runden sehr feinporigen (5 - 40 μ Porendurchmesser) Bims-Bröckchen von ca. 180 μ \varnothing erkennen, das in zerriebenes Bims-Glas eingebettet ist.

PHASE II

Abb. 11/II

Abb. 12 links

Glas: Die Glaswände beginnen rau zu werden, etwa so wie man das in Abb. 7a (Pfeil) in der Wand-Aufsicht beobachten kann. Die entstehende Rauigkeit wird durch die Abschuppung ton-großer Allophan-Plättchen erzeugt, die sich in einer dünnen Entkieselungs-Haut auf den Wand-Oberflächen gebildet haben. Durch Ton-Ausschwemmung läßt sich zeigen, daß in diesem Zustand ausschließlich röntgenamorpher und elektro-namorpher Allophan und zwar überwiegend in Form von ton-großen Plättchen gebildet ist. Daneben kommen aber auch bereits Allophan-Plättchen in Feinschluff-Größe vor. Dabei zeigt sich, daß die feineren Plättchen mehr nach außen zum Poren-Lumen hin angeordnet sind, während die größeren Plättchen mehr die unteren, dem Glas aufliegenden Schichten bilden. Diese schichtige Differenzierung der Teilchen-Größe könnte unter Umständen mit dem Wechsel von Befeuchtung und Austrocknung zusammenhängen, der durch Quellung und Schrumpfung besonders an der Oberfläche zum Auf- und Abplatzen von kleinen Allophan-Bruchstücken führt. Die feinen amorphen Allophan-Plättchen werden in dieser Verwitterungs-Phase bereits von der Poren-Lösung verschwemmt und setzen sich an bestimmten Orten als geschichtete dicke Porenwand-

Beläge ab. Diese zeigen Regelungs-Doppelbrechung, lassen sich isolieren und analysieren. Ihr $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Molverhältnis liegt bei 1,7, ihr Lichtbrechungs-Index bei 1,585 - 1,600. Allophan-Ton aus gealterten Partien solcher Beläge zeigt bereits Elektronen-Beugungsbilder. Die Farbe dieses Allophans ist weißlich grau.

Pyroxene: In diesem Verwitterungs-Zustand kann die Auflösung der Pyroxene schon weit vorangeschritten sein, so daß an den Stellen, wo Pyroxene eingeschlossen sind, das Netzwerk des Glases brüchig wird. Um die in Zersetzung begriffenen Pyroxene herum bilden sich ausgedehnte Höfe mit konkretionärer Eisenoxid-Abscheidung (F). Ferner entstehen breite braune Diffusions-Säume von Eisen, das sich in den Allophan-Häuten ausbreitet und hier den Allophan durch Bildung feinsten Eisenoxid-Hüllen braun färbt. Makroskopisch gibt sich der Bims in diesem Verwitterungs-Stadium durch eine beginnende fleckige Braunfärbung zu erkennen. Neben weißlichem Allophan wird nun auch brauner Allophan verschwemmt, und dies führt gelegentlich zu sedimentären Trennwand-Belägen, deren schichtiger Aufbau sich durch Farbwechsel weiß/braun zu erkennen gibt. Eine solche schichtige, regelungs-doppelbrechende Poren-Auskleidung ist in den Abbildungen 7, 8 und 9, oben rechts, zu sehen.

Wenn man aus den bräunlichen Ton-Infiltrations-Bändern der mächtigen wenig verwitterten Bims-Profile den Ton ausschlämmt und feststellen muß, daß nicht nur die eventuell vorhandenen illitischen Fremd-Beimengungen, sondern auch der amorphe Allophan-Ton braun gefärbt sind, so ist dieser Verbraunungs-Prozeß bereits in die Anfangs-Phasen der Bims-Verwitterung zu stellen, in denen die Pyroxene aufgelöst werden.

Bruchstücke: Bruchstellen und Bruchstücke können bei schwacher mechanischer Beanspruchung dort entstehen, wo

1. Pyroxene verwittern,
2. sehr dünne Wandpartien durch oberflächliche Entkieselung, Allophan-Bildung und Umwandlung des Glases zu Hydrogel-Glas weich werden, indem sie ihre versteifende Glas-Lamelle einbüßen.

Der Übergang vom gläsernen Wand-Kern zur Allophan-Haut ist nicht abrupt, sondern erfolgt über eine Hydrogel-Glas-(HG)-Zone, in der die SiO_2 -Abfuhr schwächer ist. In Abb. 11,II überlappen sich unten rechts die HG-Zonen. Die ursprüngliche Glas-Lamelle ist aufgezehrt. Es kommt zum Bruch. Die schluffgroßen Bruchstücke können aus reinem Allophan, reinem Hydrogel-Glas, meistens aber aus Glas/Allophan- oder Hydrogel-Glas/Allophan-Übergängen bestehen, wie sie in den wenig verwitterten BMS und TMS bereits häufig anzutreffen sind.

Chemische Differenzierung: Abb. 12, links. Das Diagramm charakterisiert die Verwitterungs-Phase II: Der Übergang von der stark entkieselten breiten Allophan-Haut zum frischen Glas erfolgt über eine breite Zone Hydrogel-Glas mit Q-Werten zwischen 1,7 und 4,7.

PHASE III,IIIa:	Abb. 11,III,IIIa
	Abb. 12,mitte

Glas, Hydrogel-Glas, Allophan: Die Zone der Kieselsäure-Verarmung schreitet in die Glas-Wände hinein fort. Dabei verdickt sich aber die Allophan-Haut nur noch unwesentlich. Es kommen nach innen hin vielleicht noch einige dünne Lagen harter großer heller Allophan-Plättchen hinzu, die an abgeschelferten Bruchstellen (Abb. 11,III, oben rechts) mitunter herausragen ($n = 1,580 - 1,590$). Die äußere Allophan-Haut ist dagegen regelmäßig braun. Diese durch Eisen-Oxid bewirkte Braunfärbung des dünnen rauhen Allophan-Oberflächen-Belages ist in den drei nebeneinander liegenden Wand-Aufsichten der Abb. 7a (siehe Pfeil), 7b und 9a gut zu erkennen.

Kaolinit: Zwischen die Allophan-Haut und die Hydrogel-Glas-Zone schiebt sich in dieser Verwitterungs-Phase des Bims - Glases eine Zone gut kristallisierten Kaolinitis, der in Form großer zusammenhängender Platten die Stützfunktionen der Glaswände zu übernehmen beginnt. Betrachtet man die drei Schrägaufsichten auf die gewölbten Wand-Abschnitte von Abb. 7a bei rechtwinkelig oder mit 45° gekreuzten Nicols (Abb. 8a

bzw. 8b) so erkennt man, daß die ehemals isotropen Glas-Wände schon weitgehend durch doppelbrechende Substanz, den Kaolinit, ersetzt sind. Die entstandenen Kaolinit-Platten ordnen sich - wie das in der Skizze 11,III zum Ausdruck kommt - parallel zur Oberfläche der Glas bzw. Kaolinit-Wände an. Bei der Betrachtung der Querschnitte der Waben-Wände blickt man daher senkrecht auf 100 bzw. 010 des Kaolinit. Da die maximale Doppelbrechung des Kaolinit von 0,007 der Differenz von n_{\parallel} - n_{\perp} entspricht, sind die senkrecht angeschnittenen Teile der Kaolinit-Wände am hellsten. Man vergleiche hierzu in Abb. 8b die senkrechten Anschnitte der gewölbten Wände.

Feldspat:

(Die mikromorphologische Umwandlungsreihe III)

Während die Sanidin-Einsprenglinge bislang unberührt geblieben waren, setzt nun eine progressive Anlösung und Umwandlung zu Kaolinit ein.

Diese Umwandlung wurde bereits bei den Mineral-Arten-Auszählungen in den einzelnen Korngrößen-Fractionen des Bims-Zersatzes beobachtet.

In Abb. 3 ist die Feldspat-Kaolinit-Umwandlungs-Reihe als dritte der Haupt-Verwitterungs-Reihen dargestellt. Die schluffgroßen Feldspäte gehen dabei in schluffgroße Kaolinite über.

Die mikromorphologische Untersuchung stellt allerdings in Frage, ob sämtlicher, in den Streu-Präparaten mit den Feldspat-Bruchstücken vergesellschafteter Grob-Kaolinit abschließliches Verwitterungs-Produkt des Feldspates ist.

In vielen Fällen besteht daran wohl kein Zweifel, zumal die Sanidine z.T. ausgeprägte Lösungs-Kavernen zeigen, die mit Kaolinit plombiert sind. Ein Teil der scheinbar feldspatbürtigen Kaolinit-Plättchen könnte jedoch auch dem Glas entstammen, das die Feldspäte vorher umhüllt hatte.

Wie die Umwandlung des Glases zu Kaolinit ist auch die Feldspat-Umwandlung ein Desilifizierungs-Prozeß, der sich widerspruchslos in die generelle Umwandlungs-Tendenz des Glases

einfügt. Man vergleiche hierzu das Diagramm in Abb. 2.

Zu den bekannten mikromorphologischen Phänomenen der pedogenen und hydrochemischen Feldspat-Umwandlung zu Kaolinit (FÖLSTER, H. et al., 17, LERZ, H. et al., 28, BOLTER, E., 9) gesellt sich somit eine weitere Beobachtung, deren Besonderheit darin liegt, daß hier leichter verwitterbare Komponenten, wie das Trachyt-Glas, in erheblichem Maße am Stoff-Umsatz beteiligt sind.

Bruchstücke: (Abb. 11, IIIa) Stellt man sich vor, daß bei einer mechanischen Beanspruchung eines derartig verwitterten Bims-Teilchens die Wände dort zerbrechen, wo das weiche Hydrogel-Glas einen maximalen Prozentsatz des Wandquerschnittes ausmacht, so kann nun ein breites Spektrum verschiedenartiger Mineral-Übergangs-Bruchstücke gebildet werden. Es treten in einer solchen Probe alle diejenigen schluffgroßen Übergangs-Glieder auf, die in den Umwandlungs-Reihen der Abbildung 3 dargestellt sind: Übergänge vom Glas bzw. Hydrogel-Glas zum Kaolinit, sowie die aus reinem Kaolinit, Allophan, Glas und Feldspat bestehenden Schluff-Körner und -Plättchen.

Opake Teilchen: Die um die aufgelösten Pyroxene herum abgetrennten Eisenoxid-Krusten geben der inkrustierten Glas-Kaolinit-Allophan-Substanz eine gewisse Stabilität. Nach dem Herausbrechen aus dem Waben-Verband führen diese dann als "opake Neubildungen" ein Eigenleben.

Chemische Differenzierung: Die fortschreitende Entkieselung hat in der Phase III (Abb. 12, mitte) zu einer Abflachung der Q-Kurve geführt, so daß sich der Kaolinit-Bereich innerhalb der ehemaligen Hydrogel-Glas-Zone ausbreiten konnte. Die innere plattige Allophan-Lage und die kohärente Kaolinit-Platte scheinen aber die Entkieselung des Glas-Kernes zu hemmen, so daß sich die Hydrogel-Glas-Lamelle nicht in dem gleichen Maße wie die Kaolinit-Lamelle verbreitert, sondern sogar erheblich eingengt wird.

PHASE IV

Abb. 11, IV, Abb. 12, rechts
Abbdgn. 7, 8, 9 und 10a

Glas-Allophan-Haut: Frisches Glas ist in diesem Verwitterungs-Zustand so gut wie gar nicht mehr vorhanden. Nur an den verdickten Knoten- oder Gabelungs-Stellen des Waben-Baues sind kleine Inseln von Hydrogel-Glas erhalten geblieben. Der übrige Teil der ehemaligen Glas-Lamelle ist von der ständig nach innen fortschreitenden Kaolinitisierung aufgezehrt worden.

Wie die Interferenz-Kontrast-Aufnahmen 9b und 10a erkennen lassen, werden die weichen Hydrogel-Glas-Inseln an den Gabelungs-Knoten beim Schleifen leicht herausgerissen. Sie bilden optisch isotrope Hohlformen, die von dem Dreieck aus widerstandsfähigeren und daher erhabenen, dünnen, doppelbrechenden Kaolinit-Allophan-Lamellen umrahmt werden. Zum Vergleich bringt Abb. 10b noch einmal einen Schliff von frischem Bims, bei dem diese Knoten-Stellen gleichmäßig erhaben sind. Das heißt: Hier hat keine durch Kieselsäure-Abfuhr und Mineral-Neubildung bewirkte Differenzierung der Material-Festigkeit stattgefunden.

Im Verwitterungs-Zustand IV vollzieht sich innerhalb der Allophan-Haut eine Verfestigung. Das heißt, es wird immer schwerer, Allophan-Tonteilchen durch einfaches Herausschwemmen von den Kaolinit-Waben zu lösen. Stattdessen platzt bei geringer mechanischer Beanspruchung die Allophan-Haut als Ganzes von den Kaolinit-Lamellen ab (S). So häufen sich in den Trümmer-Präparaten derartiger Proben schluffgroße, rauhe gepunktete oder wie Zucker-Krusten-Stückchen aussehende Allophan-Plättchen - etwa so, wie sie in Abb. 3, Reihe II, Stufe 2 (mitte) abgebildet sind. Diese Plättchen zeigen nun im Verwitterungs-Zustand IV alle Übergänge zu Kaolinit. Reiner glatter Plättchen-Allophan ist sehr selten geworden. Somit entsteht der Eindruck, als ob die Kaolinit-Zone sich nicht nur in das Innere der Poren-Wand hinein ausbreitet, sondern daß sie sich nunmehr auch auf Kosten der Allophan-Haut nach außen hin auszudehnen beginnt.

Dies würde eine Resilifizierung der Allophan-Haut bedeuten. Als Si-Quelle hierfür kommen wahrscheinlich die inselartigen

Hydrogel-Glas-Reste im Inneren der Gabelungs-Knoten in Betracht. Auf ihrem immer länger werdenden Diffusionsweg zu den Wand-Oberflächen hin kann die Kieselsäure zur Verkitzung der losen Häutchen und zur Resilifizierung des Allophan beitragen. Als Hinweise auf die tatsächliche Resilifizierung der peripheren Verwitterungs-Zonen können gelten:

1. Die sekundäre Verkitzung der Allophan-Haut erfolgt durch Opal-Abscheidungen.
2. Bei gründlicher Dispergierung der abgeplatzen Fladen zeigt sich, daß sie kaum noch elektronen-amorphen Allophan enthalten. Mindestens 80% der tongroßen Allophan-Stückchen besitzen schon hexagonale Gitter-Strukturen, obwohl sie noch röntgen-amorph sind.
3. In zunehmendem Maße finden sich in enger Vergesellschaftung mit dem Allophan die bereits oben abgebildeten Halloysit-Röllchen. Deren Entstehungsort liegt ebenfalls in der ehemaligen Allophan-Haut.

Einen weiteren morphologischen Beweis für die Tatsache, daß nunmehr die Kaolinitisierung auch auf dem Wege der Resilifizierung von Allophan-Plättchen erfolgt und der Plättchen-Kaolinit nicht ausschließlich als das direkte desilifikative Glas-Umwandlungs-Produkt betrachtet werden kann, sehen wir darin: Kaolinit-Plättchen, die in den Waben-Wänden direkt aus dem entkieselten Glas hervorgegangen sind, weisen - wie Abb. 3, Umwandlungs-Reihe I, verdeutlichen soll - noch die ursprünglich vorhandenen Oberflächen-Strukturen des Glases auf, z.B. die Blasen-Kavernen. Ferner sind diese Plättchen, da es sich um m.o.w. feste mechanische Wand-Bruchstücke handelt, scharfkantig gebrochen. Anders die sekundär aus Allophan hervorgegangenen Kaolinite: Sie sind - wie die vorher gebildeten Allophan-Plättchen - glatt, lappig umrissen und weich, zeigen Mosaik-Struktur mit unregelmäßiger Lage der einzelnen Kaolinit-Kriställchen und lassen sich meist bei intensiver mechanischer Behandlung zu Kaolinit-Ton dispergieren.

Die Abbildungen 7 und 9 zeigen, wie sich die härteren inneren Kaolinit-Lamellen mit scharfer Kante als Grat aus den aufgeweichten Waben-Wänden herausheben. Die weicheren peripheren Kaolinit- und Allophan-Bezirke werden dagegen, obwohl sie auch verfestigt und kohärent sind, beim Schleifen leicht erodiert.

Feldspäte: Die Umsetzung zu Kaolinit verläuft weiter.

Bruchstücke: Bei mechanischer Beanspruchung werden jetzt überwiegend abgesprengte Allophan-Krusten-Stücke (S) und Allophan-Kaolinit-Übergänge erzeugt.

Chemische Differenzierung: Abb. 12, rechts soll verdeutlichen, daß keine zentralen Glas-Partien mit Q-Werten über 4 mehr existieren. Die Kaolinit-Zone hat sich sowohl auf Kosten der Hydrogel-Glas-Zone nach links und als auch auf Kosten der Allophan-Zone nach rechts ausgedehnt. Die Drei-Gabelung des Kurven-Zuges soll unterschiedliche Grade der Resilifizierung andeuten: Es kann Allophan erhalten bleiben, Halloysit bzw. Kaolinit entstehen, oder eine Opal-Abscheidung einsetzen.

Mit der Besprechung der Verwitterungs-Stufe IV, die noch in keiner der von uns untersuchten Proben durchgehend realisiert ist, müssen wir die mikromorphologische Verwitterungs-Reihe abschließen. Wir haben weder aufgrund von eigenen Beobachtungen, noch aufgrund von Literatur-Angaben eine Vorstellung darüber gewinnen können, ob die Entwicklung im Zuge einer weiteren Entkieselung zu hydrargillit-haltigem Bims-Zersatz fortzuschreiten vermag.

Zurückkommend auf Abb. 2 können wir nunmehr feststellen, daß in den Frühstadien der Verwitterung der direkte Umwandlungs-Weg vom Glas über das Hydrogel-Glas zum Allophan bzw. Kaolinit dominiert. In den Spät-Stadien kann darauf die Rück-Wandlung vom Allophan in Kaolinit oder Halloysit einsetzen. Die Feldspat-Verwitterung läuft einseitig in Richtung auf den Kaolinit. Die Korngrößen der neugebildeten Mineral-Komponenten verändern sich im Laufe der Verwitterung wie folgt:

- a) Primäre direkte Kaolinit- und Allophan-Bildung im Anfangszustand → große Plättchen entsprechend den Ausmaßen der Poren-Wandungen, beim Allophan oberflächlich auch Grob- und Feinton.
- b) Später entstehen bei der sekundären Allophan-Kaolinit-Umwandlung und der Aufzehrung der großen Plättchen-Allophane überwiegend tongroße Kaolinit-, Halloysit- und Allophan-Teilchen, sowie schluff-große Allophan-SiO₂-Aggregat-Plättchen.

Abb. 11: obere Reihe: Verwitterungs-Sequenz eines Wand-Ausschnittes aus einem Bims-Brocken

Es bedeuten:

- G = Glas (n = 1,510)
- HG = Hydrogel-Glas (n = 1,510-1,535)
- Aw = Allophan, weißlich
- Ab = Allophan, durch Fe-oxid bräunlich
- F = Eisenoxid-Verkrustung, bzw. -Konkretion
- G-A = Glas-Allophan-Übergangs-Bruchstück
- K = Kaolinit (n = 1,557)
- F-K = Feldspat-Kaolinit-Übergangs-Bruchstück
- G-K = Glas-Kaolinit-Übergangs-Bruchstück
- HG-K = Hydrogelglas-Kaolinit-Übergangs-Bruchstück
- A-K = Allophan-Kaolinit-Übergangs-Bruchstück
- O = Opak
- S = durch SiO₂ verkittete Resilifikations-Kruste mit Halloysit-Bildung

untere Reihe: Verwitterungs-Folgen an Glimmer-Mineralen

- I heteroklastischer Zerfall (häufig bei der pedochemischen Verwitterung von Biotiten)
- II isoklastischer Zerfall (häufig bei Muskoviten und Chloriten, besonders bei Frost-Sprengung)
- III Umhüllung mit SiO₂ und Auflösung

Es bedeuten:

- P = Dreischicht-Phyllosilikat
- S = SiO₂-Hülle (Opal)
- A = Allophan
- K = Kaolinit-Kruste bzw. -Bruchstück
- SAP = SiO₂(Opal)-Allophan-Phyllosilikat-Übergangs-Bruchstück
- KP = Kaolinit-Dreischicht-Phyllosilikat-Übergangs-Bruchstück

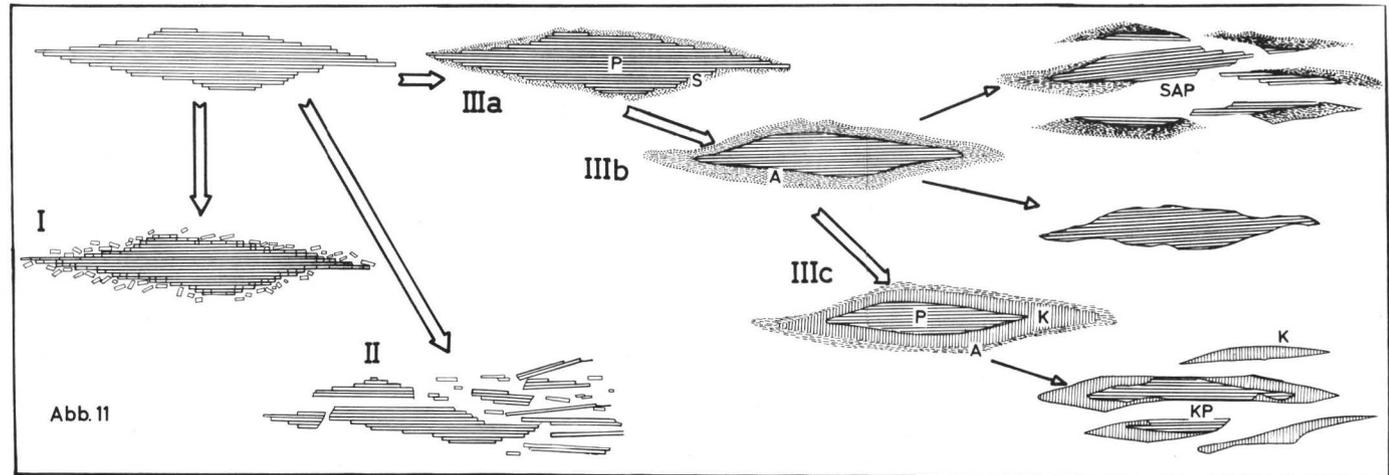
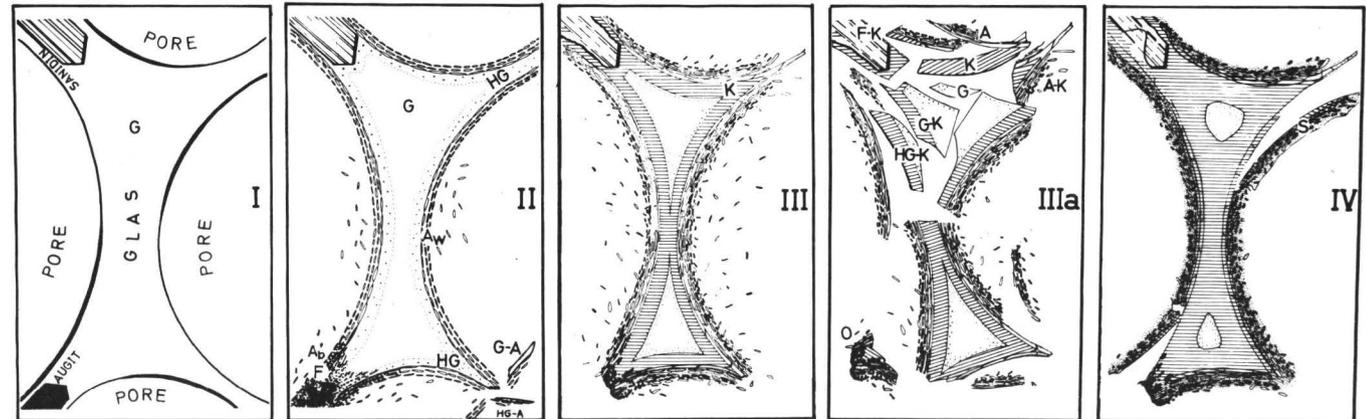
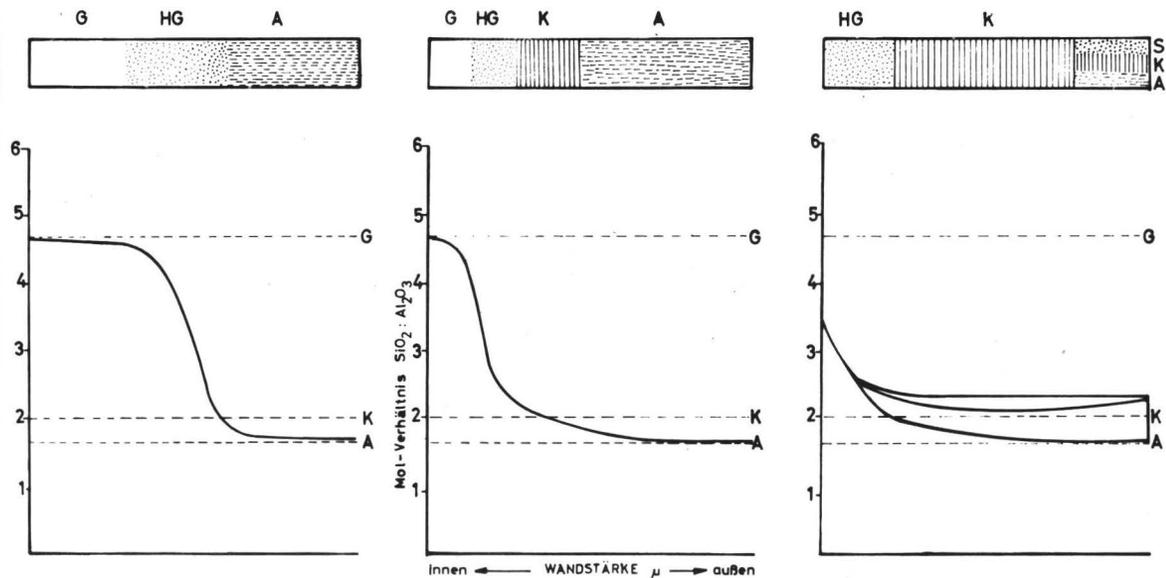


Abb. 11

Abb.2: Beziehungen zwischen $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ - Molverhältnissen und der Lichtbrechung n

Abb. 12: Schema der möglichen chemisch - mineralogischen Umwandlung im (halben) Wand - Querschnitt der Abb. 11 im Zuge fortschreitender Entkieselung der zentralen Glas - Lamelle



G = Glas

HG = Hydrogel - Glas

A = Allophan

K = Kaolinit

S = Opal (SiO_2)

4.4 VERWITTERUNG der FREMDSTOFF-BEIMENGUNGEN, speziell der GLIMMER

Synchron mit der Verwitterung der Bims-Gläser vollzieht sich in den Tuff-Misch-Sedimenten auch die Verwitterung der Fremdstoff-Beimischungen. An den Quarzen sind außer oberflächlichen Opal-Abscheidungen keine Veränderungen zu beobachten. Bei den Feldspäten ist es schwer, zwischen den tuffbürtigen und den fremdstoffbürtigen zu unterscheiden: beide sind in den stärker verwitterten TMS in übereinstimmender Weise in Umwandlung zum Kaolinit begriffen. In den weniger verwitterten TMS sind die fremdstoffbürtigen Feldspäte meist stärker angegriffen als die Sanidin-Einsprenglinge. Die relativ starke Verwitterungs-Bereitschaft der Feldspäte überrascht, da im allgemeinen in den jungen spät-glazialen Locker-Sedimenten die Feldspäte meist eine relativ hohe Verwitterungs-Resistenz aufweisen. Wir können diesem Problem aber nicht weiter nachgehen, da die Feststellung der Feldspat-Herkunft, wie gesagt, kaum möglich ist.

Anders liegt die Situation bei den Dreischicht-Mineralen der Schluff-Fraktionen (Glimmer) und der Ton-Fraktionen, da diese auf jeden Fall der Fremdstoff-Beimengung entstammen. Die an dieser Komponente beobachtbare Kaolinitisierung mag daher gleichzeitig auch eine Erklärung für die auffällig starke Kaolinitisierungs-Tendenz der Feldspäte liefern.

4.4.1 Glimmer-Kaolinit-Umwandlung in den Schluff-Fraktionen (lichtmikroskopische Untersuchungen)

In einer früheren Arbeit über die "Verwitterungs-Mikromorphologie der Mineral-Spezies in mitteleuropäischen Holozän-Böden aus pleistozänen und holozänen Lockersedimenten" (MEYER, B. und KALK, E. in Jongerius, E. (Editor) Soil Micro-morphology, Elsevier Publ.Comp. 1964, S. 109-129) sind die hauptsächlichsten pedogenetischen Verwitterungs-Phänomene an Glimmern ausführlich dargestellt worden. In Abb. 11, untere

Reihe, sind die Haupt-Zerfalls-Typen unter den Nummern I und II noch einmal schematisch aufgeführt:

- I der heteroklastische Zerfall, der direkt zur Bildung feinsten, tongroßer Glimmer-Schüppchen führt. Das Verwitterungs-Produkt besteht aus verschieden großen Teilchen; dem großen Rest-Kern und den feinen Schüppchen. Dieser Prozess ist besonders bei Biotiten zu beobachten.
- II der isoklastische Zerfall (gleichgroße Bruchstücke), der als mechanisch und chemisch bedingtes Phänomen besonders an Muskoviten und Chloriten zu beobachten ist.

Das mineralogische Studium der Verwitterungs-Stadien von Glimmern aus Tuff-Misch-Sedimenten zeigt uns, daß es darüber hinaus offensichtlich noch weitere spezifische Verwitterungs-Reihen gibt, deren Kenntnis von erheblicher bodendiagnostischer Bedeutung sein kann.

Greifen wir zurück auf Abb. 3, unterste Reihe (IV). Dort ist die Umwandlung eines Muskovits zu Kaolinit dargestellt, wie sie in fast allen glimmerhaltigen Tuff-Misch-Sediment-Proben - unabhängig vom Verwitterungs-Zustand des Glases - in den Schluff-Fraktion beobachtet wird. Ein Blick auf Abb. 2 zeigt, daß sich diese Umwandlung theoretisch ohne Kieselsäure-Abfuhr vollziehen könnte. Andererseits gibt es aber auch Biotite, die in der gleichen mikromorphologischen Abfolge zu Kaoliniten umgewandelt werden. Hierzu wäre nun, wie Abb. 2 zeigt, eine erhebliche Entkieselung notwendig. Die Beobachtung einer entkieselungs-freien, wie auch einer mit Entkieselung verbundenen Umwandlung von Glimmern zu Kaolinit klingt zunächst wenig glaubhaft - obwohl auch schon andere Autoren (KIMPE, C. de, et al., 27, SPYRIDAKIS et al., 36) Beobachtungen über die Glimmer-Kaolinit-Umwandlung in Böden mitgeteilt haben. Die mikromorphologische und röntgen-analytische Untersuchung der Glimmer-Zerfalls-Produkte hat bislang weder bei den Lockersedimenten (MEYER, B. und KALK, E. s.o.) noch in den Tiefen-Verwitterungs-Zonen tropischer Böden mit isomorphem Gesteins-Zersatz (FÖLSTER, H. und KALK, E., 17) Hinweise auf eine derartige Umwandlung der Glimmer geliefert. In den

letzten genannten Substraten erweisen sich die Glimmer im Gegenteil geradezu als eine der verwitterungs-stabilsten Komponenten.

Es kann damit der Verdacht aufkommen, daß es sich bei den von uns mit Sicherheit festgestellten Glimmer-Kaolinit-Umwandlungs- und Misch-Produkten um Bildungen handelt, die spezifisch für das Bims- und Tuff-Verwitterungs-Milieu sind. Genau wie bei den Feldspat- und Glas-Umwandlungs-Produkten müssen wir aber auch bei den Glimmern wieder damit rechnen, daß die in den Schluff-Fractionen, d.h. "Trümmerpräparaten", an isolierten Mineral-Körnchen festgestellten Glimmer-Kaolinit-Übergänge einen Prozess vortäuschen, der nur im Zusammenhang mit dem Gesamt-Verband des TMS, in den das Einzelkorn eingebettet ist, gesehen werden kann. Unter Umständen könnte der neugebildete Kaolinit - ähnlich wie wir das bereits bei der Sanidin-Kaolinit-Umwandlungs-Reihe angemerkt haben - gar nicht allein und ausschließlich aus dem Glimmer hervorgegangen sein, sondern unter Zufuhr von Fremdstoff-Komponenten und unter Mitbeteiligung der Glimmer-Matrix nach Art einer Festkörper-Reaktion entstanden sein.

VERWITTERUNGS-GANG IIIa-c, Abb. 11, untere Reihe

IIIa: Kieselsäure-Abfuhr aus den Gläsern und Abscheidung auf den Glimmer-Oberflächen der TMS:

Bei der Behandlung der Verwitterungs-Abfolge von Tuffen und TMS haben wir bislang lediglich den Prozeß der Si-Abfuhr in den Vordergrund gestellt. Wir haben noch keine Gedanken über den Verbleib der aus den Gläsern abgeführten SiO_2 geäußert. Lediglich in der letzten Verwitterungs-Phase (IV) haben wir auf die sekundären Verfestigungen der Allophan-Hülle durch abgeschiedenen Opal und die Resilifizierung hingewiesen.

Sicher wird ein erheblicher Teil der freigesetzten Kieselsäure aus den Bims-Decken ausgewaschen. Dies beweisen zumindest die chemischen Gesamt-Analysen der Bims-Profile.

Andererseits beobachtet man aber: Vom ersten Augenblick der SiO_2 -Freisetzung aus den Gläsern an wird in der Matrix der TMS Opal abgeschieden. Dies ist besonders gut auf den Oberflächen der beigemischten nicht tuff-bürtigen Mineral-Körner zu sehen, auf denen sich häufig recht dicke Beläge bilden.

So sind auch in den primären Verwitterungs-Stadien der TMS die Schluff-Glimmer (P) mit einer m.o.w. dicken amorphen Opal-Hülle (S) maskiert, was sich an künstlich erzeugten Splittern leicht beweisen läßt. Diese Umhüllung ist es, die die Verwitterung aller Glimmer-Arten in eine andere Richtung (III) lenkt als sie für I und II beschrieben wurde.

IIIb: Opal-Allophan-Umwandlung auf den Glimmer-Oberflächen:

Mit zunehmendem Verwitterungs-Grad der TMS wandeln sich die Opal-Hüllen der Glimmer zu Allophan. Dieser bleibt bei den Muskoviten hell, bei den Biotiten kann er braun werden. Offensichtlich hemmt die poröse Opal-Auflage die hydrolytische Verwitterung der Phyllosilikate kaum. Vielmehr scheint es so, als ob sie die Verwitterung geradezu beschleunigt, indem ein Teil des Glimmer-Al und -Fe in die Opal-Hülle diffundiert und hier zur Allophan-Bildung Anlaß gibt.

Zerdrückt man in diesem Zustand einzelne Glimmer-Plättchen, so zerfallen sie in der Regel zu Bruchstücken, die alle Übergänge zwischen Glimmer, Allophan und gelegentlich auch noch Opal vereinen (Abb. 11, unten, Reihe III, SAP). Interessant ist ferner, daß man den porösen Allophan-Belag leicht und für die Glimmer schonend mit kochender NaOH (Methode siehe oben) herunterlösen kann. Die nach dieser Behandlung nackten Glimmer-Teilchen zeigen dann Lösungs-Kavernen, -Rundungen, -Erosions-Furchen und sichelförmige Ablösungs-Zungen, wie wir sie an verwitterten Glimmern aus anderen glasfreien Locker-Sedimenten bei gleicher Behandlung noch nicht beobachten konnten. Wir werten dieses als ein Zeichen dafür, daß sich unter der schützenden Hülle eine von mechanischen Einflüssen nicht gestörte Lösungs-Verwitterung im Sinne einer fortschreitenden diffusiven Disproportionierung des Aluminiums vollzieht.

IIIc: Allophan-Kaolinit-Umwandlung in den peripheren Verwitterungs-Zonen der Glimmer:

Mit der fortschreitenden Ausdehnung der Verwitterungs-Kruste in das Innere der Glimmer hinein wandelt sich - ähnlich wie bei den Gläsern - die Tendenz der mineralogischen Umwandlung in Richtung zum Kaolinit. Dabei wird sowohl die bestehende Allophan-Hülle als auch das Grund-Gerüst der Glimmer von der sich verdickenden Kaolinit-Zone aufgezehrt.

Bei der mechanischen Manipulation zur Korngrößen-Trennung werden Bruchstücke erzeugt. Sie bestehen in der Verwitterungs-Phase IIIc überwiegend aus Glimmer-Kaolinit-Plättchen und zeigen in der Aufsicht einen Habitus, der dem in Abb. 3 dargestellten entspricht. Diese Plättchen und die mit Kaolinit verkrusteten Gesamt-Teilchen zeigen bei der NaOH-Behandlung keine erkennbaren Veränderungen im Gegensatz zu Stufe IIIb.

Zusammenfassend ist zu sagen: Die Aussage, daß Glimmer kaolinitisiert werden ist in sofern inkorrekt, als ein wesentliches Element des Kaolinitis von außen in Form von Kieselsäure zugeführt wird. Der Kaolinit entsteht also als ein Mischkomponenten-Reaktions-Produkt aus Glimmer-Substanz und Kieselsäure, wobei die Stufe des Allophans durchlaufen wird. Infolgedessen ist es auch nicht gerechtfertigt, zur Beschreibung dieses Vorganges die Begriffe "Aufkieselung" und "Entkieselung" zu verwenden. Im Grunde handelt es sich nämlich um einen diffusiven Ausgleich des Al-Gehaltes zwischen den Glimmern und dem Gesamt-Querschnitt der zugefügten SiO_2 -Hülle. Dabei verarmen die unter der Hülle befindlichen peripheren Glimmer-Partien an Aluminium, während die Kieselgel-Hülle Aluminium aufnimmt. Die Verteilung der SiO_2 scheint bei dieser Festkörper-Reaktion konstant zu bleiben.

4.4.2 Allophanisierung der Dreischicht-Tonminerale in den Ton-Fractionen (elektronenmikroskopische Untersuchungen)

Die durch SiO_2 -Überzüge ausgelöste Umwandlung von Dreischicht-

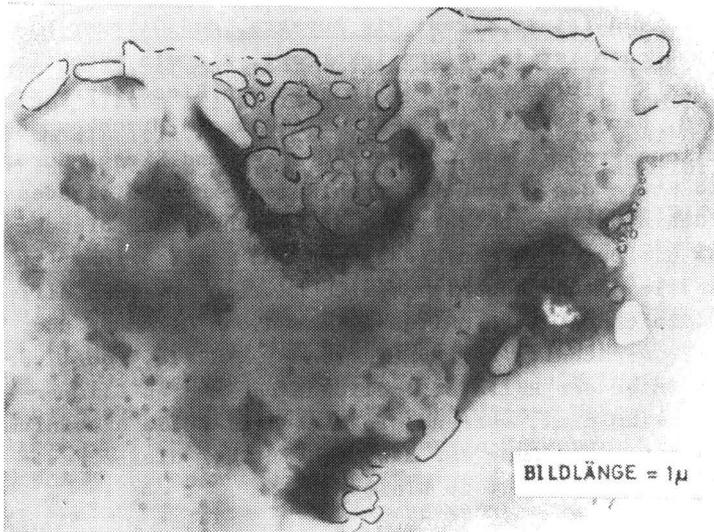
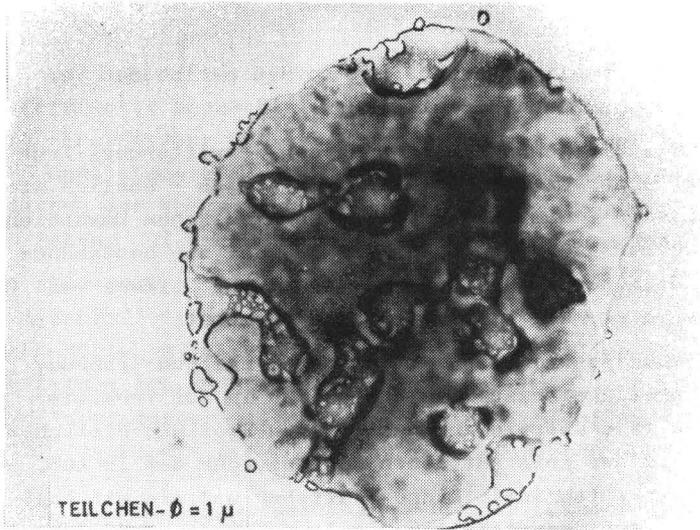
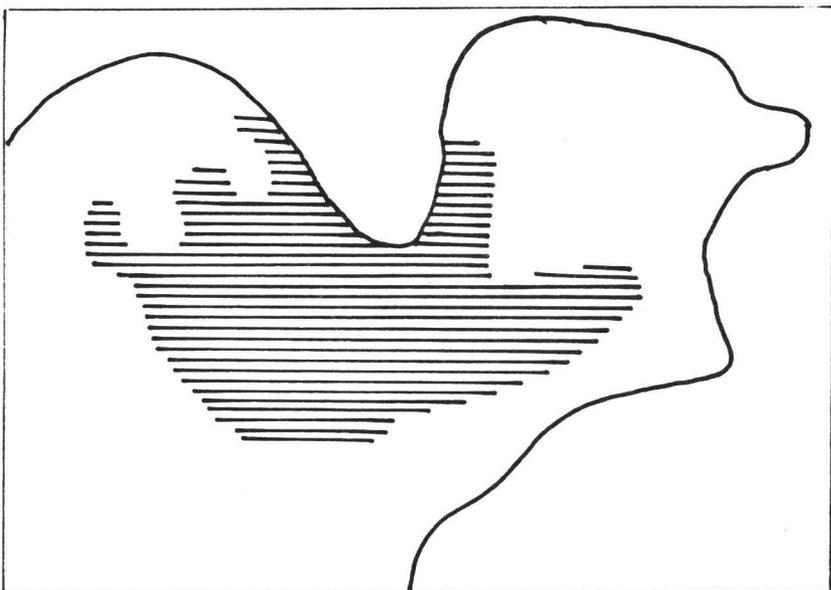
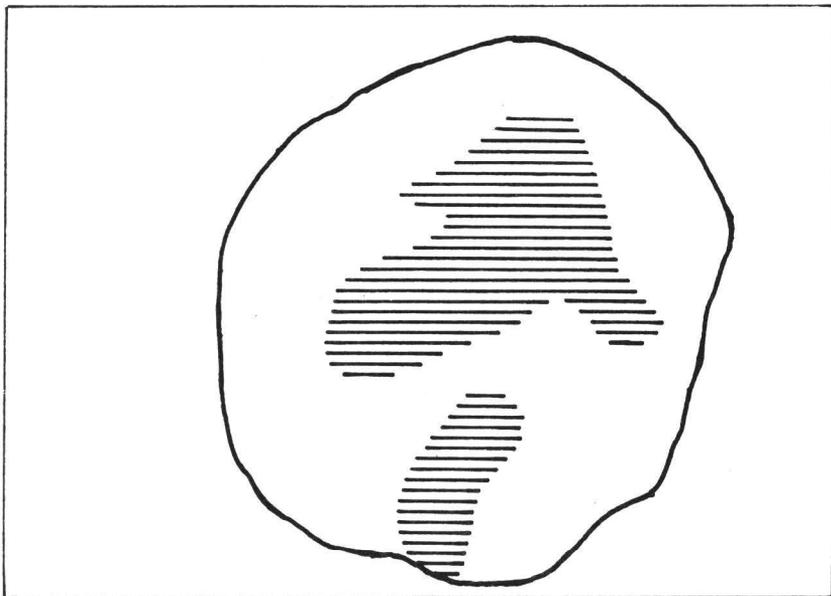


Abb. 13: Glimmer-Teilchen im Übergang zu Allophan
Anlösungs-Kavernen mit insulären Allophan-Abscheidungen. (Die Skizzen geben die Verteilung elektronenischer und -anisotroper (schraffiert) Zonen wieder



Phyllosilikaten zu Allophan und Kaolinit beschränkt sich in den TMS nicht auf die Glimmer der Schluff-Fraktionen. Auch die Ton-Fraktionen werden von dieser Umwandlung ergriffen, und die Aufzehrung der Dreischicht-Tonminerale ist naturgemäß um so weitgehender, je feiner der Plättchen-Durchmesser der Dreischicht-Minerale ist. Als Umwandlungs-Produkt tritt neben den Allophan der Halloysit und der Meta-Halloysit, während der Kaolinit zurücktritt.

In den Röntgen-Beugungs-Diagrammen der Schluff- und Ton-Fraktionen von Tuff-Misch-Sedimenten, selbst mit hohem Glimmer- und Illit-haltigen Fremdstoff-Beimischungs-Anteil, sind die Peaks der Dreischicht-Tonminerale schlecht ausgeprägt und verschwinden zu den kleineren Fraktionen hin. Ähnlich verhalten sich die Kaolinit-Peaks. Stattdessen hebt sich zwischen 10 und 7 Å eine breite Plateau-Bande heraus, die sich erhöht, verflacht und verbreitert. Beständig ist lediglich der 4,45 Å-Halloysit-Peak.

Die mangelnde Differenzierung der Röntgen-Beugungs-Diagramme könnte darauf beruhen, daß die dicken Allophan-Hüllen keine ausreichende Orientierung der Dreischicht-Mineral-Plättchen parallel 001 gestatten. Durch Beseitigung der Allophan-Hüllen mit NaOH läßt sich jedoch keine Verbesserung der Orientierung erreichen. Es scheint demnach so, als ob tatsächlich eine weitgehende Aufzehrung der Illite, Vermikulite und Montmorillonite in den Ton-Fraktionen eingetreten ist. In den Schluff-Fraktionen läßt sich dagegen durch NaOH-Behandlung eine geringe Verbesserung der Orientierung erzielen, was darauf zurückzuführen ist, daß hier noch hinreichend große Glimmer-Kerne erhalten sind. Demnach sind die Reflex-Höhen, die in den Schluff-Fraktionen sehr hoch sein müßten, trotz mehrfachen Verschiebens der Präparate klein - ein Hinweis auf den auch hier fortgeschrittenen Desintegrations-Grad der Schluff-Glimmer.

In Abb. 14a sind die maßstabgetreuen Röntgen-Beugungs-Diagramme der Schluff-Fraktionen von TMS dargestellt. Die eine Probe (Hünstollen - grau) enthielt wenig Fremdstoff-Beimengung und ist nur schwach verwittert, während die andere (Northeim) einen erheblichen Anteil glimmerhaltiger Fremd-Beimengungen aufweist und stark verwittert ist. Die Unterschiede sind relativ gering. Immerhin zeigt das erstgenannte TMS noch in den Fein-Schluff-Fraktionen erhaltene Dreischicht-

Minerale. Das letztgenannte dagegen besitzt nur noch im Grobschluff Glimmer- und Kaolinit-Reflexe, in den Fraktionen kleiner als 20μ dagegen nur noch das breite Plateau der halloysitisch-kaolinitischen Glimmer - Allophan-Umwandlungs-Produkte.

In Abb. 13 versuchen wir die Allophanisierung von Illiten in Tongröße zu demonstrieren. Dazu dient uns die elektronenmikroskopischen Aufnahmen eines 1μ und eines 4μ großen Glimmer-Teilchens, die nicht von ihrer Allophan-Hülle befreit worden sind. Man erkennt aus den unterschiedlichen Heligkeiten die in der Aufsicht verdeckten Lösungs-Kavernen und an den Rändern die Lösungs-Buchten, ferner die große Zahl von sich ablösenden kreis- bis mandel- oder nierenförmigen Allophan-Schüppchen. Den photographischen Aufnahmen sind 2 Strich-Zeichnungen derselben Mineral-Körner beigegeben. Auf diesen sind diejenigen Bezirke schraffiert eingetragen, in denen mit Hilfe der Feinbereichs-Beugung beim rasterhaften Abfahren der Oberfläche und größtmöglicher Einengung durch die Blenden-Systeme noch kristalline (hexagonale) Strukturen nachgewiesen werden konnten. Die weiß gelassenen Ausschnitte sind elektronen-amorph. Dieser Befund bestätigt, daß das in Abb. 11 für die Schluff-Glimmer entworfene Konzept auch für die Tonfraktion Gültigkeit hat - mit der Ausnahme, daß es hier nicht mehr zur Bildung wohlkristallisierter nachweisbarer Kaolinit-Blättchen kommt, sondern bestenfalls Halloysit entsteht, der wie schon beschrieben, klare Röllchen zeigt und mit den Illit-Relikten verbacken sein kann.

4.4.3 Einfluß der Fremdstoff-Menge auf den Verwitterungs-Grad

Die im Absatz 4.3.1 gestellte Frage nach der Ursache für die Erscheinung, daß mit einer Erhöhung des Fremdstoff-Gehaltes der TMS auch der heutige Verwitterungs-Grad zunimmt, ist aufgrund der mikromorphologischen Untersuchungen nicht zu beantworten. Wir nehmen an, daß mit zunehmender Fremdstoff-Beimen-

Abb. 74a RÖNTGENBEUGUNGSDIAGRAMME der SCHLEIFFRAKTIONEN lufthaltiger MISCHSEDIMENTE
(Ca-Belegung, Reflexintensitäten durch Subtraktion der Untergrundzählrate korrigiert)

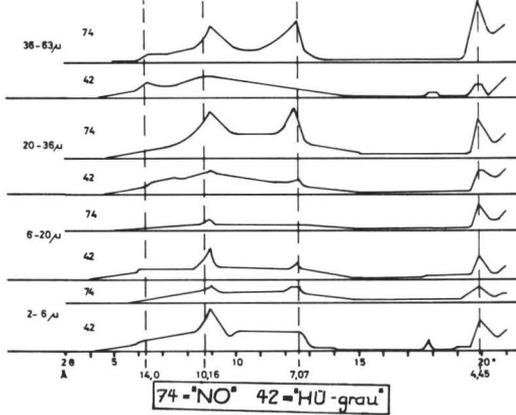


Abb. 74b RÖNTGENBEUGUNGSDIAGRAMME des FEINTONES aus LÖSSEN, lufthaltigem MISCHSEDIMENT und BIMS
(Ca-Belegung, Reflexintensitäten durch Subtraktion der Untergrundzählrate korrigiert)

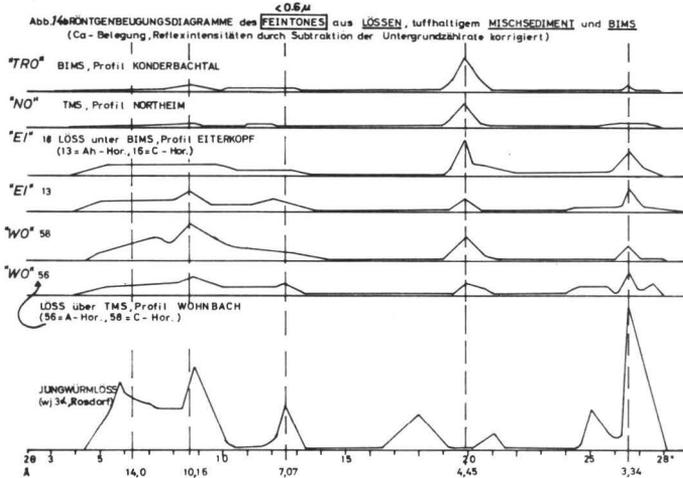
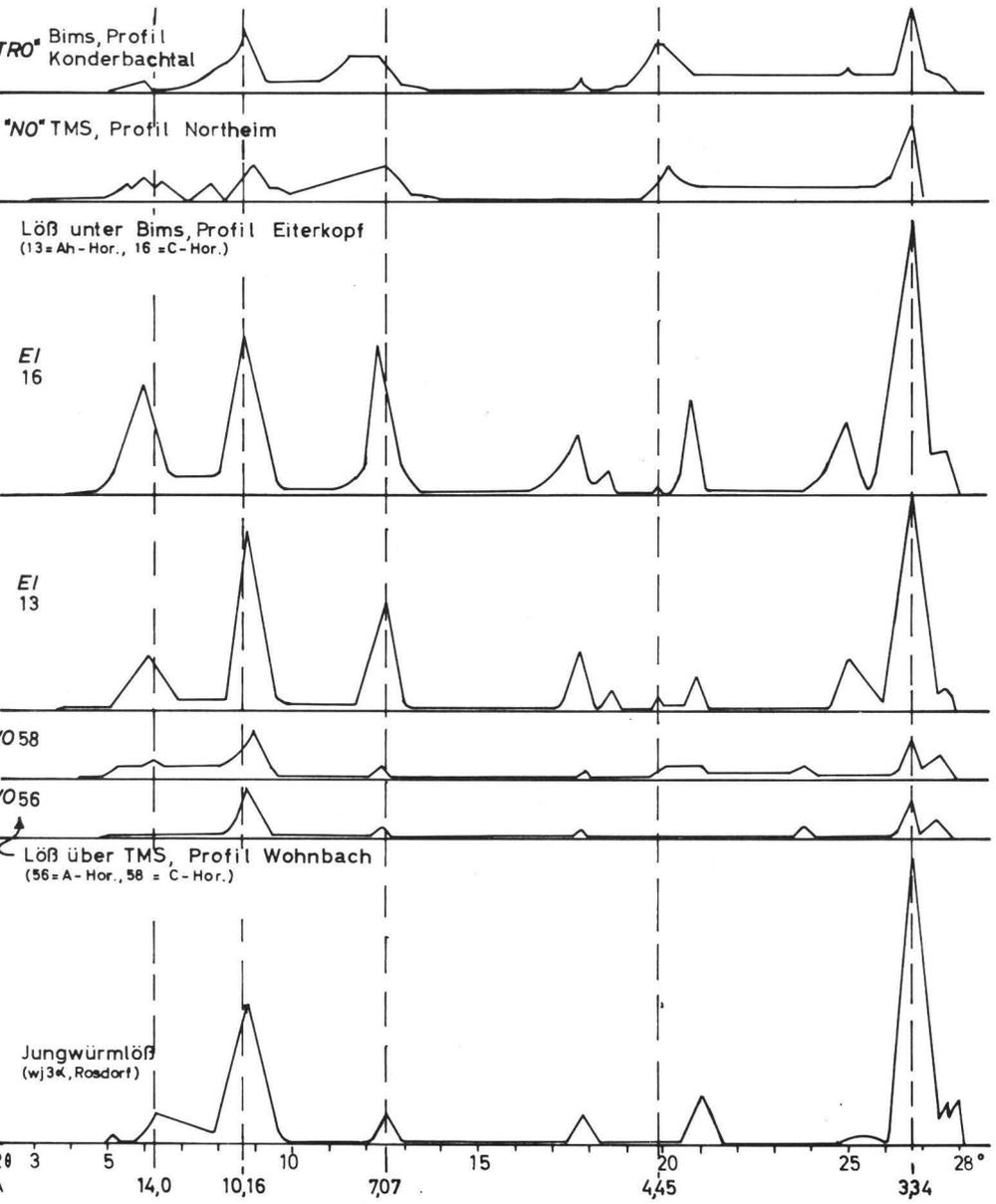


Abb. 14c Röntgenbeugungsdiagramme der **Grobtone** aus **Lössen**, tuffhaltigem Mischsediment (TMS) und **Bims**
(Ca-Belegung, Reflexintensitäten durch Subtraktion der Untergrundzählrate korrigiert)



gung zu den aus porösen Körpern bestehenden Tuff-Teilchen die Wasserführung der TMS wesentlich verbessert wird.

4.5 DER CHEMISCH-MINERALOGISCHE EINFLUSS VERWITTERN- DER BIMS-, TUFF- und MISCHSEDIMENT-DECKEN auf UNTERLAGERENDE (bzw. überlagernde) SEDIMENT- SCHICHTEN

Was geschieht mit der Kieselsäure, die aus den Bims-, Tuff-, BMS- oder TMS-Decken ausgelaugt und mit dem Gravitationswasser in den Untergrund abgeführt wird, oder mit der aufsteigenden oder hangabwärts bewegten Boden-Lösung in überlagernde Nicht-Tuff-Decken gelangt.

Ein gewisser Teil wird mit dem Grundwasser in das Oberflächenwasser und in die Flüsse übergehen. Sind die den Tuff überlagernden Locker-Sediment-Decken feinporig, so wird sich hier im Wechsel der Befeuchtung infiltrierte Kieselsäure niederschlagen. Dies müßte hier theoretisch zu ähnlichen Verwitterungs-Bildern führen, wie wir sie bereits von den Fremdstoff-Beimengungen der TMS her kennen.

Im Zusammenhang mit dieser Frage haben wir die Horizonte der jungwürm-zeitlichen Löß-Pakete untersucht (GEBHARDT, H. et al., 24), die zum Teil entkalkt, zum Teil bis zur Grenze Bims/Löß kalkhaltig sind.

Der Weg der freigesetzten und abwärts wandernden Kieselsäure läßt sich in diesen Lössen anhand der häufigen Opal-Abscheidungen auf den Schluff-Körnern verfolgen.

Untersucht man die Tonfraktionen dieser unter Bims-Einfluß stehenden Lössen, so findet man - unabhängig vom Entkalkungszustand - , daß tatsächlich bis in Tiefen von 1,4 m und mehr unterhalb des Bims/Löß-Kontaktes die ehemals aus glimmerbürtigen Dreischicht-Tonmineralen bestehenden Feinton-Fraktionen kleiner $0,6 \mu$ in gleicher Weise zu Allophan und Halloysit umgewandelt worden sind, wie die fremdstoff-bürtigen

Glimmer- und Illit-Komponenten der TMS.

Der Umwandlungs-Grad der Kornfraktionen des Lösses kann dabei sehr unterschiedlich sein: In Abb. 14b zeigen die 4 Löß- Feinton-Fraktionen vom Eiterkopf bei Ochtendung/Eifel und Wohnbach/Hessen kaum Unterschiede. Diese sind in allen 4 Fällen etwa gleich stark, d.h. bis zur weitgehenden Aufzehrung der Dreischicht-Tonminerale in halloysitisch-kaolinitischen Allophan-Ton umgewandelt worden. Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen wie bei den TMS gut ausgeprägte Halloysite, Glimmer- und Allophan-Übergänge und Allophane mit beginnender Kristall-Struktur (s.o.). Zum Vergleich diene der normale unverwitterte Feinton des nicht von Bims beeinflussten Jungwürm-Lösses von Rosdorf (unteres Diagramm).

In den Grobton-Fraktionen (siehe Abb. 14c) ist bei Wohnbach noch eine ähnlich starke Umwandlung wie in der Feinton-Fraktion zu beobachten. Der Grobton vom Eiterkopf dagegen zeigt bereits ein gut ausgeprägtes Dreischicht-Tonmineral-Diagramm. Allerdings deutet der außergewöhnlich hohe Kaolinit-Peak (vergleiche hierzu Rosdorf, untere Reihe) darauf hin, daß auch in den Grobton-Proben vom Eiterkopf die Umwandlung beginnt.

Die Schluff-Fraktionen beider Profile zeigen übereinstimmend außer den Opal-Abscheidungen und außer einer überhöhten Quarz-Menge bzw. einer verminderten Feldspat-Menge keine ins Gewicht fallenden sichtbaren Veränderungen. Das bedeutet, daß der Umwandlungs-Grad der den Bims begleitenden Löß-Decke insgesamt schwächer ist als der der Fremdstoff-Beimengungen in den TMS. Doch reicht er aus, um in den feinkörnigen, oberflächenreichen Fraktionen die aufgezeigten Veränderungen sichtbar werden zu lassen.

Zusammenfassend ist also zu sagen, daß die für die TMS charakteristischen Mineral-Umwandlungs-Prozesse infolge des lösungschemischen Transportes von SiO_2 weit über die TMS-Schicht hinaus in die über- und unterlagernden Sediment-Decken hinein ausstrahlen können. Dies scheint uns ein für allgemeine bodengenetische Fragen wichtiger Befund zu sein,

der bei allen bilanz-analytischen Untersuchungen holozäner Böden im Einwirkungs-Bereich des Laacher Tuffs nicht übersehen werden sollte.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit befaßt sich mit der pedochemischen und litho-hydrochemischen (Tiefen-Zersatz-) Verwitterung der Trachyt-Pyroklastika der als alleröd-zeitlich datierten Laacher Eruptions-Phase in West-Deutschland. Anhand eines Nomenklatur-Schemas werden die untersuchten Sediment-Typen gegliedert in Bims (B), Tuff (T), Bims-Misch-Sedimente (BMS) und Tuff-Misch-Sedimente (TMS).

Neun Entnahme-Stellen werden so ausgewählt, daß mit einem Minimum an Proben ein Maximum an kontrollierbaren Varianten eingeschlossen wird: feucht ↔ trocken, grobkörnig ↔ feinkörnig, fremdstoffreich ↔ fremdstoffarm, gering verwittert ↔ stark verwittert, Ca-hydrogencarbonat-reich ↔ Ca-hydrogencarbonat-frei.

Bevorzugt betrachtet werden:

1. Die Verwitterungs-Intensität, chemisch charakterisiert durch die Abfuhr von Alkali-, Erdalkali-Kationen und SiO_2 , mineralogisch charakterisiert durch die Aufzehrung der Ausgangs-Minerale (Gläser, Augite, Sanidine des Tuffs - Feldspäte und Glimmer der Fremdstoff-Beimengungen) in der Reihenfolge ihrer relativen Verwitterungs-Stabilität und durch die Menge der Neubildungs-Produkte,
2. die Richtung der verwitterungs-bedingten Mineral-Umwandlung, charakterisiert durch die Relativ-Anteile der Neubildungs-Produkte,
3. die Änderung der Umwandlungs-Richtung im Verlauf der fortschreitenden Verwitterung und die damit einhergehende Wandlung des Verwitterungs-Milieus.

An Methoden werden angewendet: Die üblichen zur Mineral-

Analyse erforderlichen Korngrößen-Fraktionierungs-Methoden, die Röntgenfluoreszenz-Analyse zur chemischen Charakterisierung, polarisations- und phasenkontrast-optische Mineral-Bestimmungs- und Auszählungs-Verfahren, Röntgen- und Elektronen-Beugungs- sowie elektronen-mikroskopische Untersuchungen der Ton-Fraktionen. Besonderes Gewicht wird auf die mikromorphologische Erfassung (z.T. im Interferenz-Kontrast-Verfahren) und Gliederung der Kompartimente oder Chemotope gelegt, der kleinsten distinkten Reaktions-Räume, in denen sich die charakteristischen Mineral-Umwandlungen vollziehen.

Unabhängig von den obengenannten modifizierenden Einflüssen vollzieht sich in den B, T und TMS ein einheitlich ausgerichteteter Verwitterungs- und Mineral-Umwandlungs-Prozeß. Dieser erfährt im Laufe der Zeit eine Wandlung. Bei den TMS ist die Verwitterung der Pyroklastika und der Fremdstoff-Anteile (besonders der Glimmer) getrennt zu betrachten:

- a) Das Trachyt-Glas mit seinen Einschlüssen Sanidin und Augit, wandelt sich im Zuge der Entkieselung in den peripheren Partien der Bims-Waben-Wände zu weichem, deterioriertem Hydrogel-Glas und zu Allophan. Dieser besitzt in den Außen-Zonen Ton-Größe, in den Innen-Zonen Schluff-Größe und wird durch das Eisenoxid der verwitternden Augite braun gefärbt. Mit fortschreitender Aufzehrung des Glases setzt die Kaolinit-Bildung ein. Der Kaolinit ersetzt das Glas in den Bims-Waben-Wänden. Durch Resilifizierung der Allophan-Krusten in den Spätphasen der Verwitterung kann sich die Kaolinit-Zone auch in die peripheren Bereiche der Bims-Waben-Wände hinein ausdehnen. Dieser Abfolge entsprechen die für die einzelnen Verwitterungs-Stadien typischen Mineral-Bruchstückchen mit Übergangs-Charakter: 1) Glas → Hydrogelglas → Allophan, die Umwandlungsreihe Glas → Kaolinit und Feldspat → Kaolinit in den Anfangs-Stadien und 2) die Umwandlungsreihe Allophan → Kaolinit und Allophan → Halloysit in den Endphasen der Verwitterung.

Entsprechend den Orten und zeitlichen Phasen der Entstehung tritt Allophan teils in Ton - teils in Schluff-Größe in

Erscheinung, Kaolinit tritt dagegen überwiegend in Schluff- und Halloysit ausschließlich in Feinton-Größe auf.

- b) Auf den schluff- bis sandgroßen Fremdstoff-Mineralkörnern scheidet sich aus dem Trachyt herausgelöste Kieselsäure als Opal ab. Dadurch wird eine intensive Umwandlung der Feldspäte, besonders aber der Glimmer zu Kaolinit eingeleitet. Dies ist eine für Mitteleuropa bislang unbekannte neue Verwitterungs-Sequenz der Glimmer-Mineraie. Es kommt dabei in den peripheren Bereichen der Glimmer in zeitlicher Abfolge zu folgenden Übergängen: Phyllosilikat/Kieselsäure-Kruste, Phyllosilikat/Allophan/Kieselsäure-Kruste und Phyllosilikat/Kaolinit/Allophan-Hülle. Beim Ablösen der Umwandlungs-Krusten zeigen die Glimmer Lösungs-Kavernen und gerundete Lösungs-Formen. Das Auftreten solcher Formen in bestimmten holozänen Böden (z.B. Lockerbraunerden) läßt damit unter Umständen auf ehemalige Bims-SiO₂-Beeinflussung schließen. Betont wird, daß eine echte "Kaolinitisierung der Biotite und Muskovite" nicht vorliegt. Der Kaolinit resultiert aus einer Art Festkörper-Reaktion zwischen dem Dreischicht-Silikat und der zugefügten SiO₂-Hülle.

Die durch SiO₂ bewirkte Glimmer-Kaolinit-Umwandlung wird lediglich in den Schluff-Fraktionen nachgewiesen. In den Ton-Fraktionen wird elektronenmikroskopisch eine Umwandlung der Dreischicht-Tonminerale in Allophan beobachtet.

Die aus den B-, T- und TMS-Decken abgeführte Kieselsäure kann in unter- und überlagernden, an pyroklastika-freien Sediment-Decken Verwitterungs-Erscheinungen auslösen. Diese gleichen den an den Dreischicht-Phyllosilikaten der TMS beobachteten Veränderungen. So kann am Beispiel von bims-überlagerten Lössen nachgewiesen werden, daß die aus Illit, Vermikulit und Montmorillonit bestehenden Feinton-Fraktionen, bei intensiver Einwirkung auch die Grobton-Fraktionen, unter dem Einfluß infiltrierender SiO₂ (z.T. ohne vorherige Entkalkung) allophanisiert und z.T. kaolinisiert werden.

L I T E R A T U R - V E R Z E I C H N I S

1. AHRENS, W. Das Alter des großen mittelrheinischen Bimsausbruchs und sein Verhältnis zu den jüngsten Rheinterrassen.
Geol.Rundschau, 18, Stuttgart 1927
2. AHRENS, W. Die Entstehung des Laacher Sees und die Ausbruchsstellen der weißen Bimssteine des Neuwieder Beckens.
Jahrb.d.pr.Geol.LandesAnst., 49, Berlin 1928
3. AHRENS, W. Die Verbreitung des mittelrheinischen alluvialen Bimssteines und daraus folgende Rückschlüsse auf den Eruptionsmechanismus.
Zentralbl.f.Min.Abt.B., Stuttgart 1929
4. AHRENS, W. Jungdiluvialer Tuff im Eichsfeld. Ber. STEINBERG, K. Reichsamt f.Bodenforschung, Wien 1943
5. BEAR, F.E. Chemistry of the Soil.
2nd Edition, Reinhold Publishing Corporation, New York and Hall Ltd. London
6. BECKER, E. Stratigraphische und bodenkundliche Untersuchungen an jungpleistozänen und holozänen Ablagerungen im nördlichen Oberrheintalgraben.
Diss.Naturwiss.Fak.Frankfurt/M., 1964
7. BESOIN, M.E. Clay Mineralogy of some Volcanic Ash GARCIA-VICENTE,J. Soils of Chile.
Neues Jahrb.f.Mineral.Abhandl., 98,3, S. 349-366, 1962
8. BIRELL, K.S. Allophane in Volcanic Ash Soils. FIELDER, M. Journal of Soil Science Vol.3, No.2, S. 156-166, 1952
9. BOLTER, E. Über Zersetzungsprodukte von Olivin-Feldspatbasalten.
Beitr.z.Min.u.Petrograph, 8,S.111-140, 1961
10. BRAUNS, R. Bimssteine auf primärer Lagerstätte von Görzhausen bei Marburg.
Z.deutsch.geol.Ges.,Berlin, 1886
11. BRAUNS, R. Hauyn in den Bimssteinsanden der Umgebung von Marburg.
Z.deutsch.geol.Ges., Berlin, 1892

12. BROWN, G. X-Ray Identification and Structures of Clay Minerals. Mineralogical Society, London 1951
13. CORRENS, C.W. Einführung in die Mineralogie, 2, Springer-Verlag, Berlin 1968
14. DUNDAL, R. SOEPRAPTOHARDJO, M. Some Considerations on the Genetic Relationship between Latosols and Andosols in Java (Indonesia). Trans.7th Int.Congr.Soil Sci.Madison, 4, S. 229, 1960
15. FIELDES, M. Clay Mineralogy of New Zealand Soils Part II: Allophane and Related Mineral Colloids. New Zealand Journal of Soil Science and Techn., 37, No.3, S. 336-350, 1955
16. FIELDES, M. SCHOFIELD, R.K. Mechanisms of Ion Adsorption by Inorganic Soil Colloids. New Zealand Journ.of Science, Vol.3, No.4, S. 563-579, 1960
17. FÖLSTER, H. KALK, E. Mineralogische Untersuchungen an tiefgründigen Verwitterungsdecken mit Hinweisen auf das unterschiedliche Verhalten von Feldspäten und Phyllosilikaten bei tiefgründiger und oberflächennaher Verwitterung. Chem.d.Erde, 26, Heft 3, S.188-218,1967
18. FRECHEN, J. Die Herkunft der spätglazialen Bims- tuffe in mittel- und süddeutschen Mooren. Geol.Jahrb., 67, S.209-230,Hannover 1952
19. FRECHEN, J. Die Tuffe des Laacher Vulkangebietes als quaternäre geologische Leitgesteine und Zeitmarken. Fortschr.Geol.Rheinl.u.Westf., 4, S. 363-369, Krefeld 1959
20. FRECHEN, J. Der Rheinische Bimsstein. Georg Fischer Verlag, Wittlich 1953
21. FURKERT, R.J. FIELDES, M. Allophane in New Zealand Soils. Transact. 9th Internat.Congress Soil Sci., III, S.133-141, Adelaide 1968
22. GARCIA-VICENTE, J. BESOIN, M.E. Mineralogia de las Arcillas de algunos suelos volcanicos de Chile. Annales Edafologia Agrobiol., 20, S. 497-550, Madrid 1961

23. GEBHARDT, H.
MEYER, B.
SCHEFFER, F. Mineralogische Schnelluntersuchungen der Grobton-, Schluff- und Feinsandfraktion von Böden mit dem Phasenkontrastmikroskop. Zeiss-Mitteilungen, 4, 7.Heft, 1967
24. GEBHARDT, H.
HUGENROTH, P.
MEYER, B. Vergleich der Bodenentwicklungsintensitäten im Alleröd und Holozän. Göttinger Bodenkundliche Berichte (im Druck)
25. JARITZ, G. Ein Vorkommen von Imogolit in Bimsböden Westdeutschlands. Zeitschr.Pflanzenernähr., Düngung, Bodenkunde, 117, S. 65-77, 1967
26. KANNO, J.
ONIKURA, Y.
HIGASHI, T. Weathering and Clay Mineralogical Characteristics of Volcanic Ashes and Pumices in Japan. Transact. 9th Internat.Congr.Soil Sci.,III, S. 111-122, Adelaide 1968
27. KIMPE, C.de
TARDY, Y. Etude de l'alteration d'une Biotite en Kaolinite par spectroscopie infrarouge. Extrait du Bulletin du Groupe Francais des Argiles, Tome XIX,Fascicule 2, 1968
28. LERZ, H.
BORCHERT, W. Verwitterung von Mikroklin unter atmosphärischen Temperatur-Druck-Bedingungen. Ein experimenteller Beitrag zum Problem der Kaolinisierung. Chem.d.Erde, 22, S.386-429, 1962
29. LOŽEK, V. Quatärmollusken der Tschechoslowakei. Verlag der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Praha 1964
30. MITCHELL, B.D.
FARMER, V.C.
McHARDY, W.J. Amorphous Inorganic Materials in Soils. Advances in Agronomy, Vol.16,S.327-383, 1964
31. ROTH, F. Die Tuffe der Umgebung von Gießen. Diss. Gießen 1892
32. SALGER, M. Mineralogische und sedimentpetrographische Untersuchungen am Kaolinprofil der Bohrung Kick Nr. 9 bei Schnaittenbach/Opf. Geologica Bavarica, 37, S. 5-84, 1958
33. SCHÄFER, F.R. Die Bimssteinkörner bei Marburg in Hessen und deren Abstammung aus Vulkanen der Eifel. Diss. Marburg 1951

34. SCHEFFER, F.
FÖLSTER, H.
MEYER, B. Zur Diagnostik und Systematik von Dreischicht-Tonmineralen in Böden und pedogenen Sedimenten.
Chem.d.Erde 21, 2, S.210-238, 1961
35. SPLICHAL, J. Min.Abstracts, 1, S. 288, 1922
36. SPYRIDAKIS, D.E.
CHESTERS, G.
WILDE, S.A. Kaolinization of Biotite as a Result of Coniferous and Deciduous Seedling growth.
Soil Science of Amer.Proc., 31, 2, S. 203-210, 1967
37. STEINBERG, K. Zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte im Untereichsfeld.
Hercynia, 3, 1944
38. STÖHR, W.Th. Der Bims (Trachyttuff), seine Verlagerung, Verlehmung und Bodenbildung (Lockerbraunerden) im südwestlichen Rheinischen Schiefergebirge.
Notizbl.hess.L.-Amt f.Bodenforschung, 91, S. 318-337, Wiesbaden 1963
39. SUDO, T. Clay Mineralogical Aspekt of the Alteration of Volcanic-glass in Japan.
Clay Miner.Bull., Vol.2, No.11,12, No.9, S.96-105, 1953
40. TAMURA, T.
JACKSON, M.L. Structural and Energy Relationship in the Formation of Iron and Aluminium Oxides, Hydroxides and Silicates.
Science, 117, S. 381-383, 1953
41. TRÖGER, W.E. Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. Teil 1 Bestimmungstabellen.
3.Aufl. E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1959
42. VOGEL, I.G.
ZAGWIJN, W.H.
in: HAMMEN, Th.
van der;
MAARLEVELD, G.G.;
VOGEL, I.G. und
ZAGWIJN, W.H. Stratigraphy, Climatic Succession and Radiocarbon Dating of the Last-Glacial in the Netherlands.
Geol.en Mijnbouw, 46, 3, S.79-95, 1967
43. WADA, K.
MATSUBARA, J. Differential Formation of Allophan "Imogolit" and Gibbsite in the Kitakami Pumice Bed.
Transact. 9th Internat.Congr.Soil Science, III, S. 123-131, Adelaide 1968

44. WINCHELL, N.A. Elements of Optical Mineralogy, Part II
WINCHELL, H. Descriptions of Minerals.
4, Chapman a. Hall, London
45. WOLDSTEDT, P. Über die Gliederung des Quartärs und
Pleistozäns,
Eiszeitalter und Gegenwart, XIII,
S. 115-124, 1962

Hase, D., u. Meyer, B.:

**Feuchte - Jahresgang, Wasser - Bewegungen und
- Bilanzen in dicken Würmlöß-Decken und ihren
holozänen Böden (Parabraunerde, Griserde,
Feuchtschwarzerde) bei unterschiedlichem
Grundwasserstand im Raum Niedersachsen**

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 11, 85 - 183
(1969)**

	Seite
1 <u>E I N L E I T U N G</u>	89
2 <u>D I E S T A N D O R T E</u>	93
2.1 <u>A U S W A H L</u>	93
2.2 <u>B E S C H R E I B U N G</u>	95
2.2.1 <u>Übersicht</u>	95
2.2.2 <u>Einzel-Angaben</u>	95
- EINBECK -	95
- NORTHEIM/HOLLENSTÉDT -	100
- GÖTTINGEN/ROSDORF -	101
3 <u>D I E M E T H O D E N</u>	105
3.1 <u>ZEITLICHE VERTEILUNG DER WASSER-GEHALTE UND SAUGSPANNUNGEN</u>	105
3.1.1 <u>Saugspannungs-Charakteristik</u>	106
3.1.2 <u>Wassergehalts-Messung</u>	106
3.2 <u>GRUNDWASSER-STÄNDE</u>	107
3.3 <u>WITTERUNGS-DATEN</u>	107
3.3.1 <u>Niederschläge</u>	107
3.3.2 <u>Temperaturen</u>	108
3.4 <u>TRITIUM-MARKIERUNG</u>	108
3.4.1 <u>Injektion</u>	108
3.4.2 <u>Probenahme</u>	108
3.4.3 <u>Extraktion</u>	109
3.4.4 <u>Messung</u>	110
3.4.5 <u>Bilanz-Berechnungen</u>	110
4 <u>E R G E B N I S S E</u>	111
4.1 <u>ALLGEMEIN-BEFUNDE</u>	111
4.1.1 <u>Vergleich der Sediment-Decken (Volum-Verteilung)</u>	111

	Seite	
4.1.2	<u>Witterungs-Verlauf im Untersuchungszeitraum</u>	114
4.2	<u>WASSER-HAUSHALT DER LÖSS-DECKEN MIT TIEFLIEGENDEM GRUNDWASSER</u>	116
4.2.1	<u>Poren-Verteilung und Homogenität der Löß-Decken</u>	116
4.2.2	<u>Gang der Wasser-Verteilung in den Löß-Decken</u>	120
	<u>Auswertungs-Methode (Ψ-Diagramme)</u>	121
	EINBECK 10,5-12 m Grundwasser-Tiefe	
4.2.2.1	<u>ZONE A:</u> Fragen zur Lage der Entkalkungs-Grenze	123
4.2.2.2	<u>ZONEN C u. E:</u> Luft-Okklusion als hydrologisch bedeutsamer Faktor	125
4.2.2.3	<u>ZONE D:</u>	128
4.2.2.4	<u>Zusammenschau ZONEN A-F:</u> Abfluß-Behinderung durch Luft-Okklusion. -Zur Definition des "Wasserstaus" und des "Staukörpers". - Antwort zur Lage der Entkalkungs-Grenze	128
	NORTHEIM 8-12 u. 6-8 m Grundwasser-Tiefe	131
4.2.2.5	NORTHEIM (II):Luft-Okklusion bei 8-12 m Grundwasser-Tiefe	131
4.2.2.6	NORTHEIM (III):Fehlende Luft-Okklusion bei 5,5-8 m Grundwasser-Tiefe ...	134
4.2.3	<u>Wasserhaushalts-Bilanz EINBECK aufgrund von TOH-Messungen</u>	136
	BILANZ-ZEITRAUM	136
	BILANZ-TIEFE	137
	METHODISCHE ANMERKUNGEN	137
	VERALLGEMEINERUNGEN	142
	MODELL	144
	KALKBILANZ	147

	Seite	
4.3	<u>WASSERHAUSHALT DER LÖSS-DECKEN MIT HOCHLIEGENDEM GRUNDWASSER</u>	147
4.3.1	<u>Tiefen-Abhängigkeit der Poren-Verteilung. - Profil-Aufbau. - Sy-Horizont</u>	148
4.3.2	<u>Luft-Einschluß unterhalb des phreatischen Grundwasser-Spiegels</u>	152
4.3.3	<u>Quellungs- und Verdichtungs-Wirkungen der okkludierten Luft</u>	164
4.3.4	<u>Zur Definition des phreatischen (piezometrischen) Grundwasser-Spiegels</u>	166
4.3.5	<u>Wasserhaushalts-Bilanz ROSDORF (Areale IV u. VIII) aufgrund von TOH-Messungen</u>	169
5	<u>Z U S A M M E N F A S S U N G</u>	175
6	<u>L I T E R A T U R - V E R Z E I C H N I S</u>	181

1 E I N L E I T U N G

Die Arbeit knüpft in zwei Punkten an vorausgegangene Untersuchungen an:

1. In einer Arbeit über die Lösses Südniedersachsens und Nordhessens haben ROHDENBURG u. MEYER (28) über die Stratigraphie und den physikalischen Aufbau mächtiger Löß-Decken berichtet. Ferner haben sie aufgrund der Ausdeutung pedogenetischer Befunde, einiger Gelände-Modell-Experimente und jahreszeitlicher Feuchte-Messungen Hinweise auf das hydrologische Verhalten der Löß-Decken gegeben, die zu den unten ausgesprochenen Vermutungen Anlaß geben und einer Überprüfung bedürfen.
2. Bei Untersuchungen über den Vegetations-Einfluß auf den Wasserhaushalt von Parabraunerden aus Löß fanden PAPP (26) und MEYER, daß es recht große Unsicherheiten in sich birgt, wenn man den Wasserhaushalt eines begrenzten Solums (z.B. 2 oder 3 m Tiefe) erfassen will, ohne dabei den stratigraphischen Aufbau und die Hydrodynamik der gesamten Sediment-Decke bis hin zum Grundwasser-Spiegel zu berücksichtigen. Bei Lössen kann das bedeuten, daß man Profil-Tiefen bis zu 10 m und mehr berücksichtigen muß, da der Löß aufgrund seiner kapillaren Eigenschaften selbst bei diesen Tiefen noch Wechselbeziehungen zwischen dem Grundwasser-Spiegel und dem Wasserhaushalt nahe der Boden-Oberfläche erwarten läßt.

Im Einzelnen sind der Arbeit folgende Fragen gestellt:

1. Die holozänen Oberflächen-Böden, die aus mächtigen Löß-Decken hervorgegangen sind, stellen in ihrer typologischen Ausprägung - besonders in der Tiefen-Lage ihrer Entkalkungs-Grenze - einen Spiegel für die im Löß-Untergrund herrschenden hydrologischen Verhältnisse dar. Die Gelände-Erfahrung lehrt: Liegt die Spiegel-Tiefe des kalkhaltigen Grundwassers unterhalb von ca. 5 m, so spielt die Tiefen-Lage kaum noch eine modifizierende

Rolle für die Entkalkungs-Tiefe des Löß-Bodens. Diese ist dann unter normalen Plateau-Bedingungen in den 10.000 Jahren der nacheiszeitlichen Löß-Parabraunerde-Entwicklung in der Regel ungehindert auf 160-180 cm u.O. abgesunken. Anders bei Spiegel-Höhen des hydrogencarbonat-haltigen Grundwassers von weniger als 5 m unter Oberfläche: Die Entkalkung der Löß-Böden ist dann entweder deutlich gehemmt, oder es kann bei sehr hoch liegendem Grundwasser-Spiegel zu einer oberflächennahen oder oberflächlichen Kalk-Anreicherung kommen. Die Bodentypen sind dann Feucht- und Naß-Schwarzerden oder Carbonat-Anmoore. - Die Frage richtet sich auf den Zusammenhang zwischen der Grundwasser-Höhe und der hydrologisch bedingten Absenkung der Kalk-Grenze. Man sollte erwarten, daß mit steigendem Grundwasser-Spiegel im Zustand des kapillaren Aufstiegs- und Sättigungs-Gleichgewichtes der Gesamt-Querschnitt der wasserleitenden kohärenten Menisken-Fäden zwischen Oberfläche und Grundwasser-Spiegel ständig zunimmt. Der zur schnellen Dränung befähigte grobe Poren-Anteil füllt und beteiligt sich an der Entwässerung im steigenden Maße. Die Wasser-Leit-Widerstände sinken, die Perkolations-Fähigkeit und damit die Auswaschungs-Quoten müßten steigen. Dem widerspricht die beobachtete Hemmung der Entkalkung bzw. die oberflächennahe Anreicherung von CaCO_3 . Es hat daher den Anschein, daß ein üppiges Angebot von Wasser im Wurzelraum der Pflanzen-Decke und ein erhöhtes kapillares Nachlieferungs-Vermögen dazu führen, daß die jährlichen Verdunstungs-Beträge steigen. Eine dauerhafte Anhebung des Niveaus ungespannten oder schwach gespannten Wassers in den Löß-Decken muß unter den Klimabedingungen der meisten mitteleuropäischen Löß-Fluren dazu führen, daß die aufwärts gerichtete Wasser-Bewegung verstärkt wird. Der Bilanz-Anteil "Verdunstung" wächst und kompensiert in zunehmendem Maße den Bilanz-Anteil "Versickerung". Im Gegensatz zu unseren offenen Gewässern wäre u.U. bei Böden mit einem sehr hochliegenden Grundwasser-Spiegel sogar mit einer Überkompensation zu

rechnen, berücksichtigt man die "Docht-Wirkung" der Vegetation.

Es soll versucht werden, durch Wasser-Bilanz-Untersuchungen an Löß-Böden mit abgestufter Grundwasser-Spiegeltiefe Licht in diese Vermutungen zu bringen.

2. Über die landschafts-hydrologische Bedeutung, besonders die wasserwirtschaftlich wichtige Frage der Grundwasser-Spende stärkerer Löß-Decken ist wenig bekannt. In Anbetracht der ausgedehnten Löß-Verbreitung in Mitteleuropa ist das als eine beträchtliche Lücke zu bewerten. Nach den unter 1. angestellten Erwägungen muß die Grundwasser-spende der Löß-Decken u.a. auch von der Tiefenlage des Grundwasser-Spiegels mitbestimmt werden. Die Bewegung des Niederschlags-Wassers zum Grundwasser erfolgt nach den bei MOSCHREFI u. MEYER (21) zusammenfassend dargelegten Modell-Vorstellungen auf dem Wege über die abwärts gerichtete Verdrängungs-Bewegung (downward displacement). Hierbei bewegt sich das Wasser - ohne daß sich das Löß-Material dabei voll mit Wasser aufzusättigen braucht (daher: "unsaturated flow") bzw. überhaupt seinen Wasser-Gehalt wesentlich zu ändern braucht - in denjenigen "Kapillaren" (besser: Kornberührungs-Meniskenwasser-Strängen) abwärts, die aufgrund ihres Durchmessers (besser: ihrer Tension) bei der gegebenen Grundwasser-Tiefe durch Kapillar-Aufstieg mit Wasser gefüllt sind und als durchgehende beständige Leitbahnen von der Oberfläche bis zum Grundwasser fungieren. Beim Löß mit seiner spezifischen Körnungs-Art und seiner davon abhängigen Porungs-Art kann man nach den in (17), (21) und (28) gemachten Angaben damit rechnen, daß eine ins Gewicht fallende derartige Kapillar-Dränage noch bei Grundwasser-Ständen von 10 Metern gegeben sein kann, d.h. daß die Summe der mit Saugspannungen von $p^F \geq 3$ ausgestatteten durchgehenden kapillaren Wasser-Stränge eine bedeutende kapillare Leitfähigkeit (ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit, UHL) besitzt.

Eine solche durch "downward displacement" zustande kommen-

de Grundwasser-Spende ist entweder in Unterdruck-Lysimetern meßbar (die sich noch im Stadium der Erprobung befinden) oder nur mit Hilfe der Tritium-Markierung (4) zu kontrollieren. Es soll dies die zweite Aufgabe der vorliegenden Arbeit sein.

3. Die Kalkulation der Wasser-Bewegung und der kapillaren Grundwasser-Spende in den Löß-Decken setzt die Kenntnis der UHL der einzelnen Profil-Straten und der im Jahres-Ablauf auftretenden hydraulischen Gesamt-Potential-Gradienten voraus. Umgekehrt lassen sich aus den mit Hilfe der Tritium-Markierung gemessenen Raten der Abwärts-Verdrängung bei Kenntnis der Potential-Differenzen die natürlichen Wasserleit-Widerstände der einzelnen Löß- und Lößboden-Horizonte abschätzen und Aussagen über eventuell vorhandene Stau-Schichten machen. Dritte Aufgabe dieser Arbeit soll daher die Aufnahme von Saugspannungs-Chronoisoplethen-Diagrammen mächtiger Löß-Decken sein.
4. Über die Bedingungen und Ursachen für das Zustandekommen der kapillaren Wasserbewegung im ungesättigten Feuchte-Zustand im allgemeinen und bei Lössen im besonderen ist noch wenig bekannt. Die Poren-Luft spielt dabei eine bedeutsame Rolle. MOSCHREFI u. MEYER (21) haben auf die saugspannungsmäßige Abgrenzung desjenigen Poren-Bereiches hingewiesen, in dem eine unbehinderte kapillare Wasser-Leitung (capillary displacement) stattfinden kann. Auf der einen Seite, im Bereich hoher Wasserspannung (etwa zwischen pF 2,6 und 3,2) endet sie dort, wo "kapillarer Abriß", d.h. Lösung des direkten Meniskus - Meniskus-Kontaktes, stattfindet - auf der anderen Seite bei niedrigen Saugspannungen (pF 2,0-2,4) dort, wo die Einschließung von Luft die kontinuierliche Auffüllung der größeren Poren verhindert, ein Luft-Wasser-Transport beginnt und eingeschlossene Luft-Blasen als Ventile zu wirken beginnen. Luft-Okklusion kann eine der wesentlichen Ursachen für "ungesättigte Wasser-Bewegung" sein, eine erhebliche Verminderung der hydraulischen Leitfähig-

keit verursachen und damit zum Wasser-Stau beitragen.

Diese Effekte der Luft- und Wasser-Bewegung und der Luft-Okklusion sind bislang nur in Modell-Versuchen studiert worden, wobei MOSCHREFI u. MEYER bereits die Abhängigkeit von der Tiefen-Lage des Grundwasser-Spiegels beleuchtet haben. Die 4. Aufgabe dieser Arbeit soll daher sein, das Verhältnis von Poren-Luft und Poren-Wasser und besonders die Rolle der Luft-Okklusion für die Wasser-Bewegung, den Wasser-Haushalt und die Anwendbarkeit hydrologischer Meß-Methoden am natürlichen Objekt - den mächtigen Löß-Decken - näher zu untersuchen.

2 D I E S T A N D O R T E

2.1 AUSWAHL

Folgende Forderungen wurden an die auszuwählenden Vergleichs-Standorte gestellt:

1. GRUNDWASSER-SPIEGELTIEFE GS: Durch gezielte Bohr-Kartierungen waren Lößdecken-Areale auszuscheiden, in denen die GS unterschiedlich war und abgestuft zwischen wenigen dm und ca. 10 m unter der Oberfläche (u.O.) lag. Jahreszeitliche Oszillationen der GS sollten dabei, wenn sie ein gewisses Maß nicht überstiegen, in Kauf genommen werden.
2. LÖSS-BESCHAFFENHEIT: Der Löß oberhalb der GS sollte sowohl innerhalb des einzelnen Profiles als auch an allen Vergleichs-Standorten möglichst dieselbe Porengrößen-Verteilung besitzen. Diese Forderung war aus folgenden Gründen schwer zu erfüllen:
 - a) Die mächtigen Lößdecken sind durch fossile, meist tonangereicherte Löß-Bodenhorizonte untergliedert, die in ihrem Gefüge z.T. erheblich von dem nicht umgewandelten - im folgenden als "paraprimär" bezeichneten - Löß abweichen (vgl. hierzu ROHDENBURG u. MEYER 1968 (28)).

- b) Einigermaßen gefüge-homogene Lößpakete sind dort zu erwarten, wo die Lößdecken von dem Löß des Jungwürms (Nach-Paudorf-Zeit) gebildet werden. Im Vergleich zu anderen mitteleuropäischen Lößlandschaften erreichen die Jungwürm-Lösse in Süd-Niedersachsen und Nordhessen maximale Mächtigkeiten, doch überschreitet auch hier ihre Dicke selten 5 m (maximal 7 m). Bei über 5 m GS werden also die über dem Grundwasser liegenden basalen Abschnitte der Lößdecke stets von älteren, in ihrer Porungsart stark vom Jungwürm-Löß abweichenden Löß- und Lößboden-Paketen gebildet (Mittel- und Altwürm, Rißlöß mit Eem-Boden).
- c) Auch die Jungwürm-Lösse werden durch geringmächtige fossile Bodenhorizonte untergliedert. Deren gefügemäßige Abweichung vom paraprämaränen Löß ist zwar in der Regel nicht besonders groß, jedoch von Ort zu Ort verschieden.
- d) Selbst gleichaltriger und körnungs-gleicher Jungwürm-Löß hat je nach Lage der holozänen GS eine unterschiedliche Porengrößen-Verteilung angenommen. Diese scheint durch den Grad und die Dauer der Wasser-Sättigung und die davon abhängige Sackungs-Tendenz des Lößmaterials bedingt zu sein.
- e) Je nach Lage der GS haben sich während des Holozäns aus den Jungwürm-Lössen verschiedene Bodentypen entwickelt. Diese modifizieren die aktuelle Wasserführung im Oberteil der Lößdecken erheblich. Der Grad der Bodenentwicklung hängt von der Geschwindigkeit der Entkalkungstiefe ab. Beide werden in erster Linie von der GS festgelegt. - Im folgenden werden ausschließlich solche Situationen betrachtet, in denen Grundwasser, reich an Ca-Hydrogencarbonat, in kalkhaltigem Löß ansteht. Für den süd-niedersächsisch-nordhessischen Raum läßt sich dafür etwa folgende Regel aufstellen:
Bei einer GS von > 5 m ist die Entkalkungsgrenze der Jungwürm-Lösse heute meist auf 180 → 200 → 220 cm u.O. (lokal auch tiefer) abgesunken; der Bodentyp ist eine Parabraunerde oder - wenn er in seiner Jugend-Entwicklung das Stadium einer Schwarzerde durchlaufen hat - eine Griserde.
Bei einer höher liegenden GS ist die Entkalkung gehemmt. Die heutige Entkalkungsgrenze hebt sich sprunghaft auf 120 → 80 → 60 cm u.O.
Bei ca. 60-100 cm GS ist der Löß noch heute bis zu seiner Oberfläche kalkhaltig.
Bei noch geringerer GS kann es schließlich zur Kalk-sinter-(Dauch-)Abscheidung innerhalb des A-Horizontes und auf der Oberfläche kommen (vgl. GEBHARDT 1964, S. 15 ff.) (8).
Als Bodentypen treten bei Ca-hydrogencarbonat-Grundwasser mit steigender GS auf: "Degradierte" Schwarzerde (mit B-Horizont und brauner und schwarzer Ton-Durchschlammung); Feucht-Schwarzerden (Pseudogley-

Schwarzerden) mit entkalkten oder nicht entkalkten A-Horizonten; kalkhaltige Naß- und Dauch-Schwarzerde (Pseudogley- und Gley-Schwarzerde) und schließlich Carbonat-Anmoor.

2.2 BESCHREIBUNG

2.2.1 Übersicht

An drei Orten - Einbeck, Northeim/Hollenstedt, Göttingen/Rosdorf - wurden insgesamt 9 Areale unter Acker ausgewählt (I - IX). Jedes dieser Areale war ca. 2 - 3000 m² groß und innerhalb dieser Fläche hydrologisch und pedologisch einheitlich beschaffen. Drei der Areale (I, IV, VIII) wurden für die Tritium-Versuche teilweise in Wild-Wiese umgewandelt. Die Daten der ausgewählten Areale sind in Tab. 1 zusammengestellt. Leider ließen sich innerhalb der weiteren Umgebung Göttingens keine hinreichend großen Areale mit ca. 4 bis 6 m GS und 80 - 180 cm Entkalkungstiefe finden. Somit zeigt die als kontinuierliche Folge geplante Bodentypen - Grundwasserspiegel - Entkalkungstiefen-Reihe (I → VIII) einen gewissen Sprung zwischen den Gliedern III und IV.

2.2.2 Einzel-Angaben

[Vergleiche hierzu die Kartenausschnitte in Abb. 1 (a,b,c) und die Zonierungs-Angaben (Groß-Buchstaben A bis D) in den Chrono-Isoplethen-Diagrammen, Abb. 3 bis 7.]

Einbeck

Abb. 1a

Areal-Lage: Westlich der Ziegeleigrube Suthoff (ehem. Lentze), an der Bundesstraße 3, W-Ausgang Einbeck.
Landschafts-Aufbau: Über grauen Lias-Schiefer-tonen und lokalen Rinnen und Linsen solifluidal umgelagerter Flußschotter lagert eine 5 bis 15 m mächtige Lößdecke. Sie bildet ein Plateau von ca. 4 km² Größe, das mit ca. 1° Gefälle von einer

Tab.: 1 Übersicht über die Vergleichsstandorte

1. Areal - Nummer	Profil-Nummern geordnet nach zunehmender relativer Grundwasser-Spiegelhöhe									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
2. Untersuchungsort	Einbeck	Northeim/ Hollenstedt		Göttingen / Rosdorf			Beeke	Bahndamm	siehe II/III	
3. Lage, Grundkarte 1:5000	Rechts ³⁵ Hoch ⁵⁷	58,35	64,95	63,20			61,80	63,20	64,95	
4.		43,35	33,20	08,20			08,50	08,20	33,20	
5. Oberfläche, Höhe NN		128,8	120,0	113,8	160,0	157,0	155,0	165,2	155,0	112,0
6. " , Neigung(°)		0,8	2,6	2,6	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0
7. Grundwasserspiegel (m) u.O. während der Untersuchungsdauer	~12	8 → 12 *)	6 → 8 *)	1,5-4,5	1,2-2,5	0,8-2,8	0,3-1,8	0,3-1,3	1,5	
8. kürzeste Entfernung zum nächsten offenen Gewässer (m)	500	60	60	150	100	30	80	10	5	
9. Name	Krummes Wasser	Leine		Rase	Graben	Rase	Beeke	Graben	Leine	
10. Spiegel des offenen Gewässers (Höhe NN)	114	111		156	154,5	152,5	164	154	111	
11. Differenz Spalte 5-10	15	9	3	4	2,5	2,5	1,2	1,0	1,0	
12. Mächtigkeit der gesamten Lößdecke (m)	>12	>10	>8	7	6,4	4	3	4	2,4**)	
13. Unterlage	LIAS - KEUPERTON FLIESSERDE			FLUSS - SCHOTTER						
14. Mächtigkeit des Jungwürm-Lösses (m)	7	5,5	5,5	7	6,4	4	3	4	-	
15. Bodentyp	PARABRAUNERDE (GRISERDE)			FEUCHT - SCHWARZERDE PSEUDOGLEY -, GLEY - SCHWARZERDE						
16. Entkalkungstiefe (m)	1,9-2,2	1,8-2,0	1,8-2,2	0,6-0,8	0	0	0	0	0	

*) zeitweise ohne Grundwasser

**) Schwemmlöß, darunter 0,6 m Auenlehm, darunter anstehender Löß (fossiler Boden), bei 4 m Schotter

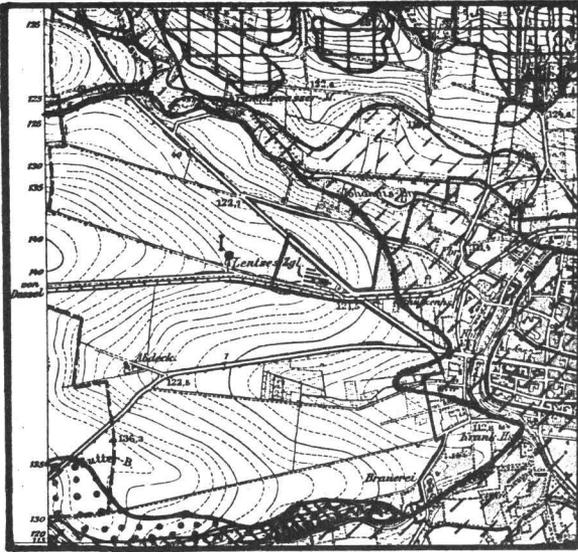
ober- sowie unterirdischen Wasserscheide (Lias-Schwelle) nach Osten abfällt. An seinen Rändern taucht das Lößpaket unter die holozänen Lehmdecken der im Norden, Osten und Westen angrenzenden Bachfluren. - Die Oberflächen-Gliederung des Plateaus lehnt sich mit WE streichenden Flachriedeln und Muldentälchen grob an das Relief der Lias-Unterlage an und dürfte überwiegend äolisch geprägt sein.

Landschafts-Hydrologie: Eine Oberflächen-Formung durch ablaufendes Niederschlags-Wasser ist für Vergangenheit und Gegenwart so gut wie auszuschließen. Das Niederschlagswasser durchdringt den Löß und fließt auf der vom Lias gebildeten Stausohle und meist innerhalb der basalen Löß-Schichten zu den Seiten hin ab. Schmale Kiesrinnen in der reicher gegliederten Oberfläche der Lias-Unterlage sammeln zum Teil das ablaufende Grundwasser und verursachen damit räumlich wechselnde und zeitlich unterschiedlich stark schwankende Grundwasser-Spiegeltiefen sowie verschiedene Abzug-Geschwindigkeiten. - In der Linie vom südlich angrenzenden Mühlenbachtal über die Quellmulde östlich der ehemaligen Abdeckerei bis zum Versuchs-Areal I liegen die mittleren Grundwasser-Spiegeltiefen etwa auf gleicher Höhe von 117 m NN. Sie sinken zum nördlich angrenzenden Krummwasser-Tal auf 114 m NN ab. Demnach muß angenommen werden, daß die Bewegungs-Richtung des Grundwassers im Bereich der Versuchsfläche I wie im ganzen nördlichen Teil des Plateaus NE ist.

Löß- und Bodenprofil (Abb. 3): Die oberen 6 - 7 m in der insgesamt 12 - 14 m mächtigen Lößdecke werden vom Löß des Jungwürms eingenommen. Er wird untergliedert durch schwach verfestigte bis zu 30 cm starke, farblich nur undeutlich hervortretende fossile Bodenhorizonte, durch Schwemm-Lagen von wenigen cm Stärke aus Löß, Sand und Feingeröll und durch schwach verdichtete Lößlagen - alle von unbekannter Altersstellung. - Die durch solche sedimentären Unregelmäßigkeiten hervorgerufenen strukturellen Differenzierungen des Profils sind jedoch nicht sehr ausgeprägt, wie das Porengrößen-Verteilungsdiagramm (Abb. 3, links) erkennen läßt. Sie können im Hinblick auf die in dieser Arbeit gestellten Fragen vernachlässigt werden. Lediglich die fossile bodenbürtige Verdichtungszone D innerhalb des an sich recht homogenen Jungwürm-Lösses C und E verdienen im Diagramm ausgeschrieben zu werden.

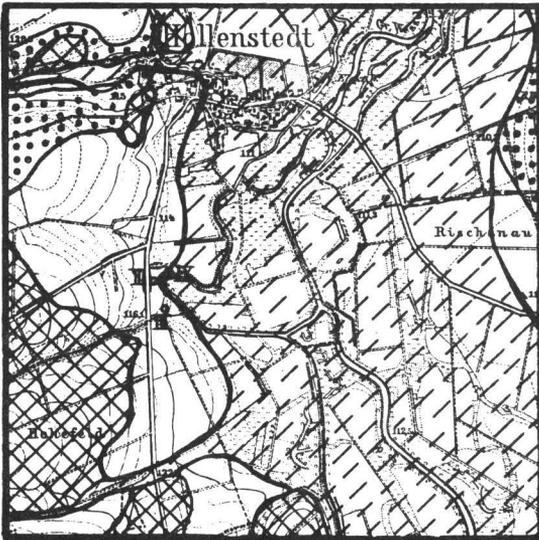
Unter der lockeren Jungwürm-Lößdecke folgen ab 6,30 m, Zone F und ab 7,00 m Tiefe, Zone G, kompaktere Pakete von kalkhaltigem Lößmaterial, das ab 6,30 m schwach rostfleckig marmoriert, ab 8,30 m von starken Goethit-Wurzelröhren-Konkretionen und grauen Reduktions-Flecken durchsetzt und ab ca. 9,50 m (2,5 m über GS) völlig grau reduziert, mit nässeliebenden fossilen Schnecken angereichert und lokal torfführend ist. Die Altersstellung dieser Pakete ist unklar. Es könnte sich um Naß-Fazien des Altwürms oder des Paudorfer Interstadials handeln. C¹⁴-Analysen stehen zur Zeit noch aus.

Der obere Abschnitt der Jungwürm-Lößdecke ist entkalkt und zu einem Griserde A_c-, B_t- und B_v-Horizont umgewandelt



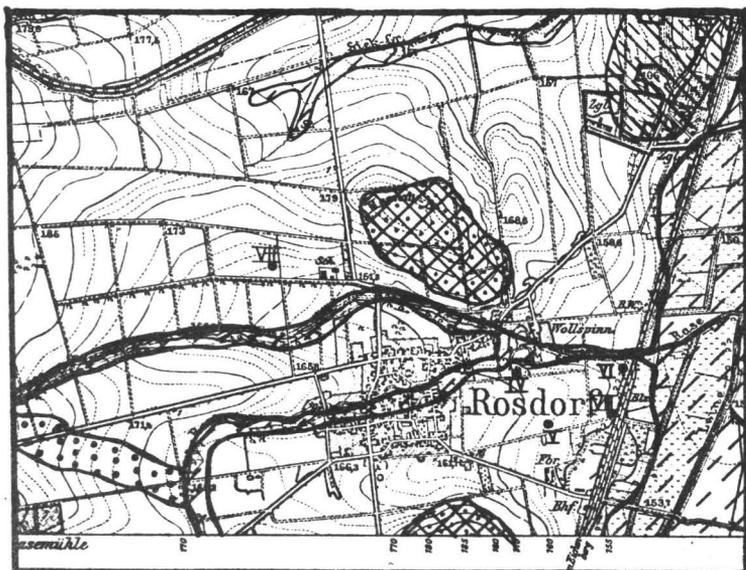
Einbeck

a)



b)

Northeim



Göttingen

Rosdorf

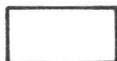
c)

1km

Abb. 1: Lageplan der Standorte

Nach den Meßtischblättern und den geologischen Karten
im Maßstab 1:25000 von Einbeck, Northeim und Göttingen

Geologische Gliederung



Würmlöß-
Decken, >2m



Lias (Tone)

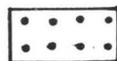


holozäner
Talboden



Keuper

mittl. oberer
Tone | Sandstein



pleistozäne
Schotter



Muschelkalk

(Zone A). Die Entkalkungs-Grenze unduliert zwischen 195 und 235 cm. Diese Zone wurde als B ausgesondert.

Northeim/Hollenstedt

Abb. 1b

Areal-Lage: 900 m südlich des Ortes Hollenstedt zwischen der Straße Hollenstedt-Höckelheim und dem Steilufer der Leine-schlinge.

Landschafts-Aufbau: Die rotbraunen Schiefertone des mittleren Keupers, die überwiegend den Talboden des Leinetal-Grabens bilden, formen hier einen Hang, der in flache Riedel und Mulden-Tälchen gegliedert ist. Die km-Oberfläche fällt mit ca. 4° nach E unter die Leine-Aue. Am Unterhang mildert eine von 0 auf über 10 m Mächtigkeit anwachsende Löß-Schürze den Gefällswinkel auf ca. 2,6°. Der Löß und sogar noch sein oberer jungwürmzeitlicher Abschnitt reichen unter den Spiegel der heutigen Leine, was u.U. mit den in diesem Teil des Leinegrabens beobachteten jungquartären Senkungen zusammenhängen könnte. Die mäandrierende Leine hat mit einer in den Löß transgredierenden Fluß-Schlinge in Nähe der Meßstellen eine Löß-Prallhang-Abbruchkante angelegt und ihre holozänen Schotter auf der Würmlöß-Abrasions-Platte abgesetzt.

Landschafts-Hydrologie: Vom Keuper-Oberhang her dringt kein Oberflächen-Wasser und unterirdisch kein Quell-Wasser in die Lößdecke ein. Das Oberflächen-Wasser aus der Keuper-Region wird in Gräben und einem Bachlauf direkt zur Leine abgeführt.

Überschüssiges Niederschlags-Wasser, das auf den lößbedeckten Unterhang fällt, durchdringt den Löß und fließt in den basalen Partien des Lösses auf der vom Keuper gebildeten Stau-schle zur Leine hin ab. Grundwasser-Abfluß-Basis ist jedoch nicht der Leinespiegel, sondern ein tiefer im Löß unter dem Bett der Leine liegendes Grundwasser-Niveau. Vom Wasserspiegel der Leine ausgehend sinkt der Grundwasserspiegel nach Westen in den Löß hineingehend um mehrere Meter ab (Areal II 0 bis > 3 m, Areal III 3 bis > 5 m unter Leinespiegel) bei verhältnismäßig starken Schwankungen der GS.

Löß- und Bodenprofil von Areal II (Abb. 5a): Bodentyp und stratigraphischer Aufbau der Lößdecke ähneln denen des Profils Einbeck. Abweichungen bestehen in der Tiefenlage B der Entkalkungs-Grenze (180-200 cm statt 195-235 cm) und der Lage der Verdichtungs-Zone D. Bei etwa gleicher Gesamt-Mächtigkeit von C + D + E liegt D hier wesentlich höher als in Einbeck (290-320 cm statt 480-510 cm). Die unter der lockeren Jungwürm-Lößdecke folgenden Lagen dichteren Lößmaterials sind - wie frühere Aufgrabungen von ROHDENBURG (mdl.Mitt.) ergaben - ähnlich beschaffen wie in Einbeck. Marmorierung des Materials beginnt in 7,50 m Tiefe, homogene graublau Fe-Reduktions-Färbung in 9,00 m Tiefe (Einbeck 6,30 und 9,50 m). Die GS schwankt zwischen 8 und 12 m.

Löß- und Bodenprofil von Areal III (Abb. 5b): Das Areal III ist für Vergleiche mit den folgenden Arealen IV bis VIII in-

sofern gut geeignet, als der Jungwürm-Löß bis herunter zum Grundwasser keine markanten Verdichtungs-Zonen aufweist und lediglich in 420 bis 550 cm Tiefe durch etwas gröberporige feinsandige äolische Feinsand-Schluff-Wechsellagen gestört wird. Abweichend von Areal II lag hier die GS, wenn Grundwasser vorhanden war, bei 6-8 m, die Obergrenze der Marmorierung bei 3,6 m, die der homogenen Graublau-Färbung bei 6,6 m.

Profil und hydrologische Situation von Areal IX (Abb. 1b): Dieses Areal nimmt eine Sonderstellung ein. Es liegt im hydrologischen Saum-Bereich der Leine und weist dementsprechend einen konstanten Grundwasser-Spiegel von ca. 1,5 m auf, der trotz des kurzen Abstandes von 5 bis 10 m vom Leine-Ufer bereits 0,5 m unter dem Leine-Spiegel liegt. Das Profil liegt auf einer mit einer dünnen Schwemmlöß-Decke überzogenen Abrasions-Platte, die aus dem anstehenden Löß herausgearbeitet ist und sich vor der Löß-Abbruch-Kante befindet. Das Areal wurde als Endglied mit dem höchsten Grundwasser-Stand in die Untersuchungs-Reihe einbezogen. Es schien für Vergleichszwecke insofern gut geeignet, als der Grundwasser-Spiegel im Gegensatz zu den anderen Profilen mit hohem Grundwasser-Stand konstant war. Bodentypologisch handelt es sich um einen Carbonat-Gley mit schwach entwickeltem Mull-A-Horizont.

Göttingen/Rosdorf

Abb. 1c u. 2

Areal-Lage: Die Areale IV, V, VI und VII liegen auf dem jetzt bebauten Ortsflächenteil "Mühlengrund" des Dorfes Rosdorf bei Göttingen, der sich zwischen Mittelpunkts-Schule, Rasebach, Bahndamm und "Steinflur" (Bahnhofsstraße) erstreckt.

Landschafts-Aufbau (Abb. 2): Lage, Landschafts-Aufbau und Landschafts-Hydrologie sind bereits mehrfach in bodenkundlichen Publikationen behandelt worden, die sich mit der Auswertung der umfangreichen Ausgrabungen (1964 - 67) vorgeschichtlicher Siedlungs-Reste in diesem Gelände befaßt haben (MEYER, RADDATZ u. ROHDENBURG 1963 (20), SCHEFFER u. MEYER 1965 (31) u. MEYER 1966 (19)).

Es handelt sich um einen ca. 350 m breiten und 800 m langen sehr flachen Löß-Rücken, der mit seiner WE gerichteten Längs-Achse quer zur Fließrichtung der Leine in die Leine-Aue hineinragt und dort unter die holozänen Auenlehm-Decken taucht. Er hebt sich im W (siehe Karten-Ausschnitt Abb. 2a) mit nur ca. 1 bis 2 m Höhen-Unterschied ein wenig aus der mit holozänem Dauch (Sinterkalk) gefüllten Rase-Lohbach (Beeke) - Steinflur-Senke heraus, in welcher der Ort Rosdorf liegt. Der Löß, der auch die präholozäne Unterlage des Dauch-Komplexes bildet, liegt als eine Decke von 7 m (W) bis 4 m (E) Dicke über wärmekaltzeitlichen und älteren fluvialen Kalk-Schottern, welche die gesamte Rosdorfer Senke an der Basis auskleiden. Die Oberfläche der Löß-Decke ist, wie in früheren Untersuchungen (MEYER, 1966) (19) dargelegt worden ist, überwiegend durch die äolische Ablagerung des Lösses geformt und nicht sehr stark

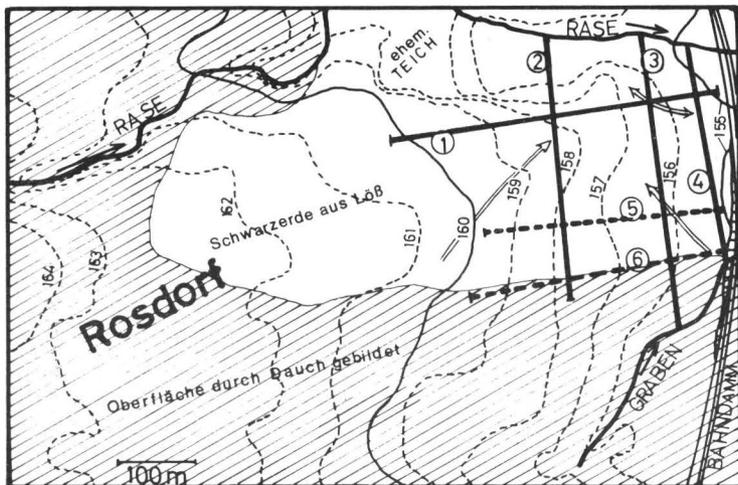


Abb. 2 a Grundwasserrichtung
 Profile

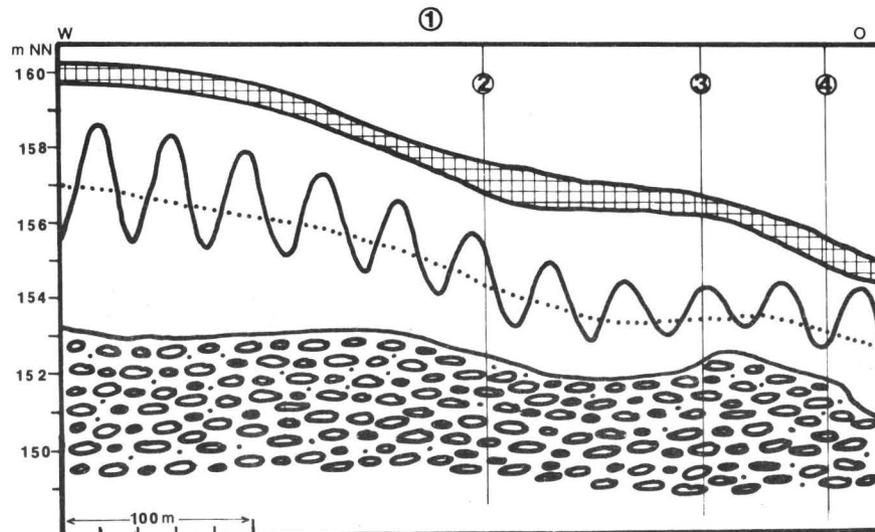


Abb. 2 b

Abb. 2:

2a Lageskizze Rosdorf: Bbauungs-Signatur aus der linken Bildhälfte fortgelassen, um die hydro-topographische Situation zu verdeutlichen.

2b Längsschnitt ① des Lößrückens (aus Abb. 2a)

2c Querschnitte ②-④ des Lößrückens (aus Abb. 2a) übereinandergelegt.

- ② dicke Linien - dem von W blickenden Betrachter zugewandt.
- ③ mittelstarke Linien - dem von W blickenden Betrachter zugewandt.
- ④ dünne Linien - dem von W blickenden Betrachter abgewandt.

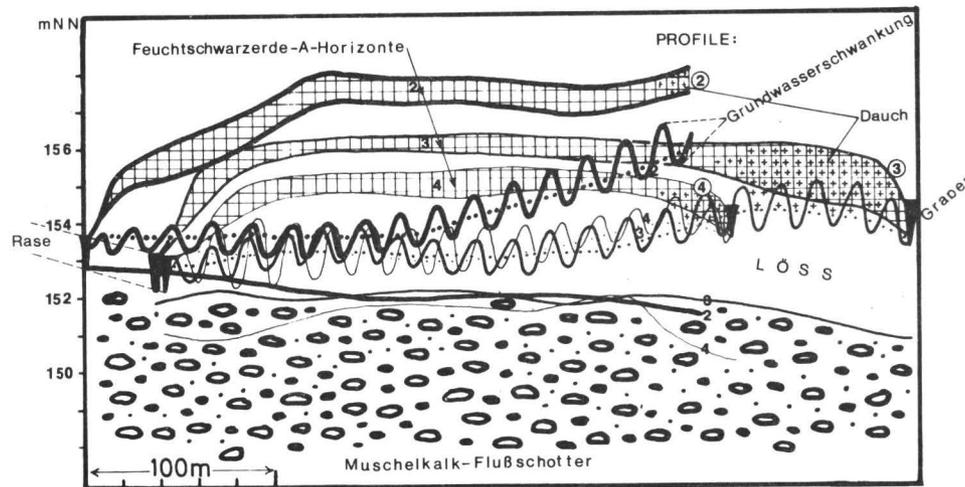


Abb. 2 c

obere Grenze d. vollständigen reduktiven Graufärbung

durch die Besiedlung verändert worden, die hier in topographisch günstiger Position durchgehend von der Linienbandkeramik bis zur Gegenwart nachzuweisen ist.

Landschafts-Hydrologie (Abb. 2b u.c): Die unter dem Löß liegenden Schotter und der untere Teil der Löß-Decke sind im Bereich des Löß-Rückens vom Grundwasser erfüllt. Dessen Spiegel-Höhenlinien und Gefälls-Linien werden bestimmt von den Grundwasser-Ständen in den umgebenden Dauch-Flächen, und diese wiederum beziehen sich auf die unterschiedlichen Spiegel-Niveaus des im N angrenzenden Rase-Baches gegenüber dem im S im Bereich der "Steinflur" vorhandenen Graben. Die Bachbett-Querschnitte dieser offenen Gewässer sind in Abb. 2c als schwarze Keile eingezeichnet. In den den Löß-Rücken umgebenden Bach-Fluren hat sich das Grund- und Oberflächen-Wasser-Niveau während des Holozäns ständig, aber örtlich ungleichmäßig erhöht. Ursache dafür ist der mehrere Meter betragende Aufwuchs von Dauch (Kalksinter), dessen maximale Höhe und seitliche Ausbreitung erst nach Chr.Geb. erreicht worden sind (siehe schraffierte Fläche in Abb. 2a). Dauch braucht nicht durchweg subaquatisch oder in Höhe des offenen Wasserspiegels gebildet zu werden, sondern kann auch als Durchwuchs-Dauch in feuchten Schwarzerde-A-Horizonten bei ca. 50 cm Grundwasser-Stand entstehen. Somit gibt die Verbreitungsgrenze des Dauches nicht den maximalen Ausdehnungsbereich ehemaliger Oberflächen-Wasserläufe an. Infolge der hydrologischen Verschiebungen in den Bach-Senken haben sich die Grundwasser-Isopyhnen und damit dessen Gefälls-Richtungen innerhalb des Löß-Rückens in vorgeschichtlicher Zeit erheblich verändert, wie MEYER 1966 (19) in einzelnen Gelände-Abschnitten aufgrund boden-morphologischer Befunde nachweisen und chronologisch einzuordnen vermochte - obwohl es in den zentralen Teilen größere Areale gibt, in denen die Grundwasser-Spiegelhöhen seit ca. 6000 Jahren konstant geblieben sind (19).

Die Form des heutigen Grundwasser-Körpers ist aus den Profilen der Abb. 2b u. c zu entnehmen, die den in Abb. 2a eingetragenen Profil-Linien 1 bis 4 entsprechen. Abb. 2 bringt einen Längsschnitt, 2c zeigt drei Querschnitte, von W her betrachtet. Die mittleren Grundwasser-Spiegelhöhen sind durch punktierte Linien angedeutet, die jahreszeitliche Amplitude durch Wellen-Linien. In Abb. 2a sind aufgrund der Gefällslinien des Grundwasser-Spiegels hypothetische Strömungs-Richtungen eingetragen. Doch erscheint es als sehr zweifelhaft, daß es innerhalb der Lößdecke bei einem Maximal-Gefälle von weniger als 1 ‰ zu einer horizontalen Fließ-Bewegung des Wassers kommt. Wahrscheinlicher ist - wie von vergleichbaren Situationen her bereits bekannt ist - daß sich der regionale Ausgleich des horizontalen Druck-Gefälles vertikal hydrostatisch über das leichter bewegliche Grundwasser im Schotterkörper als Vermittler vollzieht. Dafür spricht u.a. die rasche, an allen Stellen gleichzeitige und gleichsinnige Bewegung des Grundwasser-Spiegels zu den verschiedenen Jahreszeiten und Witterungs-Perioden sowie die hydrologische Schwellen-Bildung und jahreszeitliche Gefälls-Umkehr im Schnittpunkt -Bereich der Profile 2 u. 3.

Löß- und Boden-Profile der Areale IV, V, VI u. VIII (vgl. Abb. 7a, b, c, e): Eine sediment- und pedostratigraphische Untergliederung der 4 bis 7 m mächtigen Löß-Decke des Rückens ist nach den Beobachtungen an insgesamt 31 Tiefbohrungen und an einem bis zu 4 m tiefen Graben zwischen den Querschnitts-Profilen 2 und 3 (vgl. Abb. 2a) nicht möglich. Zwar zeichnen sich bei Korngrößen-Analysen von Vertikal-Schnitten (5-7 Probe-Entnahmen pro m) insgesamt 3 bis 4 Zonen mit etwas höheren Ton-Gehalten, als dem Ausgangs-Löß zukommt, ab (13 → 19 % Ton < 2 μ), doch ist es nicht möglich, die stratigraphische Anordnung dieser Zonen im Gelände visuell aufgrund der Farbe, Struktur oder der Textur (Fingerprobe) zu verfolgen. Ursache für dieses Unvermögen ist das hohe Anstehen des Grundwassers in der Lößdecke. Dadurch ist

- a) der Löß insgesamt stärker gesackt und gleichmäßiger verdichtet als in den trockenen Würm-Lößprofilen der Nachbarschaft,
- b) der Löß unterhalb der GS gleichmäßig graublau-farbig (Reduktions-Zone) und oberhalb der GS bis zum A-Horizont gleichmäßig marmoriert (Oxydationszone),
- c) die Carbonat-Verteilung sekundär sehr homogen (Umfällung im ständig feuchten Milieu zu Grob-Carbonat).

Mehrere dünne Feinsand-Bänder und dickere Löß-Lagen mit stärkerer äolischer Feinsand-Beimengung (Rotsand) lassen sich in die trockeneren Löß-Decken der Umrandung der Rosdorfer Senke hinein verfolgen, wo sie sich als zum Jungwürm-Komplex gehörig erweisen. Diese Tatsache sowie der Befund, daß sich selbst an der Basis dieser Löß-Decke keine Horizonte mit einer stärkeren pedogenen Löß-Verwitterung finden, stützen die Annahme, daß der Löß-Rücken in der Rosdorfer Senke ausschließlich vom Löß des Jungwürms gebildet wird. Dieser Löß wurde auf Kalk-Schottern abgesetzt, die einer im Paudorfer Interstadial wahrscheinlich offenliegenden Bach-Schwemmflur angehörten.

Die Bodendecke des Löß-Rückens besteht aus Feucht-Schwarzerden unterschiedlichen Nässe-Grades, die schon um 4500 v.Chr. annähernd ihre heutige Ausprägung erreicht hatten. Der hochliegende Grundwasser-Spiegel hat die Kalk-Abfuhr gehemmt und die Lage der Entkalkungs-Grenze modifiziert. Infolge der aufgezeigten Verschiebungen des Grundwasser-Spiegels und seiner Niveau-Linien divergieren in den einzelnen Arealen des Löß-Rückens die primäre Entkalkungs-Grenze und die durch Anhebung des Grundwassers hervorgerufene sekundäre Aufkalkungs-Grenze erheblich. So kann die Carbonat-Grenze an der Oberfläche innerhalb des bis zu 60 cm starken Schwarzerde-A-Horizontes oder maximal 50 cm unterhalb des A-Horizontes liegen und sich im Laufe des Holozäns zwischen diesen Grenzen ab und auf bewegt haben. Bei heutiger oder früherer Absenkung unter den A-Horizont hat sich unter dem Mull-A in der Regel ein brauner tonreicherer B-Horizont mit extremer Einwaschung von schwarzem, humat-umhülltem Ton aus dem A-Horizont gebildet. - In den Randbereichen zum Dauch gehen die Schwarzerden in anmoorige (oder heute nach Austrocknung meist rendsina-artige) Dauch-Borowinen über.

Profil und hydrologische Situation von Areal VII (Abb. 7d):
Um ein weiteres Glied in der Vergleichs-Reihe von Böden mit

steigendem Grundwasser-Spiegel zu bekommen, wurde in ähnlicher Situation wie bei Rosdorf IV-VI u. VIII ein weiteres Areal im Talgrund der Beeke (vgl. Abb. 1c) ausgewählt. Der Grundwasser-Spiegel fällt hier von den lößbedeckten Keuperhängen her, von wo z.T. die Wasser-Einspeisung erfolgt, stetig zum Bach hin ab und zeigt ähnlich starke Oszillationen wie in der Rase-Senke. Das Bodenprofil wurde aus Anlaß der Jahrestagung 1955 der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft vorgeführt und ist bei MÜCKENHAUSEN (1962) (22) unter der Profil-Nummer 50 als schwarzerdeähnlicher Auenboden bzw. kalkreiches Anmoor dargestellt (besser: Gley-Schwarzerde).

3 D I E M E T H O D E N

3.1 ZEITLICHE VERTEILUNG DER WASSERGEHALTE UND SAUGSPANNUNGEN

Ziel des ersten methodischen Schrittes war, in den Löß-Decken den zeitlichen Wechsel der Wassergehalts- bzw. Saugspannungs-Verteilung zu erfassen und in Form von Chronisoplethen-Diagrammen darzustellen. Der Wasser-Sättigungs-Grad des Substrates kann in solchen Diagrammen entweder in Form von Wassergehalten (z.B. Vol. % H₂O) oder in Form von Saugspannungen (z.B. pF-Werten) angegeben werden. Hier sollte die Frage nach den Bewegungen des Bodenwassers geklärt werden. Daher empfahl sich für die Darstellung die Angabe von Saugspannungswerten. Die zeit- und tiefenabhängige Saugspannungs-Verteilung kann nämlich einen raschen vergleichenden Überblick über die kapillaren Sättigungs-Gleichgewichts- und Ungleichgewichts-Zustände im Profil bieten und Auskunft über die Richtung von Potentialgradienten und zu erwartende Fließbewegungen des Bodenwassers geben. Sowohl die Wassergehalte als auch die Saugspannungen lassen sich im Gelände einzeln und direkt bestimmen. Bei Messung nur einer der beiden Größen läßt sich die andere als abgeleitete Größe über die pF-Kurve errechnen. Wir bezeichnen in diesem Fall die abgeleitete Größe als Äquivalent-Saugspannung oder Äquivalent-Wassergehalt.

Im vorliegenden Fall waren große Bodentiefen zu untersuchen. Tensiometrische Meßverfahren konnten daher nicht eingesetzt werden. Aus diesem Grund wählten wir die gravimetrische Wassergehalts-Bestimmung als Meßgrundlage. An Stechzylinder-Proben wurden einmalig die Saugspannungs-Wassergehalts-Funktionen der einzelnen Profiltiefen ermittelt. Mit Hilfe dieser wurden diejenigen Äquivalent-Saugspannungen errechnet, die den von Fall zu Fall im Gelände angetroffenen Wassergehalten entsprachen.

3.1.1 Wassergehalts-Messung

Die Wassergehalts-Messung wurde von vornherein mittels Bohrproben-Entnahme und gravimetrischer Feuchte-Bestimmung vorgenommen. Zwar bot sich für die laufende Verfolgung der Wassergehalte in den Profilen die Installation von Neutronen-sonden-Meßrohren an - und diese Möglichkeit wurde auch teilweise genutzt - doch ließ uns die technische und personelle Ausstattung sowie das Problem des Transportes der Meßsonde das Gewicht auf die erstgenannte Methode legen. Zudem ergab sich die Notwendigkeit einer eingehenden langfristigen Eichung der Neutronen-sonde an den hinsichtlich Raumgewichts- und Porungsarten-Verteilung recht unterschiedlichen Stand-orten mit Hilfe der gravimetrischen Standard-Methode. Bei der Steilheit der pF-Kurven des Lösses im pF-Bereich $< 2,2$ (starke Saugspannungen bei sehr geringen Wassergehalts-Änderungen) erwies sich die Neutronen-sonde der Fa. BERTHOLD mit ihrer Meßgenauigkeit von etwa $\pm 1,5$ Vol.-% H_2O als ungeeignet für die laufende Untersuchung der feuchteren Lößprofile.

Bohrproben-Entnahme: Für Bohrtiefen von 2 - 13 m wurde das LINNEMANN-2,5 cm-Bohrgestänge mit Nutende, der ATLAS COPCO-COBRA-Benzin-Preßluft-Hammer und ein Sondenbohrer-Lift derselben Firma verwendet; für die Proben-Entnahme bis 2 m Tiefe diente ein verlängerter PÜRCKHAUER-Bohrstock. Bis zu 2 m Tiefe wurden die Proben in 10 cm-Abständen, darüber hinaus in 20 cm-Abständen entnommen. Gebohrt wurde je nach dem Wechsel der Witterungs-Verhältnisse in Abständen von 8 bis zu 20 Tagen. Wenn Niederschläge nach längeren Trockenperioden einsetzten, erfolgte die Proben-Entnahme bis 2 m Tiefe in 2-Tages-Abständen. Die Bohrungen wurden innerhalb eines 4×4 m-Meßfeldes unter räumlich alternierendem Ansatz der zeitlich aufeinanderfolgenden Bohrstellen und Wiederverstopfen der Bohrlöcher vorgenommen.

3.1.2 Saugspannungs-Charakteristik

Stechzylinder-Entnahme: Mit einem UNIMOG-SCHAEFF-Greifer wurden 4 m tiefe Profil-Gruben angelegt und die Stechzylinder-Proben aus den Wänden entnommen. Bei schneller Arbeit konnten auf diese Weise Proben bis 150 cm unterhalb des Grundwasser-Spiegels entnommen werden. - Für die Entnahme ungestörter Bodenproben aus größeren Tiefen wurde der von ATLAS COPCO gelieferte Kugelkopf mit einlegbarer 15 cm Messing-Hülse verwendet. Mit dem 7 cm Sandbohrer des STICHTING VOOR BODEMKARTEERING, Wageningen, wurde jeweils unter Vermeidung jeder Bodenpressung ein Loch bis auf die gewünschte Tiefe vorge-trieben. Mit dem LINNEMANN-Gestänge wurde dann der offene Kugelkopf eingeführt, mit Hilfe dessen die Probe wie bei einer normalen Stechzylinder-Entnahme gewonnen wurde.

Die pF-Kurve wurde an Stechzylinder- und Hülsenproben in üblicher Weise nach völliger Wasser-Aufsättigung im Vacuum in

Niederdruck-Töpfen ($pF < 3$) mit 1 Bar-Keramikplatte und Hochdruck-Töpfen ($pF 3-4,2$) mit 15 Bar-Keramikplatte der Fa. SOIL MOISTURE EQUIPMENT ermittelt.

3.2 GRUNDWASSER-STÄNDE

Die Bedingungen, die in Lößdecken die Einstellung von bestimmten "Grundwasser-Spiegelhöhen" offener Bohrlöcher festlegen, sind schwer zu analysieren. Daher wurden zu Vergleichszwecken 2 Typen unterschiedlich langer Grundwasser-Beobachtungsrohre eingesetzt: 1.) solche die nur am unteren Ende perforiert waren, um den im unteren Lößdecken-Bereich herrschenden hydrostatischen Druck zu erfassen und 2.) solche, die über ihre ganze Länge perforiert waren, um damit schwebende Horizonte ungespannten Wassers anzuzapfen und deren Niveau zu erfassen. Die GS wurde in den Rohren mit einer selbst gebauten batteriebetriebenen Senkelektrode gemessen, die bei Berührung des Wasserspiegels den Stromkreis schloß (Amperemeter-Ausschlag).

3.3 WITTERUNGS-DATEN

Die Werte für Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Windstrecke, Windgeschwindigkeit und Verdunstung (PICHE-Evaporimeter, WILD'sche Waage) wurden zentral in der Witterungs-Meßstation des Instituts für Bodenkunde und in der Wetterwarte Göttingen gemessen. Außerdem wurden auf den Parzellen in Einbeck und Rosdorf separate Niederschlags-Messungen durchgeführt. Ferner wurden die Meßdaten der Wetterwarten Einbeck und Northeim herangezogen.

3.3.1 Niederschläge

Die Niederschlags-Mengen wurden mit HELLMANN-Regenmessern ermittelt, deren Auffang-Fläche in Höhe der Grasspitzen 50 cm über dem Boden lag. Die Ablesung erfolgte täglich.

Zum Vergleich dienten die in den benachbarten Wetter-Stationen von Göttingen, Einbeck und Northeim gemessenen Werte. Der Niederschlags-Anteil in Form von Tau und Nebel wurde jeweils geschätzt.

3.3.2 Temperaturen

Die in den Klimatogrammen (Abb. 3 ff.) angegebenen Temperatur-Monatsmittel wurden in den Wetterwarten Einbeck und Northeim ermittelt.

3.4 TRITIUM-MARKIERUNG

3.4.1 Injektion

Ende Februar 1966 wurden die mit Gras bewachsenen 13 x 6 m großen eingezäunten Ausschnitte der Areale I, IV u. VIII mit tritium-markiertem Wasser versehen. Dazu wurde an der Boden-Oberfläche eine 10 m lange und 15 cm tiefe keilförmige Rinne ausgehoben. Diese wurde in 10 cm lange Kammern unterteilt, die durch dünne Erdwälle abgegrenzt wurden. Jede dieser Kammern erhielt zur gleichen Zeit 100 ml TOH-markiertes Wasser - entsprechend einer Niederschlags-Menge von 10 mm. Die spez. Aktivität der Lösung betrug $2,2 \times 10^6$ dpm/ml, erzeugt durch Versetzen von 10 l H_2O mit 10 ml TOH der spez. Aktivität von $2,2 \times 10^9$ dpm/ml (1 mCi). - Nach Eindringen des markierten Wassers wurde die Rinne wieder mit dem Aushub aufgefüllt. - Die linienhafte Ausbringung verfolgte den Zweck, bei der vorgesehenen Versuchs-Dauer von über 2 Jahren eine genügend große Fläche für die Bohrproben-Entnahme bereitzustellen.

3.4.2 Probenahme

Die Proben wurden in wechselnden, den Witterungs-Bedingungen angepaßten Zeit-Abständen unterhalb der Markierungs-Rinne

und in wechselnden Abständen von der Rinne entnommen. Es sollte nicht nur die vertikale Abwärts-Verdrängung des Bodenwassers, bewirkt durch die eindringenden Niederschläge, verfolgt werden, sondern auch eine möglicherweise auftretende horizontale Wasser-Bewegungs-Komponente und damit die nicht-diffusionsbedingte horizontale TOH-Ausbreitung kontrolliert werden. Die Proben wurden mit dem Bohrstock im Vertikal-Abstand von 10 zu 10 cm entnommen. Im Bereich des vermuteten Tracer-Maximums (TM) wurde mit 5 cm-Abständen gearbeitet. Der durch die Probe-Entnahme verursachte Ermittlungs-Fehler für die Lage des TM betrug ± 5 cm. Trotz angestrebter Vermeidung jeglicher Verschmierung und Kompression des kontaminierten Boden-Materials bei der Bohrstock-Probeentnahme ließ sich ein zusätzlicher, durch Verschleppung bedingter Fehler von ± 3 cm nicht vermeiden.

Die bei der Bohrung möglichst volumengleich (15 cm^3) entnommenen Einzelproben (15 cm^3) wurden in 50 ml-Propylen-Flaschen abgefüllt, die folgenden Anforderungen genügen mußten: Stabilität bei hoher mechanischer Beanspruchung (Transport, Schütteln, Zentrifugieren) und volle Standfestigkeit und Gewichtskonstanz beim Trocknen des darin enthaltenen Boden-Materials (105°C).

3.4.3 Extraktion

Die in den Flaschen enthaltenen Bodenproben wurden gewogen und entsprechend ihren - aufgrund von Parallel-Bestimmungen - geschätzten Wasser-Gehalten mit 3 - 5 ml CaCl_2 -Lösung versetzt. Zur Flockung reichte eine Konzentration von 20 - 30 mg Ca/l. Die Flaschen wurden 3 bis 4 Stunden lang geschüttelt und zentrifugiert, das Dekantat entnommen und durch ein Papierfilter gegeben und der Bodenrückstand zur Ermittlung der ursprünglichen Wasser-Gehalte in den Flaschen getrocknet und gewogen. Ein ml des Filtrats wurde für die Aktivitäts-Messung verwendet.

3.4.4 Messung

Dieses Aliquot wurde im Verhältnis 1:10 mit dem Szintillator vermischt, da dieses Verhältnis die größte Ansprech-Wahrscheinlichkeit und Nachweis-Empfindlichkeit gewährleistete. Als Meß-Gerät diente ein Flüssigkeits-Szintillations-Spektrometer der Fa. PACKARD. Die Ansprech-Wahrscheinlichkeit des benutzten Spektrometers lag bei etwa 30%, wobei die Meß-Genauigkeit mit $\pm 5\%$ anzunehmen ist. Der störende Einfluß der Phosphoreszenz in der Szintillations-Lösung wurde dadurch reduziert, daß die fertig zubereiteten Proben etwa 30 Min. vor der Messung im Dunkeln aufbewahrt wurden. Die Meßzeit betrug für jede Probe 10 Minuten. Verwendet wurde ein Flüssigkeits-Szintillations-System (n. WENZEL u. SCHULZE) (36) folgender Zusammensetzung:

primärer Szintillator: 2,5-Diphenyl-oxazol	7 g
sekundärer Sz.: 1,4-Di-(5-phenyl-oxazol-2-yl)benzol	0,15 g
Naphtalin	100 g

mit Lösungsmittel Dioxan zu 1 L gelöst,
10 ml davon zur Messung verwendet, Mischung mit markiertem H₂O i. Verh. 1:10.

3.4.5 Bilanz-Berechnungen

Nach Ablauf einer bestimmten Zeit nach der Injektion befindet sich oberhalb des TM eine bestimmte Menge an H₂O (mm N*), die sich aus der Tiefenlage des TM und dem mittleren Wassergehalt (i. Vol.%) errechnen läßt. Sie stellt denjenigen Anteil der inzwischen gefallenen Niederschlags-Menge (N) dar, der in den Boden eingedrungen ist und das vorher in der oberen Bodenschicht vorhandene Boden-Wasser verdrängt hat (geschichtete Abwärts-Bewegung oder "downward displacement"). Die Differenz N-N* entspricht dem durch Evapo-Transpiration und Interception in die Atmosphäre zurückgekehrten Wasser (V). Betrachtet man die Wasser-Bilanz eines Pedons bestimmter Tiefen-Begrenzung, so ergibt sich folgendes: Das von N* in

die Zone unterhalb TM verdrängte Wasser kann entweder den Bodenwasser-Vorrat im unteren Abschnitt des Pedons erhöhen (R = Vorrats-Rücklage) oder als versickerndes Wasser (A) das Pedon nach unten verlassen.

Berechnungsfehler: Bei Starkregen kann eindringendes Niederschlags-Wasser in groben Poren rasch abfließen und das TM überholen, ohne dies zu verschieben. In diesem Fall ergeben sich zu hohe Werte für V. In Trockenzeiten kann sich der Wassergehalt unterhalb TM auch durch Transpirations-Wasser-Entzug (tiefgehende Wurzeln, Transport in der Dampf-Phase) ohne Anheben des TM verringern. Dadurch werden bei Anwendung des oben angegebenen Gliederungs-Schemas nicht vorhandene Sickerwasser-Verluste vorgetäuscht. Die für A ermittelten Werte müßten dann V zugerechnet werden. Eine Entscheidung darüber könnten die zum jeweiligen Meß-Zeitpunkt im Profil vorliegenden Saugspannungs-Gradienten liefern.

4 ERGEBNISSE

4.1 ALLGEMEIN-BEFUNDE

4.1.1 Vergleich der Sediment-Decken (Volum-Verteilung)

Im Hinblick auf die einleitend umrissenen bodengenetischen Fragen hatten wir bei der Auswahl der Vergleichs-Standorte besonders darauf geachtet, daß die Profile vorwiegend aus dicken Lagen gelb-braunen, kalkhaltigen, wenig veränderten, "paraprimären" Lösses des Jungwürms aufgebaut waren, um den hydrologischen Vergleich zu erleichtern. Die Störung der Transport-Vorgänge des Wassers durch dichtere fossile Bodenhorizonte war dabei nach Möglichkeit gering zu halten.

Schon der makroskopische Befund hatte jedoch gezeigt, daß die kalkhaltigen, kaum verwitterten Lösses an Orten mit einem

Tabelle 2: Porenverteilung in den untersuchten WürmlöB - Decken

Die Profile sind nach abnehmender Grundwassertiefe geordnet.
Die Angaben (in Vol. %) beziehen sich auf die Mittelwerte.
Die eingeklammerten Zahlen geben die Werte der jeweils porenreichsten Probe in den einzelnen Profilen an.

	GPV	pF ≤2,0	pF >2,0	pF 2,0-2,7	pF 2,7-3,0	pF 2,0-3,0	pF 3,0-3,7	pF ≥3,7	pF >3,0
Lockerer trockener paraprimärer LöB *)	48	7	41	16	4	20	13	8	21
Einbeck (Zone C u.E)	42(43)	6(5)	36(38)	↑8(11)	↑6(5)	↑14(16)	↓8(11)	14(11)	↓22(22)
Northeim/Oben (Zone C u.E)	42(43)	9(9)	33(34)	7(7)	5(7)	12(14)	8(8)	13(12)	21(20)
Northeim/Mitte (Zone C u.E)	39(41)	6(5)	33(36)	7(6)	5(8)	12(14)	8(10)	13(12)	21(22)
Rosdorf/Schule (Zone C)	43(47)	6(11)	37(36)	6(7)	4(3)	10(10)	14(10)	13(16)	27(26)
Rosdorf/Gärtnerei "	43(48)	5(8)	38(40)	7(7)	3(2)	10(9)	15(18)	13(13)	28(31)
Rosdorf/Rasetunnel "	41(46)	6(8)	35(38)	5(3)	3(2)	8(5)	14(14)	13(19)	27(33)
Rosdorf/Beeke "	43(46)	6(9)	37(37)	6(6)	3(4)	9(10)	16(15)	12(12)	28(27)
Rosdorf/Bahndamm "	41(45)	5(7)	36(38)	5(4)	4(4)	9(8)	↓15(16)	12(14)	↓27(30)

*) Werte nach Rohdenburg und Meyer

hochliegenden GS eine im natürlichen Lagerungs-Zustand höhere Kohärenz ihrer festen Bestandteile aufwiesen (z.B. höherer mechanischer Eindring-Widerstand) und gegenüber den Lössen mit tiefliegendem GS eine schwache Marmorierung zeigten.

Um diese offensichtlich von der Lage der GS bedingten Unterschiede zahlenmäßig zu charakterisieren, haben wir für Tab.2 aus den untersuchten Löß-Profilen die scheinbar wenig oder nicht veränderten Jungwürm-Löß-Pakete ausgesondert und ihre Porengrößen-Verteilung durch die Wahl bestimmter Porengrößen-Klassen leichter vergleichbar gemacht. Die Einzel-Werte finden sich in den Porengrößen-Diagrammen der Abb. 3, 5a, 5b, 7a, 7b, 7c, 7e.

Tab. 2 enthält die Angaben über die Poren-Verteilung dieser Lössе, die alle nahezu die gleiche Korngrößen-Verteilung aufweisen. Die einzelnen Profile sind von oben nach unten nach steigendem Grundwasser-Einfluß angeordnet. Betrachtet man die Poren-Verteilung des Lösses mit tiefliegender GS als Ausgangs-Zustand, so zeigt sich mit steigender GS eine zunehmende Um-Verteilung der Poren-Größen: Bei zunehmenden natürlichen Wasser-Sättigungs-Graden machen sich Verdichtungs-Tendenzen bemerkbar, die sich in einer isovolumen (d.h. ohne Verringerung des Gesamt-Porenvolumens erfolgenden) Verkleinerung der Porengröße äußern. Zur Verdeutlichung dieser Erscheinung ist in Tab. 2 eine Grenze bei pF 3,0 gezogen worden. Der Volumen-Anteil pF 2,0 - 3,0 wird dem Poren-Anteil $pF > 3,0$ gegenübergestellt. Eine deutliche Verringerung des Poren-Anteiles 2,0 - 3,0, besonders der Poren 2,7 bis 3,0 (entsprechend 6 - 3 μ Äquivalent-Poren-Durchmesser) wird kompensiert durch eine Vermehrung des Poren-Anteiles $pF > 3$, besonders pF 3 - 3,7 (entsprechend 3 - 0,5 μ \emptyset). Dieses hat eine erhebliche Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit der unter Grundwasser-Beeinflussung stehenden Lössе zur Folge, die wiederum - im Sinne einer Rückkopplung - zu einer weiteren zusätzlichen Vernässung des Lößmaterials unter dem Einfluß der eindringenden Niederschlags-Wässer Anlaß gibt.

Trotz gleicher Herkunft, Korngrößen-Zusammensetzung, Primärstruktur und gleicher geringer Verwitterung der altersgleichen Lössen bestehen zwischen diesen hydro-pedogen bedingte Gefüge-Unterschiede, die rückwirkend Einflüsse auf die Entkalkungs-Geschwindigkeit und damit auf die Entwicklung des Bodens gehabt haben können (siehe Feucht-Schwarzerden bei hohem Grundwasserstand und dadurch bedingter gehemmter Entkalkung). Diese pedogene Uneinheitlichkeit der Sedimente liefert darüber hinaus auch die Erklärung für die später noch zu diskutierende Frage der Grenzbereiche für die Luft-Okklusion.

4.1.2 Witterungs-Verlauf im Untersuchungs-Zeitraum

In den Abb. 3 und 7 sind oben links die Klima-Diagramme (40- bzw. 70-jähr. Mittel) von Einbeck und Göttingen wiedergegeben. Zur Darstellung der Witterungs-Abweichungen während des Untersuchungs-Zeitraumes dienen die über den Kopfleisten der Chronoisoplethen-Diagramme (Abb. 3 u. 7) wiedergegebenen Klimatogramme für 1965, 66 und 67. Daneben enthält Tab. 3 die wichtigsten Witterungs-Summen-Werte.

GÖTTINGEN: Aus den Gegenüberstellungen geht hervor: Der auf das Trocken-Jahr 1964 folgende Untersuchungs-Zeitraum (mit den Tracer-Messungen) ist durch eine Folge nasser Jahre gekennzeichnet. Die für den Sickerwasser-Anteil ausschlaggebenden Winter-Niederschläge erreichen 1965/66 ca. 150 % und 1966/67 ca. 200 % der Durchschnitts-Beträge. Die Summe der Sommer-Niederschläge liegt dagegen nur unwesentlich über dem Durchschnitt. - Damit übertrifft der Untersuchungs-Zeitraum selbst die Extrem-Bedingungen des bisher feuchtesten Jahres (1958) der 70-jährigen Beobachtungs-Periode (vgl. PAPP, 26). Die an der Boden-Oberfläche ermittelten winterlichen Infiltrations- und Versickerungs-Beträge müssen daher wohl als maximal angesehen werden. -

Abweichend vom Klima-Diagramm und von früheren Bilanzierungs-Perioden (PAPP, 26) weisen jedoch das Vergleichsjahr 1965 wie auch das "nasse" Jahr 1966 eine ausgesprochene spätsommerliche "Trocken"- bzw. "Dürre"-Zeit (n. WALTER u. LIETH, 35) auf. Diese bewirken - ähnlich wie im Trocken-Jahr 1959 - (n. PAPP (26) zweit-trockenstes Jahr des Beobachtungs-Zeitraumes) eine bei tiefen GS bis zu 2 m Tiefe reichende Austrocknung des Bodens bis zu pF-Werten von 2,8 - 3,0. Gleich-

Tab. 3: Wichtigste Witterungsdaten der Vergleichsjahre (Göttingen)

	Ø (70jähr)	1964 (*)	1965	1966	1967	1958 extremes Naßjahr
Jahresniederschlag mm	607	430 (71%)	694 (114%)	850 (140%)	836 (138%)	857 (141%)
Winterniederschlag Nov. - März	207	119	192	355	401	286
Sommerniederschlag Apr. - Oktober	400	303	414	424	496	560
Tage mit mindestens 0,1 mm	176	142	236	207	210	197
Tage mit mindestens 10 mm	14	8	13	23	19	20
Zahl der mindestens 3-tägi- gen Trockenperioden	12	27	12	17	16	10
Längste Trockenperiode (Tage)		8 (Aug.)	12 (Okt.)	9 (Aug.)	8 (Febr.)	12
Temperatur °C	8,6	8,4	7,8	8,9	8,9	8,6
Sonnenscheindauer (Stunden)	1546	1616	1281	1286	1478	1423
Mittlere tägliche Strah- lungsmenge in g cal/cm ²	216		197	200	198	
Zahl der Sommertage (mindestens 25°C)	29	49	14	27	27	23

*) dritt-trockenstes Jahr des 70-jährigen Beobachtungs-
zeitraumes (Minimum 1911 mit 370 mm (61%) Niederschlag)

zeitig erfolgt eine durch Evapo-Transpiration bedingte Anhebung der Tracer-Front durch Kapillar-Faden-Wasser, das bei den genannten pF-Werten aufsteigt.

EINBECK: Die Klimatogramme für Einbeck (Abb. 3) weichen von den Klimatogrammen Göttingens insofern ab, als die hohen Winter-Niederschläge 1966/67 fortfallen. Damit kann zumindest der Abschnitt Herbst 1966 - Winter 1966/67 - Sommer 1967 als annähernd normal bezeichnet werden. Wegen der höheren Durchschnitts-Niederschläge (671 mm) von Einbeck nähern sich die Klimatogramme dem Klima-Diagramm stärker als das in Göttingen der Fall ist.

Der normale, zu trockene oder zu nasse Charakter der einzelnen Witterungs-Phasen ist zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit unter den Klimatogrammen von Einbeck und Göttingen vermerkt.

4.2 WASSER-HAUSHALT DER LÖSS-DECKEN MIT TIEFLIEGENDEM GRUNDWASSER

Hierzu gehören die Areale

- I Einbeck (Abb.3), Grundwasser-Stand (10,50 m) - 12 m
- II Northeim (Abb.5a), Grundwasser-Stand (8 m) - 9,50 m -
10,00 m - (12 m)
- III Northeim (Abb. 5b), Grundwasser-Stand (5,5 m) - 6,60 m -
7,60 m - (8 m)

4.2.1 Poren-Verteilung und Homogenität der Löß-Decken

EINBECK, I (Abb. 3):

Der Volumen-Anteil des Gesamt-Poren-Raumes am Gesamt-Volumen des Lösses ist innerhalb des ganzen Löß-Profiles mit Werten um etwa 42 % annähernd gleich. Unterschiede bestehen dagegen in der Verteilung der Poren-Größen. Die wenig veränderten Löß-Pakete C und E sind in sich annähernd homogen. Sie enthalten ca. 19 % Poren mit einem Äquivalent-Durchmesser $> 3 \mu$, entsprechend $pF < 3$. - Von diesem Löß heben sich deutlich und mit annähernd übereinstimmendem Grad der Abweichung die Zonen F, D und ein Bereich innerhalb der Zone A ab. Bei

letzterem handelt es sich um den Mittel-Abschnitt des B_t , vermutlich einen holozän-pedogen überprägten fossilen jungwärm-zeitlichen Boden-Horizont im Löß. In diesen Zonen hat gegenüber dem Löß eine Poren-Umverteilung im Sinne einer Verdichtung stattgefunden. Wie in den feuchten Lössen von Rosdorf ist bei ihnen der Poren-Anteil vom $\emptyset > 3 \mu$ von 19% auf ca. 13 % geschrumpft und zwar zugunsten des Poren-Anteiles $< 3 \mu$ (bzw. $> pF \ 3$). - Die Löß-Zone G zeigt die stärkste Poren-Umverteilung und Verdichtung. Sie weist minimale Porengehalte mit $pF < 3$ von 8 Vol.% auf und wurde von keinem anderen Proben-Material aus unserem Untersuchungs-Programm unterboten. Wir vermuten, daß es sich hier z.T. um subaquatisch sedimentiertes z.T. um schwemmerlagertes Löß-Material handelt.

NORTHEIM, II (Abb. 5a):

Gegenüber Einbeck ist dieses Profil wesentlich homogener. Die Porungs-Daten der Zonen aus reinem Löß entsprechen denen von Einbeck. Die Zone D verursacht hier eine im Vergleich zu Einbeck nur unbedeutende Diskontinuität des Verteilungs-Diagrammes. Für das Studium von potentialbedingten Wasser-Bewegungen ist daher dieses Profil gut geeignet.

NORTHEIM, III (Abb. 5b):

Der Löß ist hier infolge höheren Grundwasser-Standes feuchter. Gemäß den im Absatz 4.1.1 aufgezeigten Beziehungen ist daher sein Gesamt-Porenvolumen um ca. 2-3 % geringer als in den beiden ersten Profilen. Diese Erniedrigung geht auf Kosten des größeren Poren-Anteiles ($pF < 3$) der hier nur ca. 17% (Einbeck 19 %) ausmacht. Auch in diesem Profil zeigt die Löß-Decke eine wesentlich größere Homogenität als in Einbeck. Die Depression des Grobporen-Anteiles im unteren Teil der Zone A mag - ähnlich wie in Einbeck - als fossile pedogene Verdichtung erklärt werden.

Abb. 3: Profil Einbeck (Areal I):

Poren-Verteilungsdiagramm, Klima-Diagramm,
Klimatogramm, Niederschlags-Verteilungs-Diagramm,
Äquivalent-Saugspannungs-Chronoisoplethen-Diagramm
und Verlagerungskurve des tritium-markierten Boden-
Wassers.

Legende:

Zone A: A_1 (60 cm), B_t (140 cm), B_v (0-30 cm) der Parabraunerde
Zone B: Undulations-Bereich der Entkalkungs-Grenze (195-235 cm)
Zone C, E: Löß
Zone D: fossile dichtere Boden-Zone
Zone F, G: verdichtete Pakete aus Löß-Material (Böden? Umla-
gerungen? an der Basis subaquatische Löss?)

Anmerkungen:

Zum Profil:

ab 6,30 m \cong 5,7 m über GS \cong pF 2,76	schwach marmoriert
ab 8,30 m \cong 3,7 m über GS \cong pF 2,57	verfestigte Rost-Wurzel- röhren, graue Red.-Flek- kung
ab 9,50 m \cong 2,5 m über GS \cong pF 2,4	völlig graue, darunter blau-graue Red.-Färbung

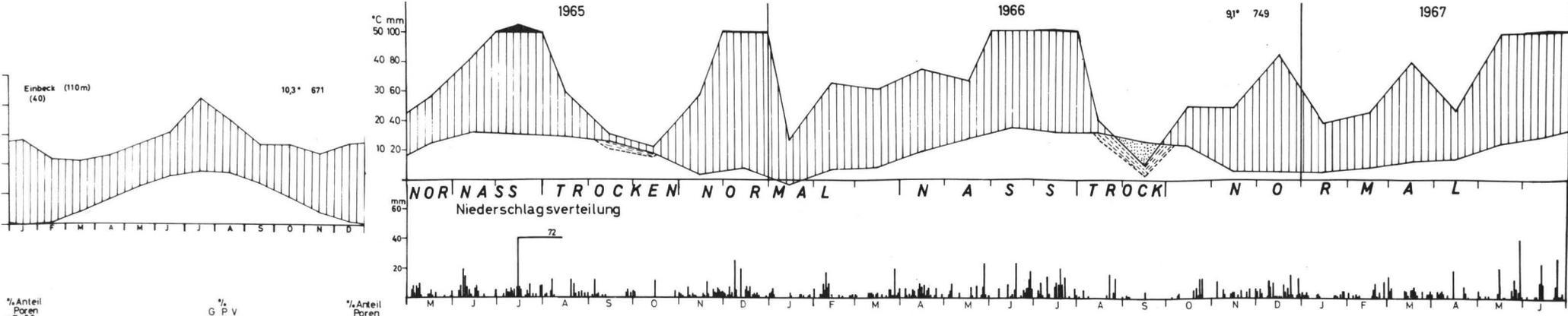
Zur Tritium-Kurve:

obere gestrichelte Linie: oberhalb dieser Linie kein HTO
nachweisbar
mittlere stark ausgezogene Linie: Lage des HTO-Tracer-Maximums
untere gestrichelte Linie: unterhalb dieser Linie kein HTO
nachweisbar

Zum Chronoisoplethen-Diagramm:

Die eingetragenen Zahlen geben die für die jeweilige Flächen-
schraffur gültige Spanne der Saugspannungen an.
Die eingezeichneten Zeiger weisen in die Richtung abfallender
Gesamtpotentiale des Bodenwassers (total potential) und deuten
damit die Zugwirkungen und -richtungen auf das Bodenwasser an.

Klimatogramm von Einbeck



% Anteil Poren pF > 30

30%

20%

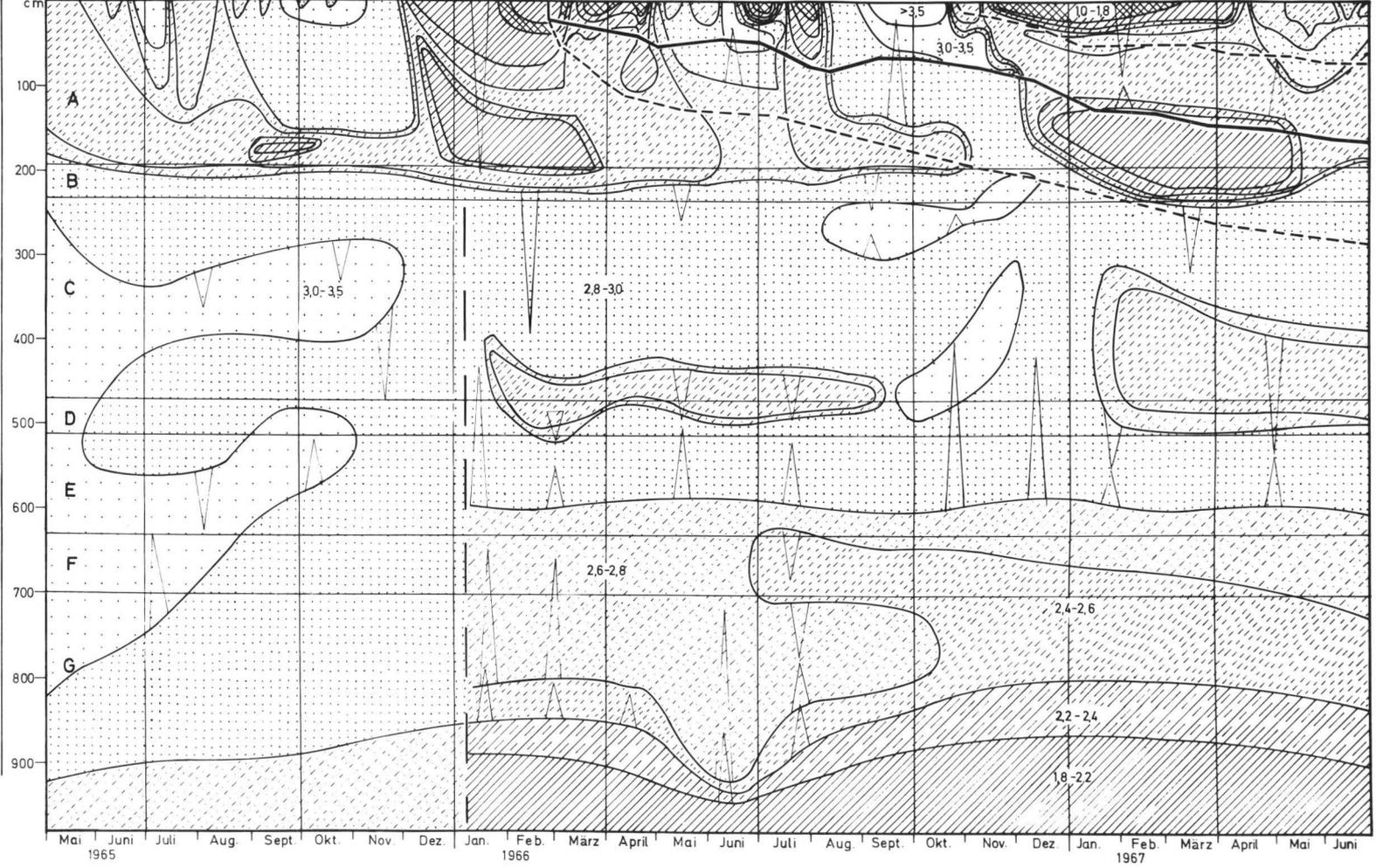
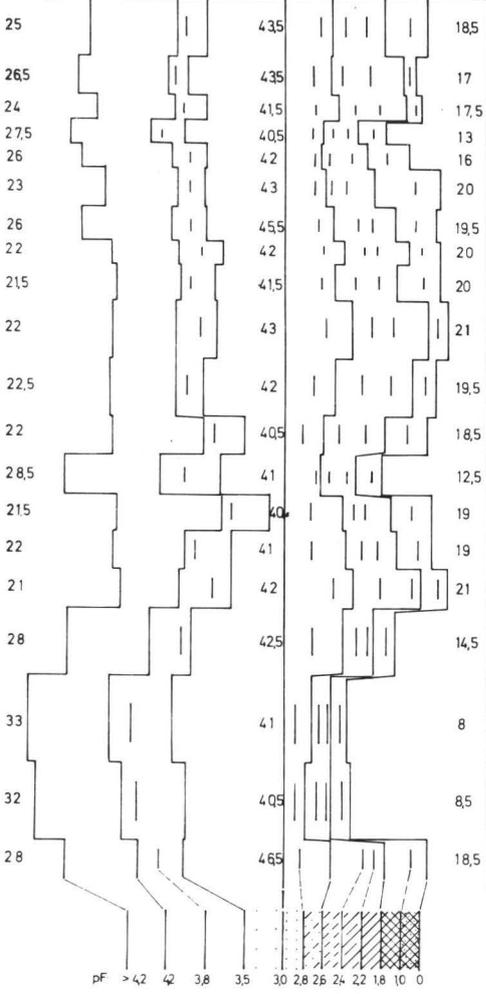
10%

% Anteil Poren pF < 30

10%

20%

G P V Boden 0%



4.2.2 Gang der Wasser-Verteilung in den Löß-Decken

In gleicher Weise wie das zahlreiche andere Autoren (4, 6, 26) bisher auch getan haben - jedoch im Bewußtsein, daß das Fehler in sich birgt - übertragen wir die ermittelten Wasser-Gehalte unter Zugrundelegung der im Druck-Topf ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Charakteristik (pF-Kurve) in Saugspannungs-Werte. Diese wollen wir vorsichtshalber als "Äquivalent-Saugspannungen" bezeichnen, da sie nicht direkt - z.B. mit Tensiometern - gemessen, sondern abgeleitet worden sind. Dabei tun wir zunächst so, als ob die pF-Kurve hysteresefrei ist, d.h. sowohl im H₂O-Desorptionsgang wie auch im Absorptionsgang den gleichen Verlauf hat (Einschränkungen hierzu siehe MOSCHREFI, 21). In den Abbildungen 3, 5a und 5b stellen wir die zeitlichen Änderungen der Äquivalent-Saugspannungen in den drei oben genannten Löß-Decken dar und diskutieren sie zunächst so, als ob die errechneten Äquivalent-Saugspannungen mit den realen Saugspannungen identisch sind. Nach den Ergebnissen von MOSCHREFI (21) zu urteilen, findet dieses Vorgehen bei Lössen dann seine Berechtigung, wenn sich die Schwankungen der Saugspannung innerhalb desjenigen - nur wenig von Hysterese gekennzeichneten - pF-Bereiches abspielen, der wie folgt begrenzt wird: Nach unten durch den Beginn der Luft-Okklusion (etwa bei pF 2,4); nach oben durch das "Abreißen" der durchgehenden Wassermeriskus-Wassermeriskus-Kontakt-Fäden (etwa bei pF 3,2).

Anmerkung zum Profil Einbeck: Im Januar 1966 wurde hier der Meß-Standort gewechselt wie in Abb. 3 durch die gestrichelte Linie angegeben ist. Der Wechsel wurde vorgenommen, weil das zuerst untersuchte Profil über einer in den Ton-Untergrund eingetieften kiesgefüllten Entwässerungs-Rinne mit tiefer liegendem GS lag. Das später untersuchte Profil entspricht dagegen mehr einer "Plateau-Lage". Unabhängig von dieser unterschiedlichen hydrologischen Situation sind der Wasserhaushalt im Oberboden (Zone A), d.h. in unserem Falle die Chronoisoplethen-Diagramme, gleich, so daß sich die Oberboden-Diagramme nahtlos aneinanderfügen, während mit zunehmender Profil-Tiefe die Differenzen zwischen den beiden Meß-Standorten fortschreitend größer werden. Dies mag zugleich als ein Hinweis darauf dienen, daß mit der Zunahme der

absoluten GS der Einfluß von unterschiedlichen Grundwasser-Ständen und der Einfluß von unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der unterlagernden Lössse auf die Hydrologie des Oberbodens abnehmen.

Auswertungs-Methode (Ψ -Diagramme)

Zur vergleichenden Auswertung der Chronoisoplethen-Diagramme Abb. 3, 5a u. 5b wählen wir in Anlehnung an HARTGE u. BENECKE (14) folgendes Verfahren (vgl. hierzu Abbildungen 4a,b u.c.):

Man wählt ein Ordinaten-System, in dem die Abzisse die Äquivalent-Saugspannung des Boden-Wassers in Metern Wasser-Säule angibt und auf der Ordinate die Profil-Tiefe oder die Höhe über dem Grundwasser-Spiegel abgetragen ist. Hat sich die Löß-Decke durch kapillaren Wasser-Aufstieg vom Grundwasser her bis zum Erreichen des Gleichgewichts-Zustandes mit Wasser aufgesättigt, so herrscht in allen Abschnitten des Profils Gleichheit zwischen dem "Gravimetrischen Potential Z" und dem diesem entgegenwirkenden "Kapillar- oder Matrix-Potential M" ($Z = M$). Das "Gesamt-Potential" Ψ ist dann gleich Null, ($Z - M = 0$); es kann keine weitere Wasser-Bewegung mehr stattfinden. In diesem Zustand muß Z, ausgedrückt in m Wassersäule, bzw. der negative Wert von M, ebenfalls ausgedrückt in m Wassersäule, gleich der Bodenhöhe in Metern über dem Grundwasser-Spiegel sein.

In den Diagrammen (Abb. 4) wird dieser Gleichgewichts-Zustand durch die Geraden mit der Steigung 1 charakterisiert. Diese werden als Null-Gesamtpotential-Kurve, Zero- Ψ -Gerade, Ψ -Linie oder Gleichgewichts-Kurve (bei BENECKE, 14) bezeichnet. Entsprechend den jahreszeitlich unterschiedlichen Grundwasser-Ständen sind in den Diagrammen in Abb. 4 die Ψ -Linien der GS-Extrema und -Durchschnitte eingetragen.

Liegen die Saugspannungs-Meßwerte des Profils oberhalb der Ψ -Linie, so bedeutet dies $Z > M$, d.h. abwärtsgerichtete Bewegungs-Tendenz des Kapillar-Wassers. Liegen sie dagegen unterhalb der Ψ -Linie ($Z < M$), so sind die Zugkräfte aufwärts gerichtet.

Abb.4a: EINBECK - AREAL I

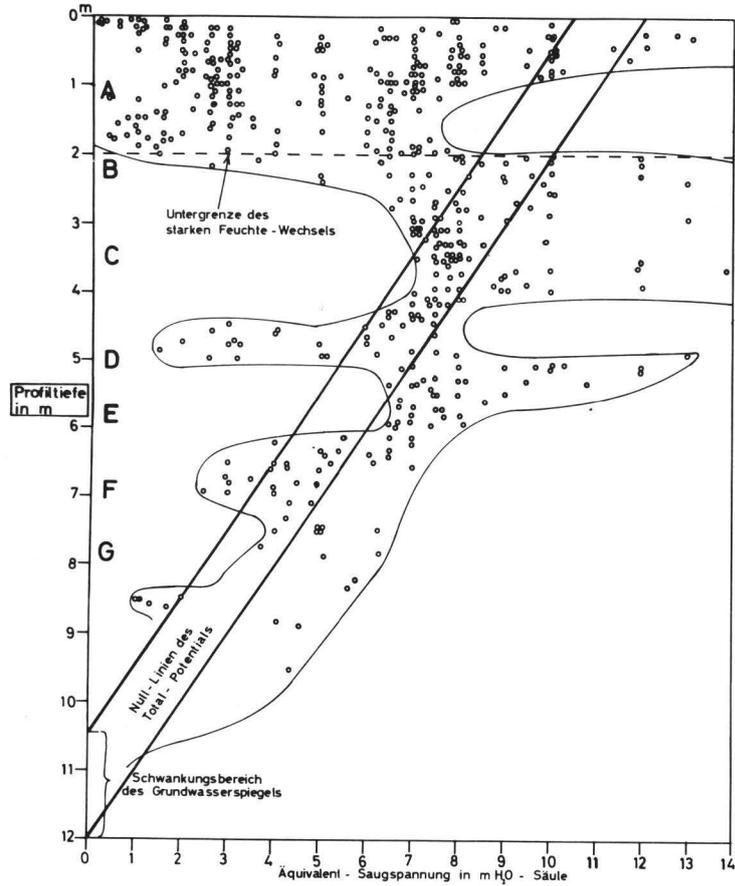


Abb.4b: NORTHEIM - AREAL II

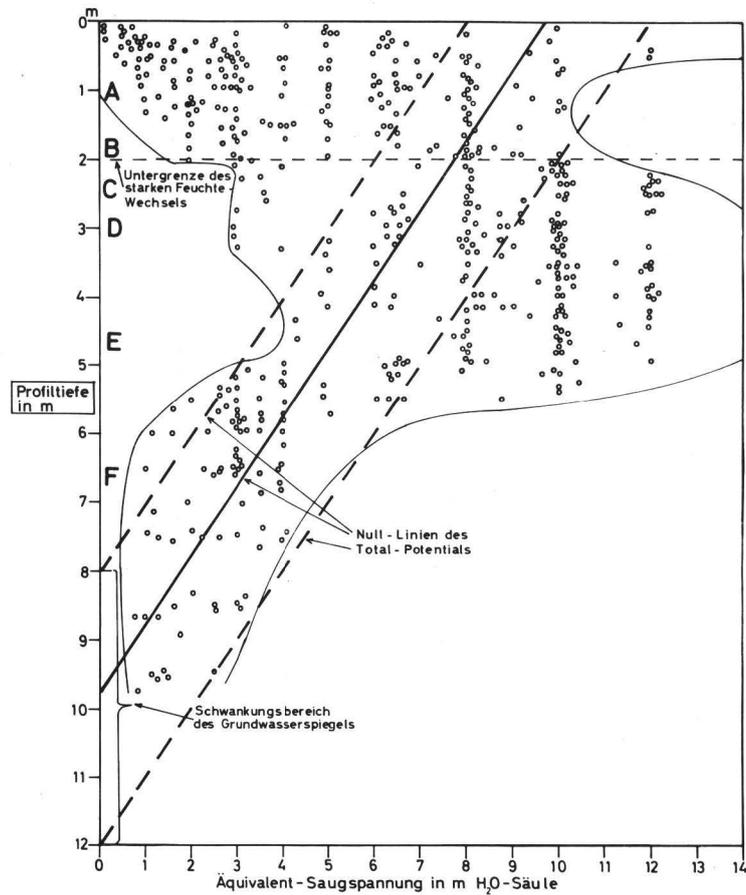


Abb.4c: NORTHEIM - AREAL III

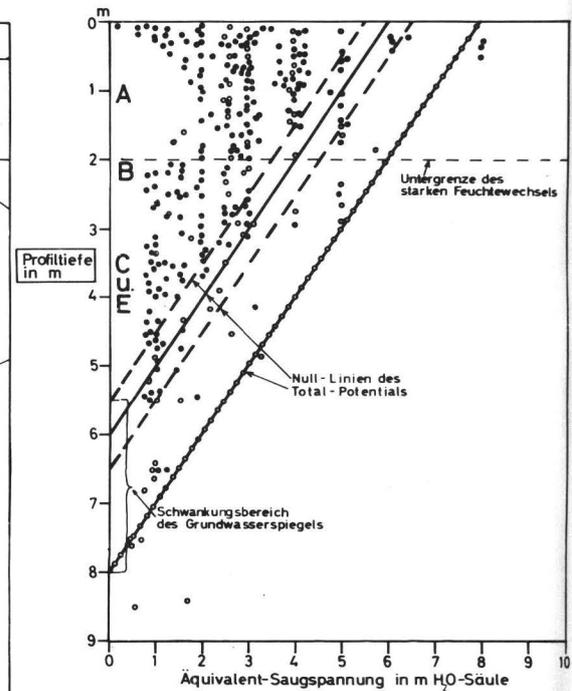


Abb. 4. ψ_s - Diagramme und ermittelte Äquivalent - Saugspannungen der drei Lößprofile mit tiefem GS
 Einbeck (I) (vgl. Abb. 3), Northheim (II) (vgl. Abb. 5a),
 Northheim (III) (vgl. Abb. 5b)

In den Chronoisoplethen-Diagrammen der Abb. 3, 5a und 5b sind für jedes einzelne Meß-Datum die entsprechenden Ψ - Werte errechnet worden. Die horizontale positive oder negative Abweichung von der jeweiligen Ψ_0 -Linie gibt dann die Richtung und Steilheit des hydraulischen Gesamt-Potentials an. Die in die Chronoisoplethen-Diagramme eingetragenen Richtungs-Zeiger sollen in die Richtung der auf das Bodenwasser wirkenden resultierenden Zugkraft weisen. Auf den Irrtum, der solchen Potential-Gefällszeichern zugrunde liegen kann, ist noch besonders hinzuweisen.

EINBECK

-Abb. 3 u. 4a - 10,5 - 12 m Grundwasser-Tiefe

4.2.2.1 ZONE A (die das Solum oberhalb der Entkalkungs-Grenze umfaßt - A_1 , B_t u. B_v -Horizont)
Fragen zur Lage der Entkalkungs-Grenze

Im Gegensatz zu den tieferen Abschnitten des Löß-Profiles zeigt die Zone A einen starken Feuchte-Wechsel in Abhängigkeit von den jeweils herrschenden Witterungs-Bedingungen. Die Untergrenze dieser wechselfeuchten Zone zu der hydrologisch ausgeglicheneren Löß-Zone C hin (= C- bzw. Ca-Horizont) ist außerordentlich scharf und deckt sich ziemlich genau mit der Entkalkungs-Grenze.

Damit gewinnen folgende später noch eingehender zu beleuchtende Fragen an Bedeutung:

1. Ist durch die Entkalkung überhaupt ein Gefüge-Sprung und eine gravierende Verschlechterung der hydraulischen Leitfähigkeit eingetreten?
 - 1a) Hat die infolge Entkalkung direkt oberhalb der Kalk-Auswaschungs-Grenze erzeugte Poren-Umverteilung (Verfeinerung) ein solches Gewicht, daß dadurch ein so scharfer Wechsel (Wasserstau) im hydrodynamischen Verhalten zwischen den Abschnitten A und C erzeugt wird, wie er aus Abb. 3 hervorgeht?
2. Ist die heutige Lage der Entkalkungs-Grenze stationär (End-Lage) oder noch im Zustand der Absenkung?
 - 2a) Wenn stationär: Lag an der heutigen Entkalkungs-Grenze ein primärer Gefüge-Sprung im kalkhaltigen Löß vor, der die heutige (End-)Lage der Entkalkungs-Grenze vorausbestimmt hat oder ist
 - 2b) die fixierte Lage als ein für diesen mächtigen Löß

typischer Gleichgewichts-Zustand zwischen den klimatischen und den vom Grundwasser ausgehenden Wirkungen aufzufassen, d.h. stellt sie eventuell eine Fläche dar, deren Lage durch bestimmte gravimetrische - (Niederschlags-Wasser) und Kapillar-Potentiale (Aufstiegs-Wasser) bestimmt ist?

Abb. 4,I macht deutlich, daß in der Zone A über fast den gesamten Beobachtungs-Zeitraum hinweg in allen Horizonten die Äquivalent-Saugspannung kleiner als ψ_0 ist. Entspricht die Äquivalent-Saugspannung der realen Saugspannung, was sich für Zone A tensiometrisch beweisen läßt, so bedeutet der in Abb. 4 dargestellte Befund, daß über den ganzen Beobachtungs-Zeitraum hinweg Wasser in absteigender Richtung den Grenz-bereich B passiert haben muß. Diese theoretisch zu fordernde anhaltende Wasser-Passage durch die Grenz-Zone B wird nur einmal kurzfristig im November 1966 unterbrochen. Unabhängig von diesem anhaltenden, im Winter stärkeren, im Sommer schwächeren, selten aber stockenden Wasser-Übertritt aus den unteren Abschnitten der Zone A nach C, können sich in den oberen und mittleren Abschnitten von A umgekehrte Potential-Gradienten aufbauen, die eine aufsteigende Wasser-Bewegung auslösen (vgl. z.B. die Zeit-Abschnitte Mai/Juni und September/Oktober 1966). Das heißt: In Zeiten mit starkem Verdunstungs-Zug kann gleichzeitig aus den im unteren Teil von A "gespeicherten" schwächer gespannten Wasser-Vorräten sowohl Wasser nach oben steigen wie nach unten abströmen. - Diese Verhältnisse werden vom zeitlichen Verlauf der Tritium-Eindring-Kurve widergespiegelt: Solange sich das Tracer-Maximum im oberen und mittleren Abschnitt der Zone A befindet (Sommer 1966) macht es den Wechsel von auf- und absteigender Wasser-Bewegung mit. Vom Januar 67 an gelangt es dann in die tieferen Abschnitte von Zone A. Es zeigt von jetzt an eine ständig abwärts gerichtete Bewegung, die auch während des sommerlichen Wasser-Aufstiegs 1968 anhält, der im oberen Teil von A stattfindet und wohl abgeschwächt, aber nicht mehr unterbrochen wird. Es muß daraus gefolgert werden, daß eingedrungenes Niederschlags-Wasser - nachdem es den Grenz-Bereich von 150 bis 200 cm Tiefe erreicht hat - kaum noch für eine aufsteigende Wasser-Bewegung oder Rückkehr in die Atmosphäre in Betracht zu ziehen ist.

Bewegungen des Tritum-Maximums:

T	II.66	V.66	X.66	III.67	VI.67	X.67	III.68	X.68	
cm	20	47	57	140	155	160	240	245	
	Abstieg	<u>Auf-u.AB</u>		Abstieg	<u>Stagnation</u>		Abstieg	<u>Stagnation</u>	Ab

4.2.2.2 ZONEN C und E: Luft-Okklusion als hydrologisch bedeutsamer Faktor

Die Zonen C und E, die aus kalkhaltigem, lockerem, gut durchlässigem und wenig verändertem Löß bestehen, zeigen die überraschende Erscheinung, daß hier - z.T. ganzjährig - die Äquivalent-Saugspannungen höher sind als der Ψ -Geraden entsprechen würde. Das heißt: diese Zonen müßten einen ständigen Wasserzug auf die jeweils unterlagernden und überlagernden feuchteren Schichten ausüben, die Saugspannungen kleiner Ψ haben. Es dürfte dann nicht zu einer abwärts gerichteten Wasser-Bewegung durch das Löß-Paket kommen. Solch ein abwärts gerichteter Wasser-Transport ist aber nachgewiesen, und das heißt: die angegebenen, rechnerisch aus dem Wasser-Gehalt ermittelten "Äquivalent-Saugspannungen" entsprechen in den Löß-Schichten C und E nicht den realen Saugspannungen. Letztere müssen, wenn es zu einem abwärts gerichteten Wasser-Transport kommen soll, links von der Ψ -Geraden liegen. Folglich sind auch die in der Zeichnung 3, Zone C und E, eingetragenen aufwärts weisenden Gefällsrichtungs-Pfeile falsch.

Wie ist diese - offensichtlich material-spezifische Diskrepanz zwischen den "Äquivalent-Saugspannungen" und den realen Saugspannungen zu erklären? Eine Deutungs-Möglichkeit liefern die Modell-Untersuchungen von MOSCHREFI und MEYER (21). Danach werden bei der Aufsättigung von mehr oder weniger stark vorentwässertem Löß mit Wasser besonders dann, wenn die Aufsättigung von oben her erfolgt, bestimmte Poren-Bereiche ausgespart, da in diesen die vorhandene Luft von Wasser-Menisken eingeschlossen wird. Das bedeutet, daß im Sättigungsgang zuerst die Porenraum-Anteile mit kleinem Durchmesser aufgefüllt werden. Die mittleren Poren-Räume bleiben mit Luft gefüllt und erst die größeren kohärenten Poren-Anteile, aus

denen die Luft entweichen kann, nehmen wieder Wasser auf. Das hat zur Folge, daß die in der pF-Kurve - die ja im H₂O-Desorptions-Gang bestimmt wird - zum Ausdruck kommende Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung nicht mehr zutrifft. (Sorptions-Desorptions-Hysterese) Bei einem gravimetrisch ermittelten Wassergehalt ist jetzt eine niedrigere Saugspannung gegeben, als aus der pF-Kurve abzulesen ist. Im Extremfall kann ungespanntes Wasser vorliegen - wenn auch in sehr geringen Mengen und mit sehr geringem wasserleitendem Querschnitt - während der zugehörige Wassergehalt Saugspannungen von pF 2 bis pF 3 entspricht. - Dieser Umstand zeigt, daß es im Grunde sinnlos ist, unter solchen Bedingungen die für die Wasser-Bewegung erforderlichen Potential-Größen über die Wasser-Gehalts-Messung zu ermitteln. Vielmehr müßten dazu direkte tensiometrische Messungen angesetzt werden. Das stößt jedoch wegen der großen Meß-Tiefe auf Schwierigkeiten. Das Problem wäre z.B. mit den elektrisch registrierenden "Aquapot"-Tensiometern nach PECK und RABBIDGE (27) lösbar, doch standen uns diese zum Zeitpunkt unserer Messungen noch nicht zur Verfügung.

Es ließe sich ferner der generelle Einwand erheben, daß das gesamte Konzept der Ψ -Linien und der Potential-Abweichungen hier insofern unzulässig sei, als bei Schluffen (vgl. Modellversuche von MOSCHREFI und MEYER, 21) der durchgehende "strangförmige" Wasser-Meniskus-Meniskus-Kontakt vom Grundwasser bis zur Oberfläche bei etwa pF 2,8, d.h. ca. 6,3 m, abreißt und darüber andere Gesetze für den Wasser-Potential-Ausgleich gelten. Unsere früheren Messungen an natürlichen mächtigeren Löß-Profilen (ROHDENBURG u. MEYER, 28) haben jedoch gezeigt, daß die Unterbrechung der durchgehenden Menisken-("Kapillar")-Stränge erst oberhalb von pF 3 erfolgt. Somit läßt sich auch im Fall des mächtigen Löß-Profiles von Einbeck das gewählte Auswertungs-Verfahren des M/Z-Potential-Vergleiches anwenden. Dies wird bestätigt durch die von oben her ungehemmt in die Zone C eindringende Tracer-Front.

Demnach ist das Problem der Luft-Okklusion offenbar das gravierende Problem bei der Betrachtung der hydraulischen ungesättigten Wasser-Leitfähigkeit als Funktion des Gesamtpotential-Gefälles. Als wichtigste Kenngröße muß hierbei derjenige pF-Bereich gelten, innerhalb dessen eine Luft-Okklusion bei Wasser-Aufsättigung möglich und wahrscheinlich ist, d.h. derjenige pF-Bereich, innerhalb dessen eine durch Luft-Einschluß bedingte Hysterese der pF-Kurve zwischen sorptiver und desorptiver Wassergehalts-Änderung auftritt. Bei den an Modell-Lössen durchgeführten Untersuchungen von MOSCHREFI und MEYER (21) war dies zwischen den pF-Werten 2,35 und ca. 2,1 der Fall. Die Lage des Luftokklusionsbereiches ist jedoch sehr von der Poren-Verteilung des Materials und den in den Sediment-Decken herrschenden hydrostatischen Drucken bedingt. In den in Abb. 4 dargestellten Beispielen von Löß-Schichten liegt der durch Luft-Okklusion beeinflusste pF-Bereich etwa zwischen 2,5 und 2,9, also zwischen Äquivalent-Porengrößen von ca. 10 bis ca. 4 μ Durchmesser. An folgendem Rechen-Beispiel, bei dem zwei in Einbeck aufgetretene Extrem-Situa-

tionen verglichen werden, soll der Effekt der Luft-Okklusion erläutert werden. Dieser Rechnung liegen die im Desorptions-Gang ermittelten pF-Kurven sowie die Saugspanns- und Wassergehalts-Messungen im Gelände zugrunde.

	Extrem 1	Extrem 2
Der Löß sei ausgehend vom absolut trockenen Zustand mit Wasser aufgefüllt bis herunter auf pF	2,9	2,9
In diesem Zustand beträgt der Volumen-Anteil der wassergefüllten Poren am Gesamt-Volumen	24 %	24 %
Bei weiterer Aufsättigung mit Wasser bleibt folgender Poren-Anteil mit Luft gefüllt:		
pF	2,9-2,7	2,9-2,45
n Ø	4 - 6 µ	4 - 11 µ
Der diesem pF-Intervall entsprechende Anteil an Poren beträgt in Bezug auf das Gesamt-Volumen	1 %	3 %
Bei fortschreitender Aufsättigung mit Wasser wird folgender Poren-Anteil wieder mit Wasser gefüllt		
pF	2,7-2,65	2,45-2,25
Die reale Saugspannung beträgt dann pF	2,65	2,25
Die rechnerisch aus dem tatsächlichen Wassergehalt errechnete "Äquivalent-Saugspannung" beträgt	2,84	2,71

Hinsichtlich der Wasser-Leitfähigkeit verhält sich ein mit Wasser bis pF 2,25 aufgesättigter, aber mit Luft-Einschlüssen versehener Löß ganz anders als ein kontinuierlich, d.h. ohne Luft-Einschluß mit Wasser bis pF 2,25 aufgesättigter Löß. Bei letzterem beteiligt sich ein wesentlich größerer Querschnitt-Anteil an der "Wasser-Leitung", während bei ersterem die eingeschlossenen und komprimierten Luft-Blasen bei hydrostatischer Druck-Entlastung infolge Ausdehnung die Wasserleitenden Querschnitts-Anteile des Poren-Volumens ventilartig verschließen können. In Sediment-Decken, bei denen ein derartiger Luft-Einschluß zu beobachten ist, ist es kaum möglich, aufgrund von Potential-Messungen und über Potential-UHL-(ungesättigte hydraulische Leitfähigkeits-)Beziehungen zu Voraussagen über die natürliche Wasser-Leitung oder zu Aussagen über die Abfluß-Raten zu gelangen.

4.2.2.3 ZONE D

Zone D stellt einen pedogenen Verdichtungs-Horizont innerhalb des Löß-Profiles dar. In dieser Zone ist offensichtlich der störende Einfluß der Luft-Okklusion in bestimmten Poren-Anteilen gering oder nicht vorhanden und die Äquivalent-Saugspannungen sind etwa gleich den realen Saugspannungen.

Die Differenz zwischen der Äquivalent- und Real-Saugspannung hängt in erster Linie von dem Volumen-Prozent-Anteil derjenigen Poren ab, in denen Luft-Okklusion stattfindet, oder - in anderen Worten - sie beruht auf der Steilheit der p_F -Kurve im Bereich der Hysterese.

In der Zone D ist der für einen Luft-Einschluß in Frage kommende Poren-Anteil mit ca. 1 % Poren zwischen p_F 2,4 und 2,8 so gering, daß ein tatsächlich erfolgreicher Luft-Einschluß kaum eine Veränderung der UHL-Eigenschaften gegenüber dem ohne Luft-Einschluß aufgesättigten Material verursachen würde.

4.2.2.4 Zusammenschau der ZONEN A bis F:

Abfluß-Behinderung durch Luft-Okklusion - zur Definition des "Wasserstaues" und des "Staukörpers" - .

Abgesehen vom unteren grundwassernahen Abschnitt des Profils Einbeck beobachten wir in Abb. 3 zwei Zonen, in denen ein "Stau" des abwärtsstrebenden Bodenwassers gegeben zu sein scheint:

1. Der Bereich der Entkalkungs-Grenze an der Unterseite der Zone A und
2. die Unterkante der Zone D.

Wenn man den Begriff "Wasserstau" definiert als eine "langfristige oder dauernde Behinderung des Ausgleiches einer bestehenden Gesamt-Potential-Differenz" durch einen Widerstand, so ist zu prüfen, ob eine solche Behinderung überhaupt vorliegt. Das Chronoisoplethen-Diagramm mit seinen unsicheren Äquivalent-Saugspannungsbereichen ist für solch eine Prüfung ungeeignet.

Wenn man die Diagramme der Abb. 4 nach den einzelnen Meß-Zeitpunkten aufschlüsselt und die bei der Mengen/Saugspannungs-Kalkulation ermittelten Poren-Bereiche in Rechnung stellt, dann ergibt sich tatsächlich der Befund eines anhaltenden Staues des Gravitations-Wassers in den genannten Zonen.

Die Ursachen dieses Staues müssen in der Einengung des wasserleitenden Querschnittes an der Untergrenze der verdichteten Zonen A und D gesehen werden. Dabei ist nicht die Verminderung der Dränporen-Anteile innerhalb der Verdichtungs-Zonen die entscheidende Ursache. Die hydraulische Leitfähigkeit der "Stau-Zonen" ist nur um einen relativ geringen Betrag kleiner als die der wenig veränderten Löss, so daß es in jedem Fall zu einem raschen Gesamt-Potential-Ausgleich kommen müßte. Die Stau-Ursache ist vielmehr in der Luft-Okklusion im Löß unterhalb der Verdichtungs-Bereiche in Zone A (bei 180 cm) und unterhalb der dichten Zone D zu suchen. Selbst größere Gefälle des gravimetrischen Potentials verleihen dem gestauten Wasser nicht die Fähigkeit, die unter den Verdichtungs-zonen intergranular eingeschlossene Bläschen-Luft so zu komprimieren, daß der Querschnitt der Wasserleitenden Menisken vergrößert wird und das Wasser in den Löß der Zone C und E rascher eindringen kann.

Entgegen der herkömmlichen Auffassung wird das Gravitations-Wasser in den Verdichtungs-Zonen nicht aufgrund des geringen Leitungs-Querschnittes der feinporigen dichten Zone gestaut, sondern aufgrund des geringen wasserleitenden Querschnittes der darunterliegenden grobporigen Lagen. Deren geringe Leitfähigkeit beruht auf der Porenluft, die sich kissenförmig unter den Verdichtungs-Zonen "gefangen" hat. Dieses Luftkissen besteht aus vielen Intergranular-Bläschen, die von Film- und Menisken-Wasser eingeschlossen und komprimiert sind. Sie wirken wie Gasblasen-Ventile, die auf die angrenzenden Kornoberflächen und Wasser-Menisken drücken. Bei steigendem hydraulischem Auflastungs-Druck werden die Bläschen zwar ringförmig zusammengedrückt, jedoch vergrößert sich dabei der

Wasserleitungs-Querschnitt zwischen den Bläschen nicht wesentlich. Die mögliche hydraulische Auflast ist dafür zu gering.

Dieses auf früheren Modellversuchen (vgl. MOSCHREFI, 21) basierende Konzept des Wasserstaus durch Luftkissen-Bildung oder durch luftgetragene Wasseremulsion-Fronten bietet im Gegensatz zum Konzept des Wasserstaus aufgrund von Dränporen-Einengung Erklärungs-Möglichkeiten für folgende bislang dubiose Phänomene: Im Bereich des Untereichsfeldes sind häufig stärker pseudovergleyte wärmzeitliche Lößdecken zu beobachten, die über äolischem oder fluvialem Buntsandstein-Verwitterungs-Sand liegen. Pseudovergleyung und "gute" Untergrund-Dränung stehen nun nicht mehr länger im Widerspruch, wenn man den zu Luft-Okklusionen neigenden Sand als "potentiellen Wasserstauer" richtig bewertet.

Zur Lage der Entkalkungs-Grenze:

Aufgrund der neugewonnenen Modell-Vorstellungen soll versucht werden, eine Antwort auf die im Absatz 4.2.2.1 gestellten Fragen zu geben, die sich mit der Tiefen-Lage der Entkalkungs-Grenze befassen.

Zu 1) Die Entkalkung hat im Löß dicht oberhalb der Entkalkungs-Grenze eine beachtliche Gefüge-Veränderung gegenüber dem noch kalkhaltigen Löß dicht unterhalb der Entkalkungs-Grenze hervorgerufen. Diese Änderung besteht a) in einer Verminderung der Drän-Poren mit $pF < 1,8$ und b) in einer Verminderung der Luft-Okklusions-Poren mit $pF 2,4$ bis $2,9$. - Die Verminderung bei a) scheint von geringer Bedeutung zu sein, während b) einen ausgeprägten hydrodynamischen Sprung hervorruft. Dieser wird durch den kissenförmigen Einschluß von Poren-Luft im kalkhaltigen Löß unterhalb der nicht oder kaum Luft okkludierenden Entkalkungs-Zone bewirkt. Es ist also nicht die "Verfeinerung" der Poren, sondern die Einengung bestimmter durch Hysterese bei der Wasser-Auf- und Abnahme gekennzeichnete Poren-Anteile im entkalkten Löß, welche die "Stau-Wirkung" induzieren.

Zu 2) Das Eindringen des Tritium-Tracer-Maximums in den kalkhaltigen Löß läßt vermuten, daß die Entkalkungs-Grenze nicht stationär ist, sondern weiter abgesenkt wird. Ein primärer Gefüge-Sprung hat an der gegenwärtigen Entkalkungs-Grenze, die innerhalb eines bestimmten Schichtpaketes unabhängig von der Sediment-Schichtung unduliert, nicht vorgelegen. Der ausgeprägte hydrodynamische "Stau" an der Entkalkungs-Grenze ist damit ein sekundäres Phänomen, das erst durch die Entkalkung hervorgerufen worden ist und sich voraussichtlich mit der Tieferschaltung der $CaCO_3$ -Grenze weiter verlagert. Das In-Erscheinung-Treten einer "Stauwirkung" ist jedoch - wie im folgenden zu zeigen sein wird - von der Höhenlage der Sprung-

Schicht über der GS abhängig. Diese bestimmt nämlich den Oszillations-Bereich der pF-Werte innerhalb der Sprungschicht und legt fest, ob diese in den Bereich möglicher Luft-Okklusionen fallen oder nicht.

Northeim -Abb. 4b, 4c, 5a, 5b -

Am Beispiel der Profile von Northeim läßt sich der Einfluß eines höher liegenden Grundwasser-Spiegels auf die Hydrodynamik in den Löß-Decken gut demonstrieren, wenn man sie mit Einbeck zusammen in eine Reihe mit steigendem Grundwasser-Spiegel einordnet. Dies ist in Abb. 4 geschehen.

Abweichungen der beiden Northeimer Profile vom Profil Einbeck bestehen 1.) in der besseren Ausgeglichenheit der Poren-Verteilung im vertikalen Schicht-Aufbau (die in den Löß eingeschalteten pedogenen Zonen stören kaum), 2.) in dem hohen Dränporen-Anteil der Zone A, der ein rascheres und tieferes Eindringen der Niederschläge und damit eine etwas geringere Feuchte-Differenzierung im oberen Abschnitt bewirkt, und 3.) in der geringeren Tiefen-Lage der GS - die hier als modifizierende Größe betrachtet werden soll.

Übereinstimmungen bestehen 1.) in der morphologischen Horizontierung der Zone A, dem Bodenprofil, 2.) in der Entkalkungs-Tiefe und 3.) in dem Poren-Verteilungs-Sprung an der Entkalkungs-Grenze (Zone B), wobei besonders wieder auf den Poren-Bereich pF 2,4 - 2,8 zu achten ist.

4.2.2.5 NORTHEIM (II): Luft-Okklusion bei 8 - 12 m Grundwasser-Tiefe

In dieser Löß-Decke kann die GS im Jahres-Lauf auf den gleichen Minimal-Stand (12 m) wie in Einbeck absinken. Andererseits kann sie 2,5 m höher als der Maximal-Wert von Einbeck steigen (8 m). Für den Bereich um die Entkalkungs-Grenze bedeutet das: Ansteigen der pF-Werte auf 2,77 bei absinkendem Grundwasser-Spiegel und damit Belüftung des zur Luft-Okklusion befähigten Poren-Anteiles. Die Folge davon ist,

Abb. 5a: Profil Northeim (Areal II)

5b: Profil Northeim (Areal III)

Poren-Verteilungsdiagramm, Niederschlags-Verteilungs-Diagramm und Äquivalent-Saugspannungs-Chronoisoplethen-Diagramm.

Legende:

Zone A: A_1 (60 cm); B_t (100-120 cm); B_v (0-20 cm)

Zone B: Undulations-Bereich der Entkalkungs-Grenze
(180-200 cm bzw. 180-220 cm)

Zonen C u. E: Löß

Zone D: fossile dichtere Boden-Zone

Zone F: mäßig verdichteter Löß

Niederschlagsverteilung in Northeim

1966
(779mm)

1967

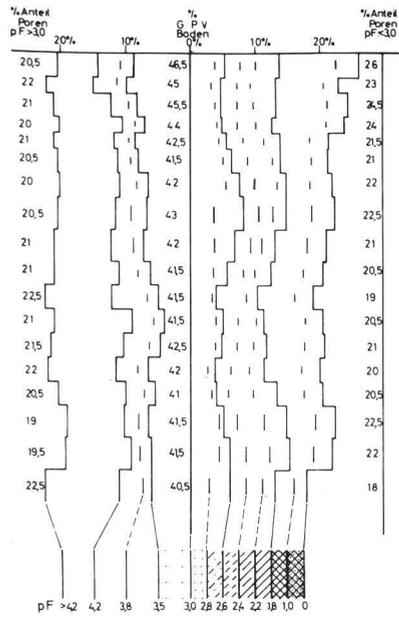


Abb. 5a

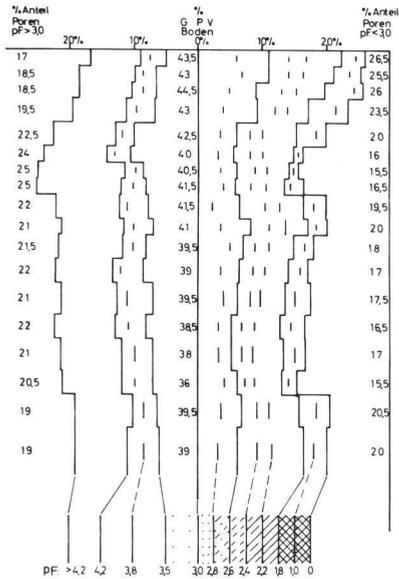
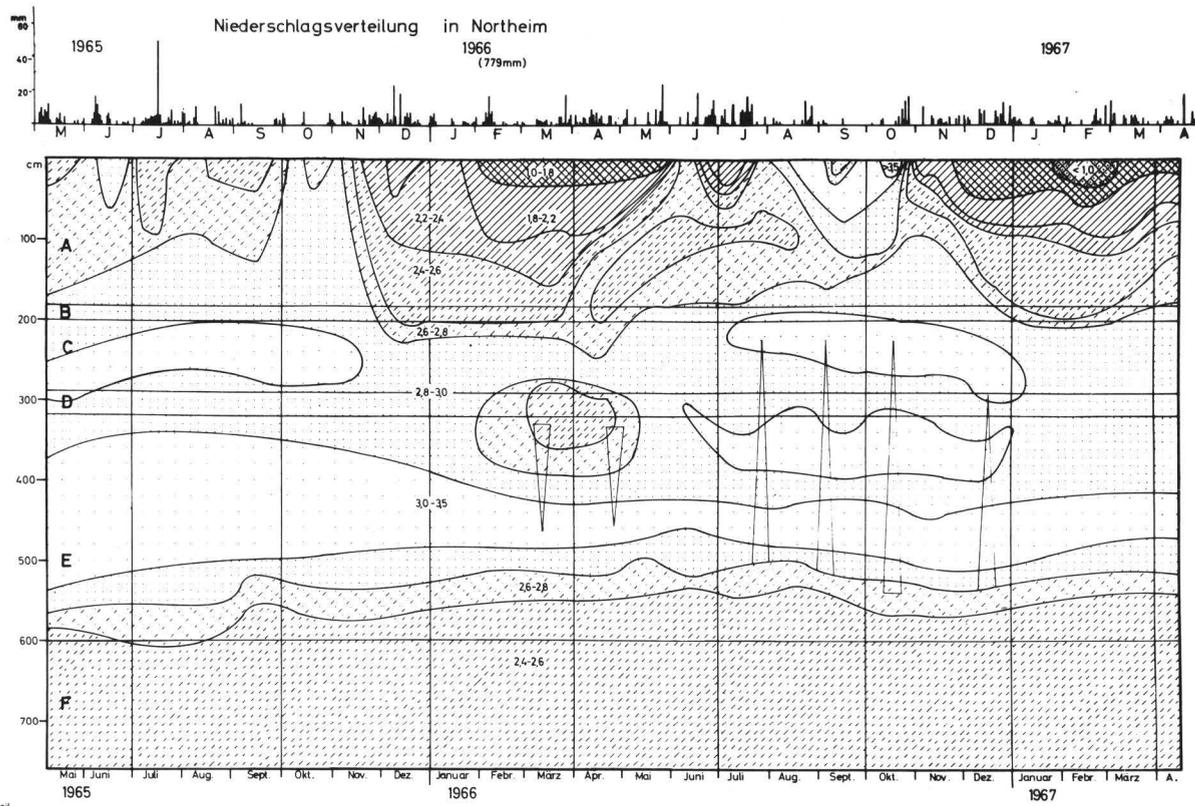
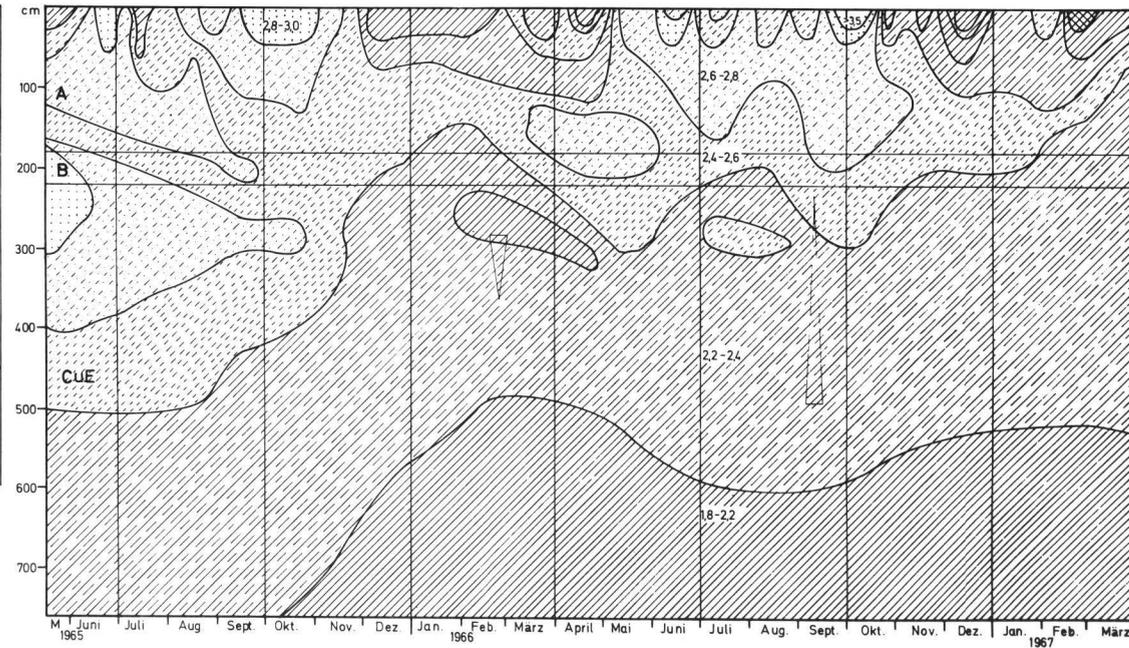


Abb. 5b



daß es hier - wie in Einbeck - bei der Wiederbefeuchtung von oben her zur Luft-Okklusion kommt und daß sich die Umverteilung der Poren an der Entkalkungs-Grenze in einer ausgeprägten hydrodynamischen Störung (Stau durch Luft-Kissen) zu erkennen gibt. Wie Abb.4b zeigt, ist diese allerdings gegenüber Einbeck schon etwas abgeschwächt, und Abb. 5a zeigt, daß die Phasen, in denen sich solch eine Luft-Okklusions-Stauf front aufbaut, wesentlich kürzer als in Einbeck sind. Letzteres kann allerdings auch ein Effekt der etwas geringeren Entkalkungs-Tiefe oder des größeren Dränporen-Anteiles in der Zone A sein.

4.2.2.6 NORTHEIM (III): Fehlende Luft-Okklusion bei
5,5 - 6,5 m Grundwasser-Tiefe

In diesem Teil der Löß-Decke schwankt die Grundwasser-Spiegeltiefe um 6 m u.O., d.h. um 4 m unterhalb der Gefüge-Sprungschicht an der Entkalkungs-Grenze. Nur in der 2. Hälfte des Jahres 1965 mit dem vorausgegangenen trockenen Winter 1964/65 sinkt die GS auf 8 m ab. Im Potential-Diagramm dieses Profils (Abb. 4c) zeigt sich folgendes: Die Gesamtpotentiale Ψ liegen — im Gegensatz zu den beiden anderen Profilen — stets links von den entsprechenden Ψ_0 -Linien. Das gilt auch für die durch einen Kreis gekennzeichneten Werte, die auf den 8 m-Grundwasser-Stand bezogen sind.

Dies bedeutet: Bei einer GS von ca. 4 m unterhalb der CaCO_3 -Grenze (Zone B) wird das Löß-Material an der Kalk-Grenze nicht mehr über pF 2,6 hinaus entwässert. Das heißt, ein erheblicher Anteil - wenn nicht der gesamte Anteil - der für die Sorptions-Desorptions-Hysterese und für den Luft-Einschluß in Frage kommenden Poren wird gar nicht entwässert und mit Luft gefüllt. Infolgedessen können sich auch keine Stau-Fronten mehr ausbilden.

Die in Abb. 5b dargestellten Äquivalent-Saugspannungen erreichen hier - soweit sich dies tensiometrisch kontrollieren läßt - die gleichen Werte wie die realen Saugspannungen.

Das Chronoisoplethen-Diagramm in Abb. 5b läßt bereits eine klare Saugspannungs-Zonierung des Profils erkennen, die den kapillaren Steighöhen über dem Grundwasser-Spiegel entspricht. Sie wird nur relativ geringfügig durch den Wechsel von Wasser-Zufuhr und -Entzug gestört, der von der Oberfläche her die Zonen-Grenzen verschiebt und zwar mit einer von oben nach unten abnehmenden Intensität.

Wir können anhand dieses Beispiels die in den Abschnitten 4.2.2.1 und 4.2.2.4 begonnene Diskussion um die Tiefen-Lage, die Ausprägung und die Bildungs-Ursachen der Entkalkungs-Grenze um eine weitere Erkenntnis bereichern: Offensichtlich spielt es für die Tiefen-Lage der Entkalkungs-Grenze - die in allen drei Profilen bei ca. 2 Metern liegt - keine Rolle, ob der Grundwasser-Stand bei 6, 8, 10 oder 12 m liegt, d.h. ob die Gleichgewichts-Saugspannungen in 2 m Tiefe p_f 2,6; 2,8; 2,9 oder 3,0 betragen. Bewerten wir die CaCO_3 -Grenze als ein Maß für die Intensität des "downward displacement" des Boden-Wassers durch das eindringende Niederschlags-Wasser, so muß in allen 3 Fällen die jährliche Menge des nach unten abfließenden Wassers gleich groß sein. Diese Überlegung steht in scheinbarem Gegensatz zu dem Befund, daß in den ersten beiden Profilen "Stau"-Zonen vorhanden sind, d.h. der Abfluß gehemmt erscheint, während im dritten Profil ein ungehemmter Potential-Ausgleich stattzufinden scheint. Der Widerspruch löst sich, wenn man die Luft-Okklusions-Stauzonen B in Abb. 4a und 4b mit einem Wehr in einem Bachlauf vergleicht: Vor diesem staut sich das Wasser, bis es einen Druck (Potential-Gefälle) erreicht, der das Wasser mit einer Ausfluß-Rate durch den Durchlaß treten läßt, die der Zufluß-Rate gleich ist. Die durch das in den Bachlauf gesetzte Wehr bedingte zeitliche Verzögerung des Abflusses ist lediglich gleich der Kapazität des Stauraumes, dividiert durch die Abfluß-Rate. In unserem Fall beträgt die Kapazität des Stauraumes etwa 15 mm. Beim ersten Eindringen der winterlichen Niederschläge kann dadurch bei Zugrundelegung der durchschnittlichen Niederschlags-Verteilung eine Abfluß-Verzögerung von maximal 14 Tagen hervorgerufen werden - was im Hinblick auf den Jahres-Abfluß bedeutungslos ist. Da dieser Stau ferner in einer verdunstungsfernen Zone erfolgt, ist auch nicht mit einer Erhöhung der Verluste durch Wasser-Aufstieg zu rechnen. Der "Stau" bewirkt also eine Verzögerung, nicht aber eine Verringerung der Abfluß-Raten und -Mengen.

Hatten wir bisher lediglich aufgrund des morphologischen Befundes gefolgert, daß die Entkalkung die Ursache für den Gefüge-Sprung und dieser die Ursache für die hydrodynamische Unstetigkeit sei, so wird dieses nun auch durch die hydrodynamischen Verhältnisse in Northeim (III) bestätigt. Hier haben wir die Entkalkungs-Front in gleicher Ausprägung mit dem gleichen Gefügesprung, aber ohne hydrodynamische Stau-Wirkung. Das heißt, daß die hydrodynamische Störung nicht Ursache, sondern nur Folge, und zwar GS-abhängige Folge,

einer primären Entkalkung und sekundären Gefüge-Störung sein kann.

Im folgenden Abschnitt sollen die Abfluß-Mengen dieser mächtigen Löß-Decken, die aufgrund der theoretischen Betrachtung als gleich groß anzusehen sind, näher untersucht werden.

4.2.3 Wasserhaushalts-Bilanz EINBECK aufgrund von TOH-Messungen

Auf den Seiten 108/109 ist über die Methode der TOH-Markierung und über die Voraussetzungen für eine Auswertung der Meß-Ergebnisse berichtet worden. Auf den Seiten 124/125 wurde als ein erstes Ergebnis der Verfolgung der kapillaren Abwärts-Verdrängung herausgestellt: Das TM (Tracer-Maximum) passiert unbehindert die in den Chronoisoplethen-Diagrammen hervortretende Feuchtigkeits-Sprung-Schicht (Entkalkungs-Grenze) bei 200 cm Tiefe. Damit wird deutlich, daß die in den Feuchte- bzw. Saugspannungs-Diagrammen sichtbare Unstetigkeits-Schicht wohl in hydrostatischer, nicht aber in hydrodynamischer Hinsicht eine Sprung-Grenze darstellt. Es wurde ferner auf die Auf- und Abwärts-Bewegungen des TM in Abhängigkeit von jahreszeitlicher Witterung und erreichter Tiefen-Lage des TM hingewiesen, was für die nachfolgenden Bilanz-Betrachtungen von Bedeutung ist.

BILANZ-ZEITRAUM: Tabelle 4 bringt eine kleine Auswahl aus der Fülle der Meß-Daten. Sie ist ausreichend, um die Größen der Wasserhaushalts-Gleichung und Wasserhaushalts-Bilanz (N, S, A und V) in ihrer jahreszeitlichen Veränderung zu verfolgen. Als Bilanz-, d.h. Summierungs-Zeitraum ist das Sommer-Halbjahr (1.4. - 31.9.) und das Winter-Halbjahr (1.10. - 31.3.) gewählt worden. Weil diese Bilanz-Zeiträume aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit gleich lang gewählt werden mußten, decken sie sich nur in unvollkommener, für unsere Bilanz-Betrachtung jedoch ausreichender Weise mit den durch die "Wendepunkte" gegebenen natürlichen Jahreszeit-Abschnitten auf der langjährigen atmosphärischen Sättigungs-Defizit-Kurve unseres Klima-Raumes.

Die tabellarische Summierung der Meß-Werte geht - wie das bei BLUME et al. (6) in einer theoretischen Betrachtung gefordert wird - davon aus, daß alle Wasser-Bewegungen in Form

der gleichmäßigen und ohne "Überholungen" erfolgenden frontalen kapillaren Auf- und Abwärts-Verdrängung ablaufen. Nichterfüllung dieser Bedingungen führt zu Fehl-Berechnungen bei den Größen "Versickerung" (A) und "Verdunstung" (V) (vgl. S. 111). In unserem Falle werden diese Fehler-Möglichkeiten umso geringer, je gleichmäßiger, grobporenärmer und durchwurzelungsschwächer das Substrat wird. Das ist mit zunehmender Tiefe der Fall. Die angegebenen V- und A-Werte gewinnen daher in dem Maße an Verlässlichkeit wie das TM absinkt. Wir schätzen aufgrund der an anderen Stellen mit anderen Methoden gleichzeitig gemessenen Verdunstungs-Raten, daß bei den bis zum Frühjahr 1967 angegebenen Grundwasser-Spenden Fehl-Bestimmungen der Versickerungs-Raten A in der Größen-Ordnung von $\pm 10\%$ einzukalkulieren sind.

BILANZ-TIEFE: Unterhalb der hydrostatisch so markanten 200 cm-Grenze treffen wir keine für eine Bilanzierung allzusehr ins Gewicht fallenden jahreszeitlichen Schwankungen des Boden-Wassergehaltes mehr an. Daher können wir unsere Bilanz-Berechnungen auf die 2 m starke entkalkte Boden-Decke beziehen. Derjenige absteigende Wasser-Verschiebungs-Betrag, der diese Grenze (die heutige Entkalkungs-Grenze) passiert, kann als Grundwasser-Spende gewertet werden.

METHODISCHE ANMERKUNGEN ZUR SEITLICHEN WASSERBEWEGUNG: Wie auf Seite 109 ausgeführt, wurde die TOH-Probenahme nicht nur vertikal unterhalb der Injektions-Rinne, sondern auch in verschiedenen Abständen seitlich davon vorgenommen. Nachdem das TM im Verlauf von ca. 2 Jahren eine Tiefe von 240 cm erreicht hatte, war TOH beidseitig bis zu einem maximalen Abstand von 60 cm von der Markierungs-Rinne nachweisbar. Unabhängig von der seitlichen Ausbreitung lag das TM zu jedem Meß-Zeitpunkt stets in einer horizontalen Ebene und die spezifische Aktivität klang symmetrisch nach beiden Seiten hin ab. Dies läßt den Schluß zu, daß keine seitliche Wasser-Bewegung aufgetreten ist, sondern die seitliche Ausbreitung des TOH ausschließlich auf Diffusion beruht. Die Breite des horizontalen Diffusions-Saumes entspricht etwa der, die wir in voraufgegangenen Modell-Experimenten (Bericht an anderer Stelle, im Druck) an Löß-Säulen als Diffusions-Saum-Breite für den gleichen Zeitraum ermittelt haben.

BILANZ-WERTE: Zur Auswertung von Tab. 4 greifen wir auf die Witterungs-Tabelle 3, S. 115, und das Chronoisoplethen-Diagramm Einbeck, Abb. 3, S. 119, zurück. Die Bilanz-Tabelle 4 umfaßt je 3 aufeinanderfolgende Winter- und Sommer-Halbjahre. In ihrer Niederschlags-Menge sind die 3 Sommer-Halbjahre als annähernd normal (400 mm) zu bezeichnen, während die Winter-

Halbjahre mit 140 bis 200 % der üblichen Niederschlagsmenge (207 mm) durchweg zu naß sind. Wenn wir feststellen, daß ca. 38 % der im Bilanz-Zeitraum gefallenen Niederschläge aus unserer Parabraunerde versickert sind, so ist das eine Folge der zu hohen Winterniederschläge und gewiß zu hoch, um diesen Wert als Durchschnitts-Wert anzusetzen.

Wie PAPP (26) bereits als typisch für unseren Klima-Raum herausgestellt hat, haben auch in unserem Bilanz-Zeitraum am Ende eines jeden Winter-Halbjahres die Löß-Parabraunerden einen Wasser-Sättigungs-Zustand erreicht, der unter Feld-Bedingungen als maximal zu bezeichnen ist. Bei mittleren Saugspannungen zwischen pF 2 und 2,4 enthält die 2 m starke Parabraunerde-Decke ca. 700 mm Wasser gespeichert, das zu einem erheblichen Teil "gestautes Gravitations-Wasser" ist. Auch niedrigere, d.h. normale Winter-Niederschläge von 200-250 mm hätten ausgereicht, um das im Sommer erzeugte Speicher-Defizit auszugleichen und die Parabraunerden mit "Feldkapazität-Sättigung" in das Sommer-Halbjahr eintreten zu lassen.

In den 3 Sommer-Halbjahren ist trotz annähernder Gleichheit und normaler Höhe der Niederschlags-Mengen die Niederschlags-Verteilung so ungleichmäßig, daß die Interceptions-Evapotranspirations-Verluste (V) stark variieren: 377 mm - 409 mm - 502 mm. PAPP (26) gibt für Grasland auf Löß-Parabraunerde einen jährlichen Mindest-Betrag für V von 460 - 500 mm an. Zieht man davon die winterliche Verdunstung in Höhe von ca. 50 mm ab, so verbleiben im Schnitt ca. 410 bis 450 mm für das Sommer-Halbjahr. Das bedeutet, daß im Sommer-Halbjahr durchschnittlich mindestens die gesamte Menge der fallenden Niederschläge, meistens aber darüber hinaus auch noch ein Teil des Bodenwasser-Vorrates verdunsten. In unserer Bilanz-Periode kehrten beim Grasland auf Löß-Parabraunerde mit tiefem Grundwasser-Spiegel von den Sommer-Niederschlägen 95, 90 und 117 % in die Atmosphäre zurück.

Das bedeutet: Die Sommer-Niederschläge sind unter Normal-Bedingungen nur in sehr geringem Maße oder überhaupt nicht an

Tab. 4:
Daten zur Bilanz
des Wasser-Haus-
haltes von Profil
Einbeck aufgrund
von HTO-Messun-
gen.

		N					S		A		V
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		NIEDERSCHLAG (mm)	Tiefe des HTO-MAXIMUMS unter O. (cm)	DIFFE- RENZ	mm H ₂ O oberhalb HTO-MAXIMUM	DIFFE- RENZ	mm H ₂ O oberhalb 200 cm Tiefe	DIFFE- RENZ (VORRAT- ÄNDERUNG)	mm H ₂ O zw. HTO-MAX. u. 200 cm Tiefe	DIF- F. (WASSER- ABFLUSS-/GRENZE 200 cm	VERDUNSTUNG (Sp. 1 - Sp. 5)
NASS 65/66	24. II. 66	13	20	+ 6	84	3	702	- 26	618	- 29	10
	4. III. 66	66	26	+ 7	87	24	676	- 1	589	- 25	42
NASS / TROCKEN NORMAL SOMMER-HALBJAHR 66	1. IV. 66	84	33	+ 14	111	42	675	- 15	564	- 57	42
	2. V. 66	66	47	- 5	153	- 61	660	- 106	507	- 45	127
	13. VI. 66	188	42	+ 21	92	122	554	+ 101	462	- 21	66
	25. VII. 66	60	63	- 6	214	- 82	655	- 110	441	- 28	142
	3. X. 66		57		132		545		413		
	aus dem Niederschlag.. aus dem Boden-Vorrat.. (0 - 200 cm)		398						- 130		+ 21 130 151
NORMAL/NASS WINTER-HALBJAHR 66/67	9. XI. 66	62	64	+ 7	194	62	564	+ 19	370	- 43	0
	7. XII. 66	44	74	+ 10	238	44	608	+ 44	370	0	0
	31. I. 67	146	112	+ 38	382	144	683	+ 75	301	- 69	2
	23. II. 67	41	123	+ 11	423	41	707	+ 24	284	- 17	0
	21. III. 67	85	140	+ 17	483	60	705	- 2	222	- 62	25
	21. III. 67	32	140	+ 1	483	3	705	- 4	222	- 7	29
aus dem Niederschlag.. in den Boden-Vorrat...		410						+ 156		198	56
NORMAL/NASS SOMMER-HALBJ. 67	12. IV. 67	61	141	+ 2	486	- 30	701	- 45	215	- 15	91
	17. V. 67	162	143	+ 12	456	49	656	+ 16	200	- 33	113
	26. VI. 67	232	155	+ 5	505	27	672	- 36	167	- 63	205
	7. X. 67		160		532		636		104		
aus dem Niederschlag.. aus dem Boden-Vorrat..		455					- 65		+ 46 65 111	409	
NASS WI-HA 67/68	15. III. 68	280	240	+ 80	797	265	693	- 57	104	208	15
	aus dem Niederschlag.. in den Boden-Vorrat...		280					+ 57		208	15
NORMAL SO-HA 68	29. X. 68	430	240	+ 0	725	- 72	621	- 72	104	0	502
	aus dem Niederschlag.. aus dem Boden-Vorrat..		430					- 72			+ 430 72 502

der Abwärts-Verdrängung des in der Bodendecke während des Winters aufgestauten Wassers beteiligt. Im Gegenteil: Es werden Bodenwasser-Vorräte durch überschüssige Evapotranspiration aufgezehrt.

Dennoch kann es das ganze Sommer-Halbjahr hindurch zu einer ständig fließenden Grundwasser-Spende kommen. Das wird bei der Betrachtung des verdunstungsschwachen Sommer-Halbjahres 1966 deutlich: Der im Winter innerhalb der 2 m-Boden-Decke durch Stau aufgespeicherte Gravitationswasser-Vorrat wird in diesem Sommer nicht durch Verdunstung angegriffen. Stattdessen fließen 130 mm von den gespeicherten 700 mm aufgrund des Eigendruckes über die 200 cm-Grenze zum Grundwasser ab. Dabei erniedrigen sich die monatlichen Abfluß-Raten wie folgt: 60 mm - 40 mm - 14 mm - 14 mm - 13 mm - 10 mm. - Auch in dem verdunstungsstärkeren Sommer-Halbjahr 1967 kommt es noch zu einem kontinuierlichen Abfluß - obwohl die Sickerwasser-Mengen trotz stärkerer Beteiligung der Sommer-Niederschläge nur 50 % des Vorjahres erreichen. Dieser Umstand mag mit der andersartigen Druck-Verteilung des Wassers im Profil am Ende des vorausgegangenen Winter-Halbjahres zusammenhängen. Die gesamte Speicher-Menge war dieselbe.

Im Sommer 1968 ist dann jedoch bei einigermaßen normaler Niederschlags-Menge und -Verteilung die Evapotranspiration so stark, daß kein Winterwasser-Überschuß zum Grundwasser abfließen kann.

Sehen wir uns die Winter-Halbjahre unter dem Aspekt der Grundwasser-Spende an: Die absoluten Differenzen der Evaporations-Werte sind geringer als im Sommer, was das Rechnen mit Mittelwerten erleichtert. Ein Mittelwert von 60 mm für V dürfte nach den langjährigen Angaben der winterlichen atmosphärischen Sättigungs-Defizite ein für Bilanz-Berechnungen befriedigender Durchschnitts-Wert sein. Die winterlichen Grundwasser-Spenden berechnen sich damit aus den Niederschlags-Mengen des Winter-Halbjahres minus 60 mm minus Betrag für die Auffüllung des sommerlichen Speicher-Fehlbetrages.

VERALLGEMEINERUNGEN: Es scheint außerordentlich gewagt, aufgrund einer nur 3-jährigen Beobachtungs-Dauer langfristig gültige Schluß-Folgerungen zu ziehen und pedohydrologische Prognosen für stärker von der Norm abweichende Witterungsverhältnisse zu geben. Dennoch lassen sich einige Überlegungen allgemeiner Art anstellen, was sich wie folgt begründen läßt: Aus der soeben gemachten Aussage über die Hydro-Bilanz des Winter-Halbjahres wird deutlich, daß die Auffüllung des sommerlichen Speicherwasser-Defizits die entscheidende Rolle spielt. Für die Größe dieses Defizits und seine Aufschlüsselung auf A und V ist die Höhe des sommerlichen Evapotranspirations-Interceptions-Verlustes im Verhältnis zu den sommerlichen Niederschlägen entscheidend. Somit gewinnt die Messung der Bilanz-Größe V des Sommer-Halbjahres eine zentrale Bedeutung für die Kalkulation der Gesamt-Sickerwasser-Spende.

Tab. 4 zeigt, daß die Halbjahres-Summe von Sommern mit normaler Niederschlags-Menge 510 - 530 mm beträgt.

Nimmt man einmal an, daß bei einer normalen Niederschlags-Menge von 400 mm im Sommer-Halbjahr vom Grasland auf Löß-Parabraunerde mit tiefem Grundwasser-Spiegel bei normaler Niederschlags-Verteilung 460 mm Wasser von der Vegetations- und Boden-Decke in die Atmosphäre übergehen, so würde sich v) etwa folgendes Durchschnitts-Bilanz-Schema aufstellen lassen:

	N (Niederschlag)	V (Verdunstung)	A (Versickerung)	S (Vorrats-Entnahme)
Winter	+ 250	- 60	- 80	- 110
Sommer	+ 400	- 450	- 60	+ 110
Jahr	+ 650 100 %	- 510 79 %	- 140 21 %	+ 0

Die große Unbekannte in diesem für Südniedersachsens Löß-Fluren gültigen Schema ist V (Sommer). Es besteht keine Korrelation zwischen diesem Wert und der sommerlichen Niederschlags-Höhe. Zum Teil hängt V von der Niederschlags-Vertei-

v) für Grasland auf Löß

lung, viel stärker aber von der Sättigungs-Defizit-Verteilung in den Sommer-Monaten und der Feuchte-Verteilung im Boden-Profil zum Ende des Winters ab. Nach den von PAPP (26) vorgelegten Daten extremer Witterungs-Jahre und unseren eigenen Messungen könnte V (Sommer) bei 400 mm Niederschlag zwischen 370 und 530 mm schwanken. Das würde bei A ein Minimum von 12 % und ein Maximum von 34 % der jährlichen Niederschlags-Menge bedeuten.

Der Wert für die durchschnittliche sommerliche Verdunstung von 450 mm scheint den von uns an anderer Stelle durchgeführten Verdunstungs-Messungen zufolge ein brauchbarer Mittelwert zu sein.

Die für S angegebenen Werte sind verlässlicher. Wir haben selbst in Extremjahren nur mit einer maximalen Beanspruchung von + 130 mm zu rechnen. Das bedeutet, daß sich im Schnitt nur insgesamt 7 % des Substanz-Volumens der 2 m-Boden-Decke, d.h. ca. $\frac{1}{6}$ des Poren-Volumens, an der Vorrats-Änderung beteiligen.

Als wichtiges Ergebnis für unseren Klima-Raum verdient hervorgehoben zu werden: Die TOH-Bilanzen zeigen, daß die jährliche Sickerwasser-Quote (Grundwasser-Spende) bei Gras auf mächtigen Löß-Decken mit tiefliegendem Grundwasser-Spiegel mindestens 20 % des jährlichen Niederschlags-Durchschnitts beträgt. Das ist etwa doppelt so viel wie PAPP (26) aufgrund seiner damaligen mit unvollkommenen Mitteln errechneten Bilanzen angegeben hatte. Er hatte allerdings darauf hingewiesen, daß er die Größe des durch unsaturated flow abgeführten Wassers nicht schätzen konnte. Diesem Mangel konnte nunmehr durch die Anwendung der TOH-Bilanzierungs-Methode abgeholfen werden.

Im Hinblick auf den Landschafts-Wasserhaushalt sollte berücksichtigt werden, daß die vorstehenden Daten für Grasland gelten. Bei Getreide-Kulturen können die sommerlichen Verdunstungs-Beträge bis zu 60 mm geringer sein. Das bedeutet eine mögliche Erhöhung der Grundwasser-Spende unter Ackerland von 21 auf 30 % des Jahres-Niederschlags.

MODELL: Die Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes gestatten in Verbindung mit den unter 4.2.2.1 (S.124) ange-stellten Betrachtungen, den durchschnittlichen Jahres-Wasser-Haushalt des Profils Einbeck (Gras-Decke, Parabraunerde mit 2 m tiefer Entkalkungs-Grenze aus Löß mit > 5 m GS) in erster Annäherung durch folgendes Modell zu veranschaulichen:

Man stelle sich eine oben offene zylindrische Zisterne mit ebenem Boden vor. In ihrem Boden setzt ein 3 bis 10 m langes, senkrecht und sehr enges Abfluß-Rohr an. Durch dieses kann das in der Zisterne angesammelte Wasser langsam zu einem tiefer liegenden Wasser-Spiegel hin abströmen. Der Leitungs-Widerstand des Abfluß-Rohres ist so bemessen:

In der Zisterne muß das gesammelte Wasser ca. 700 mm hoch stehen, wenn die monatlich hinzukommende Niederschlagsmenge von 50 mm gleich der monatlichen Abfluß-Menge (50 mm) sein soll.

Zustand I: Spätestens zum Ende des Winter-Halbjahres ist dieser Gleichgewichts-Zustand in unserer Löß-Decke regel-mäßig erreicht. Der "Zisternen-Boden" wird von dem bei 2 m Tiefe (Entkalkungs-Grenze) beginnenden Okklusions-Luftkissen gebildet, das den Löß - unser "Abfluß-Rohr" zum Grundwasser-Spiegel - erfüllt und dessen kapillaren Leit-Widerstand an-nähernd konstant hält. Am Ende des Winter-Halbjahres ist unsere "Zisterne", das 2 m tiefe Solum, mit 700 mm Nieder-schlags-Wasser gefüllt (Feld-Kapazität, natürliches Speicher-Maximum, Ausgangs-Sättigung am Beginn des Sommer-Halbjahres). Die in diesem Zustand von oben hinzukommenden täglichen wöchentlichen oder monatlichen Niederschlags-Raten (30 - 40 mm/Monat) abzüglich der sehr geringen Verdunstungs-Raten (10 mm/Monat) sind gleich den täglichen, wöchentlichen oder monatlichen Abfluß-Raten zum Grundwasser (25 - 30 mm/Monat). Meist wird dieser Zustand schon im Januar erreicht, so daß er über 3 Monate hin anhalten kann. Abweichend von unserem Zisternen-Modell - das muß hier einschränkend betont werden - beträgt im Solum zwar die H₂O-Speichermenge 700 mm, nicht aber der wirksame Kapillar-Druck: Z-M kann entsprechend der

Tiefe des Solums Werte bis 200 cm H₂O-Säule erreichen (vgl. Abb. 4). Das Erreichen des Gleichgewichts-Zustandes (I) hängt von der Größe des sommerlichen Verdunstungs-Defizits ab, das im Winter aufgefüllt werden muß. Im Durchschnitt der Jahre müßte bei einer sommerlichen Vorrats-Bearbeitung von 110 bis 130 mm die Auffüllung auf die Gleichgewichts-Speichermenge von 700 mm Ende Dezember abgeschlossen sein.

Zustand II: Während des Sommer-Halbjahres kehrt im Normalfall die Gesamtmenge der in die Zisterne fallenden Niederschläge (400 mm) in die Atmosphäre zurück. Durch zusätzliche Verdunstung wird darüber hinaus die Spiegel-Höhe um 50 mm abgesenkt. Die Verdunstung und der den Sommer über anhaltende Abfluß durch das Fallrohr (60 mm) führen dazu, daß bis zum Ende des Sommer-Halbjahres der Wasserspiegel in der Zisterne von 700 mm um 110 mm auf 590 mm abgesenkt wird. (In extrem trockenen Sommern wie 1959 kann die Absenkung bis auf eine Speichermenge von 360 mm erfolgen.) Dadurch sinkt natürlich das gravimetrische Potential des Systems, und die monatlichen Abfluß-Raten vermindern sich von ca. 30 mm am Ende des Winters auf weniger als 10 mm am Ende des Sommers.

In diesem Punkt wird der eine Mangel unseres Modells als Hilfsmittel der Veranschaulichung des Bodenwasser-Haushaltes deutlich: Statt 700 mm Wasser-Höhe in der Zisterne enthält die 2 m mächtige Bodendecke 700 mm H₂O in Form eines unregelmäßig verzweigten Kapillar-Netzes. Eine Abnahme dieser Vorräte führt zu relativ stärkeren Druck-Minderungen als im offenen Wasser-Behälter. Außerdem wird durch Wasser-Verlust der leitende Kapillar-Querschnitt eingeengt, so daß der spezifische Wasserleit-Widerstand steigt.

Insgesamt besitzt das 2 m-Solum eine Aufnahme-Fähigkeit für Wasser von 840 mm (42 Vol.%). Im Zustand der Feldkapazität sind 700 mm enthalten (36 Vol.%, pF ca. 2,3). Bei normaler sommerlicher Erschöpfung geht der Wasser-Gehalt auf 590 mm zurück (31 Vol.%, pF ca. 2,8).

Diese summarische Aussage macht den anderen Mangel unseres Modells deutlich: Wir haben so getan, als ob die Verteilung der Wasser-Gehalte und Saugspannungen innerhalb unseres 2 m-Solums homogen sei. In Wirklichkeit ist das Bild der Bodenwasser-Haushalts-Bilanz viel komplizierter. Das beruht auf dem ständigen witterungsbedingten Wechsel in der Ausbildung der hydraulischen Potential-Gradienten und Wasser-Fronten innerhalb des Solums. Diese modifizieren die Bilanz-Größen "Evapotranspiration" und "Versickerung" in erheblichem Maße. Wenn auch das Solum aufgrund seiner Speicher- und Stau-Fähigkeit für das Niederschlags-Wasser einen gewissen "puffernden" - d.h. die Witterungs-Schwankungen ausgleichenden - Einfluß auf die Hydro-Bilanz hat, so läßt sich doch eine gründliche Bilanz-Betrachtung des Wasserhaushaltes der Löß-Decken nur im Zusammenhang mit der langfristigen statistischen Betrachtung des Witterungs-Verlaufes durchführen. Besonders wichtig wäre in diesem Zusammenhang für zukünftige Wasserhaushalts-Forschungen die gesonderte und genauere Erfassung der Bilanz-Größe "Evapotranspiration". Dies wäre unter Zuhilfenahme der (Strahlungs-)Energie-Bilanz aufgrund langfristiger statistischer Vergleiche zwischen dem (registrierbaren) atmosphärischen H₂O-Sättigungs-Defizit und der Verdunstung aus Boden-Monolithen mit vorgegebenen konstanten hydraulischen Potentialen möglich.

Trotz all dieser einschränkenden Betrachtungen, scheint uns ein pedohydrologischer Bilanz-Ansatz, wie er auf Seite 142 gegeben wurde, ein möglicher Schritt in der Richtung auf ein besseres Verständnis der klimaregionalen Abhängigkeit der Bodentypen-Verbreitung zu sein. Man stelle sich dazu eine Löß-Decke von gleicher Beschaffenheit wie in Einbeck im mitteldeutschen Trocken-Gebiet vor und setze in die Bilanz-Tabelle auf Seite 142 folgende Niederschlags-Daten ein:

statt <u>Leinetal</u>	jetzt	<u>Bernburg/Saale</u>
Jahr 650 mm		470 mm
Winter 250 mm		210 mm
Sommer <u>400</u> mm (!)		<u>260</u> mm (!)

Das durch Verdunstungs-Überschuß hervorgerufene sommerliche Boden-Wasser-Vorrats-Defizit dürfte hier so groß werden, daß die Winter-Niederschläge es nicht aufzufüllen vermögen. Der Sickerwasser-Abfluß müßte sich theoretisch Null nähern. Dies deckt sich mit der Beobachtung, daß in diesem Raum unter ähnlichen hydrologischen Außenbedingungen wie in Einbeck, die Löß-Decken (auch dort wo seit dem Neolithikum kein wesent-

licher Boden-Abtrag nachzuweisen ist) z.T. noch bis an die Oberfläche kalkhaltig sind und Schwarzerden tragen. In Einbeck dagegen war dieses Entwicklungs-Stadium der kalkhaltigen Schwarzerde schon spätestens mit Beginn der neolithischen Siedlungs-Epoche durchlaufen. Die Entkalkungs-Grenze ist in den seither verstrichenen 6500 Jahren von ca. 60 auf 180 → 220 cm Tiefe abgesenkt worden.

KALKBILANZ: Bei einem Ausgangs-Kalkgehalt des Lösses von ca. 10 % und einer jährlichen Versickerungs-Rate von 140 mm würde das bedeuten: Das die 2 m-Grenze passierende Sickerwasser muß eine mittlere "CaCO₃-Konzentration" von 200 bis 260 mg/l gehabt haben und haben. Gehen wir davon aus, daß dieses Wasser nur auf dem Wege der kapillaren Abwärts-Verdrängung das Solum verläßt, also stets genügend Zeit gehabt hat, um sich ins Lösungs-Gleichgewicht mit dem Calcit und dem herrschenden CO₂-Partial-Druck zu setzen, so ergibt sich ein durchschnittlicher p_{CO₂} für das Solum von 0,02 bis 0,04 atm. Das ist etwa der 130 fache Betrag des CO₂-Partial-Druckes der bodennahen Atmosphäre. Diese Angabe findet eine Bestätigung dadurch, daß die bilanzmäßig errechneten Ca-Konzentrationen des Sickerwassers sich etwa mit denen decken, die wir unter den Niederschlags-Bedingungen des Leine-Gebietes in Unterdruck-Lysimetern im Sickerwasser kalkhaltiger Löß-Monolithe in 120 cm Tiefe ermitteln.

4.3 WASSER-HAUSHALT DER LÖSS-DECKEN MIT HOCHLIEGENDEM GRUNDWASSER

Zu dieser Gruppe von Standorten gehören die in Tabelle 1 (S. 96), Abb. 1 (S. 99), Abb. 2 (S. 102) und Abb. 7a - e charakterisierten Areale

IV Rosdorf - Schule	VII Rosdorf - Beeke
V Rosdorf - Gärtnerei	VIII Rosdorf - Bahndamm
VI Rosdorf - Rase	

geordnet nach zunehmender Höhe des Grundwasser-Spiegels (GS) von durchschnittlich 3 m unter Oberfläche auf durchschnittlich 0,8 m unter Oberfläche.

Bis auf Areal IV - dasjenige mit dem tiefsten GS - sind alle in Abb. 7 dargestellten Profile bis an die Oberfläche kalkhaltig. Nur IV zeigt bei einer GS von 1,5 - 4,5 m eine Entkalkung des Schwarzerde-A-Horizontes und die Ausbildung eines maximal 30 cm starken entkalkten B_{tv} -Horizontes.

"A" bezeichnet in den Darstellungen die A-Horizonte, "B" - soweit vorhanden - den B-Horizont bzw. die Undulations-Zone der Entkalkungs-Grenze und "C" den kalkhaltigen Löß.

4.3.1 Tiefen-Abhängigkeit der Poren-Verteilung. — Profil-Aufbau — Sy-Horizont

Wir greifen auf den Abschnitt 4.1.1 (S. 111) zurück, in dem wir auf die isovolume Sackungs-Verdichtung der stark durchfeuchteten Löss hingewiesen haben. Ein Blick auf Abb. 7 zeigt, daß jedes der feuchten Löß-Profile eine Zone aufweist, die sich durch eine ungewöhnlich starke Verdichtung auszeichnet. Diese besteht in einer Reduktion aller Poren-Anteile $> 3 \mu \emptyset$ entsprechend $pF < 3,0$. Die Verdichtungs-Zone deckt sich jeweils weitgehend mit dem Schwankungsbereich der Grundwasser-Spiegeltiefe.

Wir kennzeichnen im folgenden sowohl das Erscheinungsbild als auch den Prozeß, der zur Verdichtung im Oszillations-Bereich der GS führt, mit dem Buchstaben "y". Es ist dies einer der wenigen freien Buchstaben des Alphabets, die in den internationalen Nomenklatur-Schemata noch nicht für die Indizierung bestimmter Boden-Horizonte verwendet worden sind. - Der durch "y" indizierte Horizont zeigt in Zusammenhang mit seiner durch Grundwasser-Schwankung ausgelösten Verdichtung sowohl in seiner horizont-morphologischen Ausprägung als auch in seinem hydrodynamischen Verhalten die Phänomene des "Wasser-Staus". Er ist demnach zu den S-Horizonten zu stellen (Sy), obgleich er sich nicht in das herkömmliche - allerdings auch sehr unklar definierte - Nomenklatur-Schema von "Stauzone" und "Staukörper" einfügen läßt. Definieren wir aber den Begriff des "Wasser-Staus" umfassender (vgl. S. 128 ff.) so ergibt sich eine zwanglose Einordnung unseres Horizontes in die Gruppe der S-Horizonte.

Die Mächtigkeit und die Lage des Sy-Horizontes im Boden-Profil sind - da sie lediglich an den Schwankungs-Bereich des Grundwasser-Spiegels gebunden sind - weitgehend unabhängig von der Anordnung und Ausbildung der übrigen Boden-Horizonte. In Abb. 6, einer schematischen Sammel-Profil-Skizze, haben wir Sy - wie das auch in den Profilen V bis VIII etwa der Fall ist - dicht unter den A-Horizont gelegt. Das neben dem Profil dargestellte taillenförmig eingeschnürte schräg schraffierte Dränporen-Diagramm möge andeuten, daß sich die Lage des Verdichtungs-Maximums meist im oberen Drittel des Sy-Horizontes befindet.

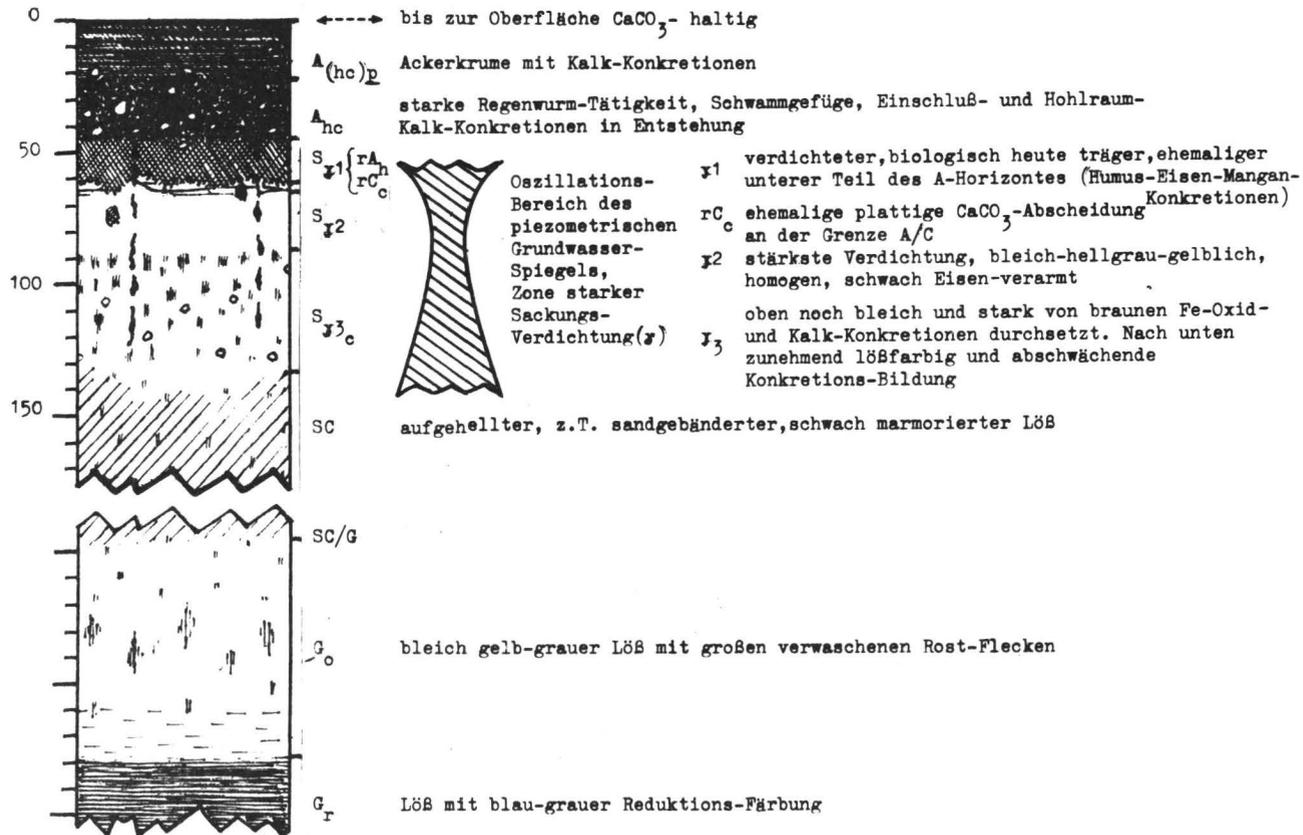
Das Maximum der Verdichtung zeichnet sich visuell als ein 20 - 40 cm starker weißlich-gelbgrauer Subhorizont ab. Er erscheint völlig homogenisiert und zeigt nach oben wie nach unten eine deutliche farbliche und strukturelle Begrenzung. In ihm scheint sich eine recht starke CaCO_3 -Mobilisierung zu vollziehen, die zu einem Abtransport nach oben wie nach unten führt. Er ist häufig der kalkärmste Horizont des Profils. Oberhalb, aber auch - so widersprüchlich dies zunächst klingt - unterhalb des Sy-Horizontes, also unterhalb des GS, kommt es zu einer konkretionären Kalk-Abscheidung. Liegt die helle Verdichtungs-Zone dicht unter dem A-Horizont, so bildet sich an der Grenze A/C meist eine m.o.w. plattig erscheinende weiche Kalk-Abscheidungs-Lage, die in einer mehrlagen Carbonat-Ausfüllung der A-Horizont-Hohlräume besteht. Diese Abscheidung erfolgt offenbar dort, wo der CO_2 -Partialdruck, von unten nach oben verfolgt, eine sprunghafte Erniedrigung erfährt, d.h. dort, wo die A-Horizont-Poren einen rascheren Gas-Austausch mit der Atmosphäre gewährleisten.

Bodengeschichtliche Anmerkung: Wenn das Grundwasser im Laufe des Holozäns angestiegen ist, kann der Sy-Horizont in den A_h -Horizont hineingewandert sein (vgl. die Darstellung in Abb. h_6). Dieser Aufstieg ist dann regelmäßig von einer Kalk-Konkretions-Bildung im darüber befindlichen A_h -Rest oder einer sinterartigen Carbonat-Verbackung des A_h oberhalb SyrA_h begleitet. Bei noch weitergehendem Anstieg der A_h GS kann es schließlich zur Dauch-Bildung (Kalksinter) auf der Oberfläche des Bodens kommen. Umgekehrt hat die lokale, auf natürlicher Verlagerung der Grundwasser-Strömungs-Richtungen beruhende, vorgeschichtliche oder geschichtliche Absenkung des Grundwassers an einigen Stellen des Rosdorfer Löß-Rückens auch eine Verstärkung der Sy-Horizonte hervorgerufen. Sprunghafte Absenkungen oder Anstiege des GS können auch zu einer 2-stöckigen Ausbildung des Sy-Horizontes geführt haben.

Aufgrund von ausgedehnten archäologischen Flächen-Grabungen im Rosdorfer Löß-Gebiet haben wir sichere stratigraphische Beweise dafür erhalten, daß die Verdichtungs-Horizonte keine wärmzeitlichen Lößboden-Horizonte und auch keine spätglazialen

für die Naß-Schwarzerden im Leine-Gebiet (besonders für die Areale
in Rosdorf)
Dargestelltes Solum: Jungwürm-Löss ohne erkennbare Zonierung

cm



Bodenbildungs-Relikte darstellen, sondern ein Ergebnis der holozänen Grundwasserspiegel-Oszillation sind. In einigen Bereichen des Löß-Rückens hat sich der piezometrische GS im Laufe der nachneolithischen Jahrtausende verlagert. So sind stellenweise die mit dunklem Schwarzerde-Material gefüllten neolithischen Siedlungs-Gruben in die Oszillations-Zone des "phreatischen" oder "piezometrischen" Grundwasser-Spiegels (PGS) geraten. Quert der PGS solch eine Siedlungs-Grube, so kann deren dunkle Füllung im Bereich des Sy-Horizontes genau so verdichtet sein wie der angrenzende Löß. Liegt der Sy-Horizont 1 bis 2 dm unterhalb der Gruben, so zeichnet der über dem Sy folgende Carbonat-Ausscheidungs-Horizont die Gruben-Konturen präzise nach. Gelegentlich schneidet der Sy-Horizont die durch dünne Sand-Bändchen markierte Löß-Schichtung im Winkel. Das ist dann der Fall, wenn der PGS eine andere Neigung als die Löß-Schichtung besitzt.

Für unsere hydrologischen Untersuchungen sind im folgenden nur solche Situationen ausgewählt worden, bei denen jeweils nur ein Sy-Horizont vorhanden ist und sich die Lage dieses Horizontes mit der heutigen PGS deckt. Sie liegen außerdem in der Umgebung einer neolithischen "Brunnen-Grube", deren natürliche basale Kalksinter-Füllung den Beweis dafür liefert, daß die heutigen Grundwasser-Stände zumindest in den vergangenen 6500 Jahren keinen wesentlichen Veränderungen unterlegen haben. Die dargestellten pedogenetischen Prozesse und Horizonte sind somit als rezent und in Fortbildung begriffen anzusehen. Gleiches gilt auch für die in größerer Tiefe beginnenden G_1 - und G_2 -Horizonte, soweit solche überhaupt in den einzelnen Profilen vorhanden sind.

Nach unten folgt auf den stark verdichteten Syl- bzw. Sy2- ein Subhorizont (Sy3) mit einer starken Abscheidung von Eisenoxid-Konkretionen und auch Kalk-Kindln, d.h. Naß-Kindln in Kränenfuß-Form. Deren Zahl und Festigkeit nimmt nach unten hin ab.

Es schließt sich hier - wie auch der Vergleich mit den Poren-Diagrammen erkennen läßt - der Übergangs-Bereich zu dem tiefer liegenden normalporigen Löß (SC) an. Obwohl sich dieser Abschnitt der Löß-Decke bereits unterhalb der "piezometrischen" oder "phreatischen" Oberfläche, d.h. des in Brunnen oder Beobachtungs-Rohren gemessenen Grundwasser-Spiegels befindet, hat er - abgesehen von einer schwachen Marmorierung - seine ursprüngliche gelb-braune Färbung bewahrt.

Unabhängig von der Höhe des phreatischen oder piezometrischen Grundwasser-Spiegels (PG), unabhängig auch von der Lage der hellgrauen und rostfleckigen Verdichtungs-Horizonte, kann

- braucht aber nicht - der Löß in beliebiger Tiefe in einen bleich-gelbgrauen, rostfleckigen G₀-Horizont übergehen. Darunter folgt dann - jedoch auch nicht überall - der übliche blau-grau reduzierte G_r-Horizont. Wenn ein solcher ausgebildet ist, reicht er bis zur Basis des Lösses. Der Löß ist im Bereich dieses Horizontes gegenüber dem gelb-braunen Löß nicht wesentlich verdichtet. Wie später näher zu begründen sein wird, handelt es sich bei dem G_r-Horizont um einen "echten" Grundwasser-Horizont - im Gegensatz zum SC, der zwar unterhalb des phreatischen Grundwasser-Spiegels liegt, aber nicht vollständig mit Wasser gefüllt ist.

4.3.2 Luft-Einschluß unterhalb des phreatischen Grundwasser-Spiegels

Im vorangehenden Abschnitt sind Befunde mitgeteilt worden, deren kausale Zusammenhänge mit den hydrologischen Gegebenheiten zu klären sind:

1. Die Koinzidenz zwischen der Lage des Verdichtungs-Horizontes Sy und dem Schwankungs-Bereich der phreatischen (piezometrischen) Grundwasser-Spiegeltiefe (PGS);
2. die schwache Ausbildung oder das Fehlen von Stau- und Grundwasser-Phänomenen im Löß unterhalb der PGS;
3. die Tatsache, daß die tiefgehenden Wurzeln der Wurzel-Unkräuter (bei Profilen mit tiefer PGS) bzw. das Wurzel-Netz der Kultur-Pflanzen (bei hoher PGS) in Tiefen vordringen, die permanent unterhalb der PGS liegen.

Vorausschickend sei gesagt, daß der gemeinsame Nenner für diese Erscheinungen in folgender Tatsache zu suchen ist: Unterhalb der PGS ist keine volle Wasser-Sättigung des Boden-Poren-Raumes gegeben. Ein bestimmter Volumen-Anteil des Hohlraum-Systems bleibt permanent mit Luft gefüllt.

In Abb. 7 sind die Chronoisoplethen-Diagramme der Rosdorfer Profile dargestellt. Wie bei den Profilen mit tiefer GS ist auch hier wieder als Maßstab für den Wasser-Sättigungs-Grad

des Poren-Raumes der einzelnen Horizonte und Schichten oberhalb und unterhalb der strichpunktierter PGS-Linie die Äquivalent-Saugspannung verwendet worden. Diese ist aus den gravimetrisch ermittelten Wasser-Gehalten aufgrund der pF-Charakteristik errechnet worden.

Man erkennt auf den ersten Blick, daß diese Art der Darstellung für die vorliegenden Fälle im Grunde genommen sinnlos ist: Unterhalb der PGS werden Äquivalent-Saugspannungen errechnet, die maximal bis auf pF 2,6 ansteigen können. Dies ist aufgrund der hydrostatischen Druck-Verhältnisse undenkbar.

Tatsächlich bestätigt eine Kontroll-Messung mit Tensiometern auch sofort, daß die errechneten Äquivalent-Saugspannungen der Profile ganz irregulär von den realen Saugspannungen abweichen. Letztere entsprechen oberhalb der PGS den auf die PGS bezogenen Kapillar-Potentialen M - allerdings mit häufigen Abweichungen, die durch Ungleichgewichts-Zustände hervorgerufen sind, wie sie bei langsamer Gravitations-Wasser-Bewegung oder kapillarem Verdunstungs-Hub auftreten. Unterhalb der PGS mißt das Tensiometer erwartungsgemäß die auf die PGS bezogenen "Untertauch"- (submergence) Potentiale S.

Worin ist diese Diskrepanz zwischen den errechneten Äquivalent-Saugspannungen und den realen Saugspannungen oder Drücken begründet? Fehler bei der Ermittlung der pF-Charakteristik lassen sich aufgrund wiederholter Kontrollen mit Sicherheit ausschließen. Somit bleibt die Frage zu klären, warum ein und derselbe gravimetrisch bestimmte Wasser-Gehalt eines Boden-Horizontes so unterschiedliche reale Saugspannungen bzw. Drücke hervorzurufen vermag.

Die Erklärung ist - wie bereits in Absatz 4.2.2.2 (S. 125) ausgeführt - auch im vorliegenden Fall im Einschluß von Luft zu suchen: Ein bestimmter Porengrößen-Anteil ist und bleibt unterhalb und oberhalb der PGS permanent mit okkludierter Luft gefüllt. Diese ist in den Intergranularen allseitig von Wasser-Menisken (Korn-Berührungs-Menisken) und Wasser-Filmen umschlossen und steht nicht mit der Außenluft in

Abb. 7: Profile Rosdorf

- 7a Areal IV, Rosdorf Schule
- 7b Areal V, Rosdorf Gärtnerei
- 7c Areal VI, Rosdorf Rasetunnel
- 7d Areal VII, Rosdorf Beeke
- 7e Areal VIII, Rosdorf Bahndamm

Poren-Verteilungs-Diagramme, Klima-Diagramme, Äquivalent-Saugspannungs-Chronoisoplethen-Diagramm, Verlagerungs-Kurve des tritium-markierten Boden-Wassers (7a u. 7e) und Schwankungs-Linien des phreatischen, in nur unten offenen Rohren gemessenen Grundwasser-Spiegels.

Legende:

Zone A: A-Horizonte (0 - 60 bzw. 0 - 80 cm)

Zone B: B_{tv}-Horizonte (nur bei 7a)

Zone C: kalkhaltiger Löß mit S, SC und G-Horizonten

Strich-Punkt-Linie: phreatischer Grundwasser-Spiegel PGS

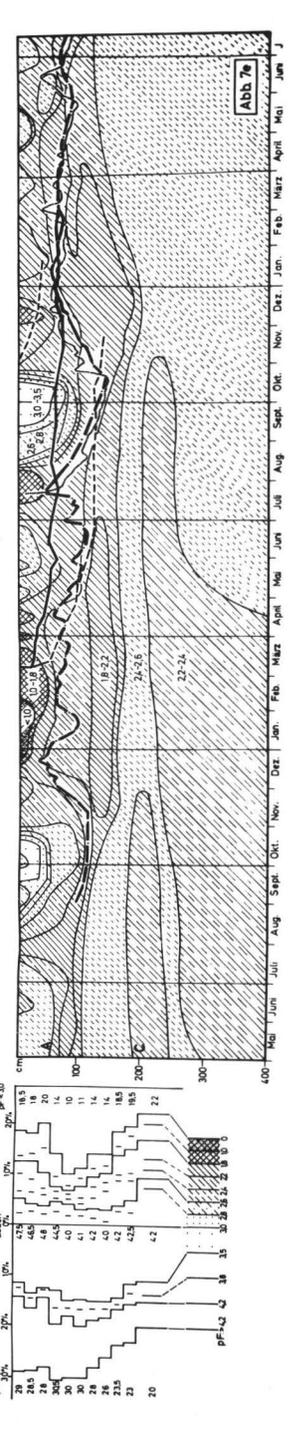
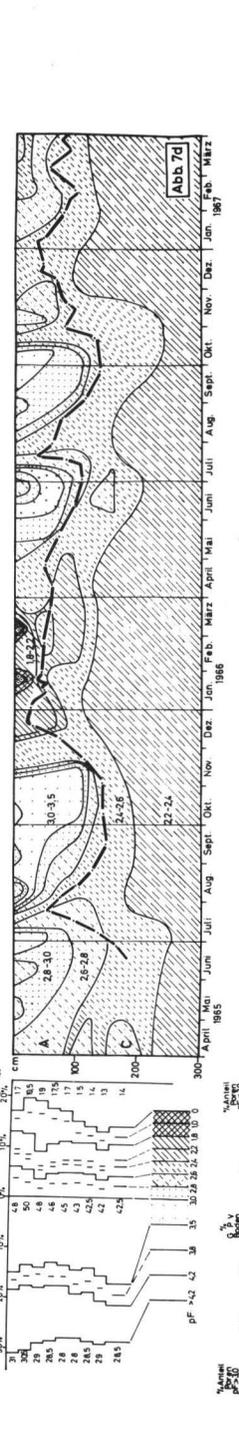
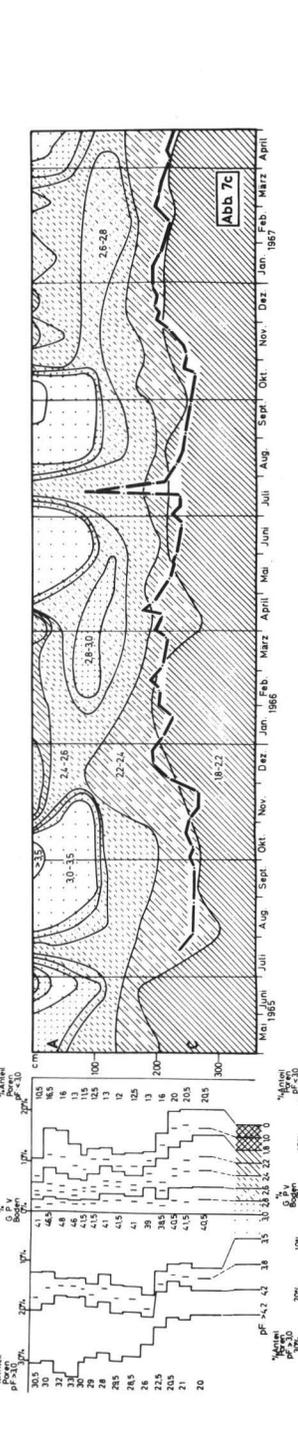
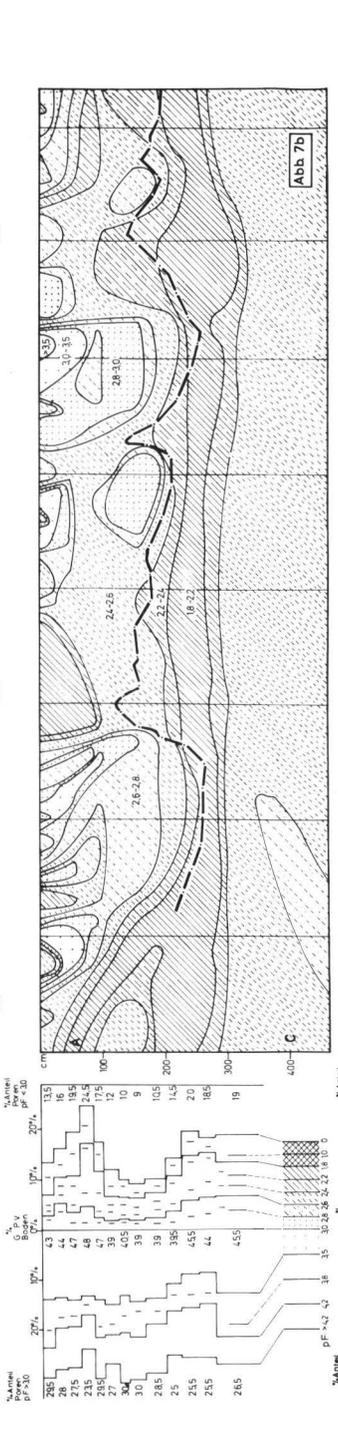
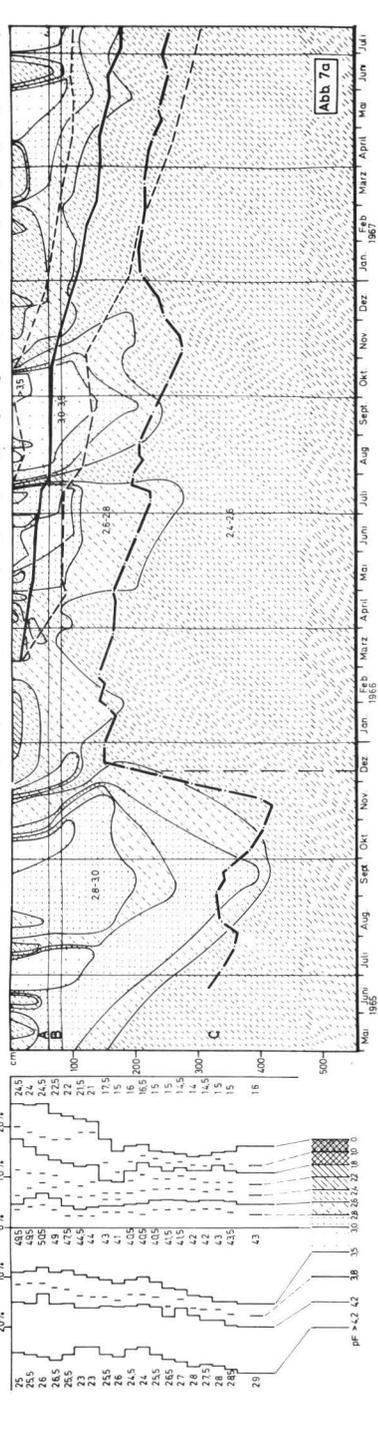
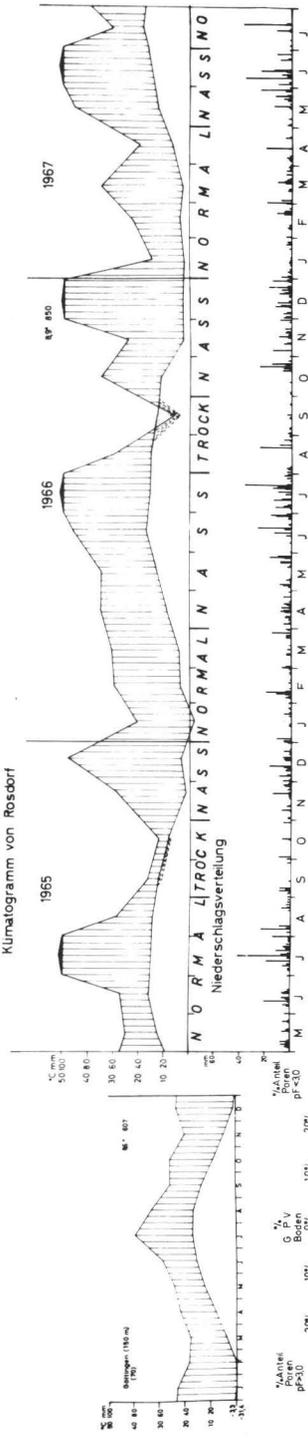
ausgezogene Linie: Lage des HTO-Tracer-Maximums

obere gestrichelte Linie: oberhalb dieser Linie kein HTO
nachweisbar

untere gestrichelte Linie: unterhalb dieser Linie kein HTO
nachweisbar

Die eingetragenen Zahlen geben die für die jeweilige Flächen-Schraffur gültige Spanne der Äquivalent-Saugspannungen an. Diese sind aus den Wasser-Gehalten über die pF-Kurve errechnet worden.

Klimatogramm von Rosdorf



Tab.5: Tiefen-Anordnung des luftgefüllten Poren-Anteiles (Vol Ges.-Boden) im Jahresgang 5 a) Rosdorf - Schule: Areal IV

cm u.O.	1 9 6 5			1 9 6 6					1 9 6 7		
	23.6.	15.9.	25.11.	31.1.	5.4.	1.7.	23.9.	12.11.	10.2.	1.6.	
- 10	26	19	20	14	18	23	26	20	16	25	A - Hori- zont
- 20	28	19	20	14	18	24	27	20	17	27	
- 30	28	20	21	17	19	22	26	19	19	27	
- 40	28	20	21	19	20	22	26	19	20	27	
- 50	24	22	21	22	20	23	27	21	19	26	
- 60	24	21	21	22	20	22	22	19	18	23	
- 70	24	20	22	20	19	20	24	19	19	21	B _{tv} - Hori- zont
- 80	23	20	22	20	19	20	23	21	17	21	
- 90	23	21	21	18	18	19	19	20	19	21	CaCO ₃ - Grenze
-100	22	21	21	20	18	22	21	20	14	21	
-120	20	19	15	17	14	19	18	18	18	18	GC _c - Hori- zont Oszillations-Bereich Oszill.-Verdichtungs-Zone GS *
-140	21	22	22	17	16	20	20	18	14	19	
-160	16	15	17	17	12	15	18	16	11	14	
-180	14	14	14	15	12	16	12	12	10	12	
-200	14	14	11	12	10	18	11	11	9	12	
-220	13	11	13	10	8	11	11	11	9	10	
-240	10	9	10	7	8	11	10	8	5	6	
-260	6	9	7	7	8	12	10	7	6	11	
-280	8	8	8	7	6	12	9	6	5	8	
-300	8	8	7	7	7	10	8	7	6	9	
-400	8	11	10	10	8	9	10	9	8	8	

*) hiermit ist in dieser wie auch in allen nachfolgenden Tabellen der "piezometrische"-, d.h. in Grundwasser-Beobachtungs-Rohren gemessene Grundwasser-Spiegel gemeint.

5 b) Rosdorf -Gärtnerei: Areal V

m u.O.	1 9 6 5			1 9 6 6				1 9 6 7		→ CaCO ₃ - Grenze	
	26.6.	15.9.	14.12.	14.3.	4.5.	27.7.	11.10.	9.12.	3.3.		19.4.
- 10	18	8	4	5	13	29	29	7	10	16	A _c - Hori- zont
- 20	18	8	6	9	10	11	28	14	13	14	
- 30	20	10	8	11	11	12	28	14	13	13	
- 40	20	10	9	7	10	12	28	14	13	13	
- 50	22	15	10	17	13	17	31	18	13	17	
- 60	21	15	9	20	12	14	23	17	12	15	
- 70	15	14	9	12	10	12	25	17	12	19	GC _c - Hori- zont GS -Oszillations-Bereich ↳ Oszill.-Verdichtungs-Zone ↳ GS *)
- 80	15	13	9	11	8	11	14	13	10	12	
- 90	14	12	8	7	5	8	12	11	10	15	
-100	14	12	12	12	9	9	12	11	15	14	
-120	7	7	4	6	5	4	7	3	2	7	
-140	6	11	7	6	5	4	7	5	5	7	
-160	6	8	6	9	6	7	7	4	6	7	
-180	7	8	8	8	7	6	7	5	9	7	
-200	7	7	6	6	6	6	6	4	9	7	
-220	7	7	4	5	6	7	10	9	8	9	
-240	7	7	5	8	6	8	9	7	6	3	
-260	7	7	8	7	7	8	9	9	7	7	
-280	14	12	13	10	12	13	11	11	10	12	
-300	15	12	12	10	13	14	14	11	10	12	

*) siehe Tab. 5 a

5 c) Rosdorf - Rasetunnel: Areal VI

	1 9 6 5			1 9 6 6			1 9 6 7		
	23.6.	15.9.	1.11.	14.3.	1.6.	16.8.	3.11.	24.1.	
cm u.O.	→ CaCO ₃ - Grenze								
- 10	11	12	11	4	10	21	10	11	11
- 20	11	12	11	6	13	19	11	11	11
- 30	14	16	11	11	21	14	14	16	14
- 40	14	16	10	11	22	19	14	15	14
- 50	25	26	13	13	20	20	17	14	18
- 60	23	26	13	14	22	20	16	13	16
- 70	12	24	14	13	17	18	13	13	12
- 80	12	24	14	13	16	18	10	16	9
- 90	12	13	12	12	12	13	7	12	5
-100	11	13	10	12	11	14	8	14	12
-120	11	9	11	11	10	11	12	11	12
-140	9	5	10	10	11	9	11	11	13
-160	8	2	9	10	11	9	10	7	10
-180	7	1	7	9	11	9	9	9	8
-200	3	1	5	6	7	6	7	8	9
-220	2	4	6	5	6	7	4	7	8
-240	4	4	3	8	7	10	8	8	7
-260	6	1	4	9	8	9	9	6	7
-280	6	6	7	8	8	9	8	5	6
-300	2	6	7	8	8	7	7	6	7

Oszill.-Verdichtungs-Zone-

GC_C - Horizont

GS-Oszill.-Bereich

→ GS *)

*) siehe Tab. 5a

5. d) Rosdorf - Beeke: Areal VII

cm u.O.	1 9 6 5			1 9 6 6					1966	CaCO ₃ - Grenze		
	30.6.	2.8.	15.12.	3.2.	21.4.	7.6.	16.8.	7.10.	17.12.		30.3.	
- 10	20	17	7	6	7	23	13	20	8	9	A _C - Höri- zont	
- 20	20	17	9	6	9	24	13	18	9	10		
- 30	20	18	9	12	12	25	15	21	11	13		
- 40	20	18	7	12	16	25	17	22	12	15		
- 50	20	14	4	11	12	24	15	20	11	13		
- 60	16	14	8	14	12	21	12	18	9	16		
- 70	15	13	7	8	9	18	10	15	6	16		GS-Oszillations-Bereich OSzill.-Verdichtungs-Zone
- 80	15	13	10	12	11	19	10	15	8	16		
- 90	14	15	12	9	12	17	12	14	9	15		
-100	13	15	13	9	13	18	12	14	16	16		
-120	21	12	10	9	11	14	14	13	11	13		
-140	11	8	7	8	8	11	11	11	8	10		
-160	7	8	6	7	4	7	11	8	8	8		
-180	7	3	2	7	4	8	10	8	8	5		
-200	6	7	1	7	4	8	11	7	7	3		

*) siehe Tab. 5a

5 e) Rosdorf - Bahndamm: Areal VIII

cm u.O.	1 9 6 5			1 9 6 6						1 9 6 7		→ CaCO ₃ -Grenze
	26.6.	13.9.	25.11.	16.2.	9.3.	4.5.	1.7.	23.9.	3.11.	17.2.	1.6.	
- 10	13	11	2	4	4	11	11	25	9	7	8	A _c -Horizont
- 20	13	11	2	5	7	10	11	26	10	8	13	
- 30	11	11	11	5	5	9	10	24	8	6	9	
- 40	5	11	11	4	5	7	7	22	6	6	6	
- 50	5	7	11	8	7	7	10	21	10	8	13	
- 60	3	7	11	7	7	10	9	17	10	7	4	
- 70	7	4	5	5	6	4	4	10	3	6	4	*GS-Oszillations-Bereich *GS-Oszillations-Zone GS*) GC _c -Horizont
- 80	6	4	5	6	4	2	3	5	2	4	4	
- 90	3	3	3	3	4	3	4	3	3	4	3	
-100	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	
-120	7	7	8	5	3	6	7	5	5	3	4	
-140	6	8	8	4	8	8	8	6	7	8	4	
-160	7	8	5	4	8	7	8	7	7	7	8	
-180	8	8	8	6	8	8	8	9	8	6	8	
-200	6	6	8	8	5	7	9	6	8	4	8	
-300	5	7	7	5	3	4	6	6	4	5	6	

*) siehe Tab. 5a

Verbindung. Der dieserart durch Okklusions-Luft blockierte Poren-Anteil kann sich weder an der Wasser-Speicherung noch an der Wasser-Leitung beteiligen.

Bei Lössen, die auf natürlichem Wege mit Wasser aufgesättigt sind, läßt sich der durch Luft-Okklusion blockierte Poren-Anteil nach Menge und Porengrößen-Bereich auf folgende Weise annähernd erfassen: Man entwässert frische Stechzylinder-Proben - ausgehend vom natürlichen, möglichst maximalen Sättigungs-Zustand - stufenweise auf der porösen Platte im Drucktopf. Die resultierende pF-Kurve weicht in der Regel von derjenigen ab, die man an Proben ermittelt, die vorge-trocknet und im Luft-Vakuum vollständig und unter Vermeidung von Luft-Einschlüssen mit Wasser aufgesättigt wurden. Die pF-Kurven der natürlich und unter Luft-Okklusion aufgesättigten Proben zeigen gegenüber den vollständig mit Wasser erfüllten Proben meist einen ausgeprägt stufenartigen Verlauf. Über mehrere pF-Stufen hinweg wird bei Drucksteigerung kein oder nur sehr wenig Wasser abgegeben. Die diesen pF-Intervallen entsprechenden Porengrößen-Bereiche sind demgemäß überwiegend mit Luft gefüllt. - Durch eine parallel laufende Kontrolle der in den einzelnen Entwässerungs-Stufen zugänglichen Luft-Poren-Anteile mit Hilfe des Luft-Pyknometers lassen sich ferner auf der pF-Kurve diejenigen Punkte festlegen, bei denen sich die Wasser-Menisken-Hüllen der okkludierten Luftblasen öffnen und die Verbindung zwischen dem Poren-Luft-Raum und der Außenluft wieder hergestellt wird.

In den Tabellen 5a - e sind für die Profile 7a - e die mit eingeschlossener Luft gefüllten Poren-Anteile errechnet und in % des Gesamt-Boden-Volumens eingetragen. Unterhalb der PGS liegt der luftgefüllte Volumen-Anteil im Schnitt bei 7 bis 8 %. Er kann Maximal-Werte von 15 % erreichen und sinkt nur selten unter 3 %. Dabei ist zu berücksichtigen, daß diese okkludierte Poren-Luft hydraulisch komprimiert sein kann.

Bei Druck-Entlastung, z.B. bei einer Verkürzung der auf-lastenden Kapillar-Wasser-Säulen, vermag sie sich auszudehnen. Dies ist z.B. bei 5a vom 1.7.66 bis zum 23.9.66 der Fall, wo oberhalb der PGS eine maximale Luft-Füllung des Solums und damit ein erheblich reduzierter hydraulischer Druck gegeben waren.

Mit wenigen Ausnahmen spielt sich die Luft-Okklusion unterhalb der PGS im Porengrößen-Bereich zwischen pF 1,8 (50 μ Poren-Durchmesser) und pF 2,9 ($\sim 4 \mu \varnothing$) ab. Der Schwerpunkt liegt zwischen pF 2,2 und 2,6. Das ist ein breiterer Okklusions-Bereich als ihn MOSCHREFI (21) unter ähnlichen hydrau-

lischen Bedingungen in seinen Modell-Versuchen mit tonfreiem Löß-Schluff gefunden hat (pF 2,1 - 2,35), ein breiter Bereich auch als wir ihn in den Löß-Profilen mit tiefliegender GS beobachteten (pF 2,5 - 2,9; vgl. Abschn. 4.2.2.2).

Das Poren-Volumen mit pF > 2,9 und mit pF < 1,8 ist unterhalb der PGS fast vollständig mit Wasser gefüllt, der dazwischen liegende Poren-Bereich 5-50 μ dagegen zu 40 - 80 % mit Luft. Das würde bedeuten, daß sich der sog. "langsam dränende" Poren-Anteil nur in sehr reduziertem Umfange und nur nach Maßgabe des leitenden Querschnittes der wenigen und dazu druckvariablen Meniskenwasser-Stränge an der Wasserleitung und der Herstellung des hydraulischen Druck-Ausgleiches beteiligen. Auch oberhalb der PGS findet der Einschluß von Luft bevorzugt innerhalb des gleichen Porengrößen-Bereiches statt. Die Luft-Blockierung des Poren-Anteiles mit 5 bis 50 μ \varnothing führt dazu, daß der Löß im vorliegenden Fall als "Staukörper" für kapillares Gravitations-Wasser fungiert, das von oben her in diesem Porengrößen-Bereich angeboten wird. Das wird deutlich, wenn wir im folgenden Abschnitt die Frage nach dem stationären oder nichtstationären Charakter der okkludierten Poren-Luft geklärt haben werden.

Die ständigen Veränderungen des Luft-Gehaltes unterhalb der PGS sind in ihrem Ausmaß stärker als sich allein aufgrund der hydraulischen Druck-Schwankungen und der damit in Zusammenhang stehenden Kompression und Ausdehnung der intergranulären Luft-Bläschen erklären ließe. Dies legt den Gedanken nahe, daß die eingeschlossene Luft nicht völlig stationär gebunden ist, sondern z.T. einem abwärts oder aufwärts gerichteten Transport unterliegt. In Anbetracht der geringen Größe der lufthaltenden Intergranular-Poren müßte dieser Transport über die physikalische Lösung der Luft im Kapillar-Wasser und über die Entbindung beim Passieren des Wassers von Poren-Engpässen höherer Kapillar-, d.h. Oberflächen-Spannung erfolgen. Tatsächlich wird bei Abpreß-Versuchen kein "gemischtes Fließen" von Wasser und Luft-Bläschen

beobachtet, wie es SMITH et al. (33) für Sand-Modelle beschreiben. - Aus der Gas-Komponenten-Zusammensetzung der okkludierten Luft lassen sich keine Rückschlüsse auf eine eventuelle Regenerierung der Luft-Blasen von oben her ziehen. Der CO_2 -Partial-Druck liegt - dem Gleichgewichts-Ca-hydrogencarbonat im Kapillar-Preßwasser nach zu schließen - in allen Tiefen annähernd gleichmäßig bei ca. 0,02 atm, das O_2/N_2 -Verhältnis annähernd konstant bei dem der atmosphärischen Luft. Einen Hinweis auf eine tatsächlich erfolgende Luft-Entbindung aus dem im Oberboden mit Luft aufgesättigten Gravitations-Wasser liefern die Profile 7b und e. Bei ihnen werden bis zu mehreren dm unterhalb der PGS auch die größeren Poren mit $pF < 1,8$ vorübergehend völlig von Luft-Kissen blockiert. Dies läßt sich u.a. durch Austreiben der komprimierten Luft aus engeren Poren-Bereichen erklären (s.u.), wobei gleichzeitig das Gefüge verändert wird. In diesen beiden Profilen, deren schnell dränende Poren unterhalb der PGS verschlossen sind, macht sich der am Ende des vorhergehenden Absatzes erwähnte Stau-Effekt des Poren-Bereiches $pF 1,8 - 2,9$ deutlich bemerkbar. Wie Abb. 7b und e zeigen, kommt es zu einem langanhaltenden Stau des mit $> pF 1,8$ gespannten Gravitations-Wassers.

Die Anwesenheit beträchtlicher Mengen von Luft unterhalb der PGS beantwortet die eingangs gestellte Frage: Warum hat der Löß unterhalb des Grundwasser-Spiegels seine ursprüngliche Färbung beibehalten ohne die erwarteten Phänomene der Stauwasser-Marmorierung oder der G_0 - und G_r -Horizontierung zu zeigen und warum dringen die Wurzeln bis tief in diese Zone hinein? Man bedenke, daß auf den südniedersächsischen Parabraunerden sowohl die Acker-Krume als auch die darunter folgenden 40 cm A_1 -Horizont in einem feuchten Sommer über die ganze Vegetations-Periode hinweg nicht über eine Saugspannung von $pF 2,5$ hinaus austrocknen. Wie wir 1966 an einigen Stellen nachweisen konnten bedeutet dies: Höchstens 8% des Gesamt-Boden-Volumens stehen als durchlüftbarer Poren-Raum zur Verfügung und das auch nur während ganz kurzer Abschnitte

der Vegetations-Periode. Überwiegend mußten sich die Kulturpflanzen mit geringeren Luft-Volumina - meist unter 5 % - abfinden. Wenn selbst unter derartigen Bedingungen eine Wurzel-Entfaltung möglich ist und trotz Humus-Anwesenheit keine visuellen Fe-Reduktions-Phänomene auftreten, so muß gleiches für den vergleichsweise genau so gut oder besser "belüfteten" Raum unterhalb der PGS in unseren feuchten Löß-Profilen gelten.

Es bleibt die Frage nach den Zusammenhängen zwischen der Entstehung der Sy-Verdichtungs-Horizonte und den Schwankungen der PGS zu klären.

4.3.3 Quellungs- und Verdichtungs-Wirkungen der okkludierten Luft

Wie ROHDENBURG u. MEYER (28) gezeigt haben, kann bei der Befeuchtung trockener Löß-Proben in Stechzylindern unter normalen p-t-Bedingungen Luft-Einschluß stattfinden. Durch das kapillare Ansaugen des Wassers wird die eingeschlossene Luft komprimiert. Bei der fortschreitenden Aufsättigung solcher Proben bis an die Fließgrenze heran kann die okkludierte und komprimierte Luft unter Deformation des natürlichen Gefüges ausweichen und sich in Form größerer rundlicher oder schlauchförmiger Blasen in neugeschaffenen Hohlräumen sammeln. Gleiches ist bei der Aufsättigung naturfeuchter Löß-Proben möglich, wenn beim Überstauen mit Wasser der auflastende Druck der Wasser-Säule steigt. Beim mehrfachen Wiederholen des Vorganges von Überstauen und Abfließenlassen findet schließlich eine meßbare Umverteilung der einzelnen Porengrößen-Mengenanteile statt. Wie bei eingeschwemmtem oder knet-verdichtetem Löß-Material verringert sich der Porengrößen-Anteil mit Saugspannungen $p_F < 3$ zugunsten des Poren-Anteiles mit $p_F > 3$. Abweichend vom Schwemm- und Knet-Löß bleibt jedoch bei den durch Luft-Verformung verdichteten Lössen immer ein bestimmter, durch Bildung größerer Luft-Blasen stets regenerierter Anteil von Grobporen erhalten.

In Modell-Versuchen an Löß-Säulen läßt sich durch wiederholtes Heben und Senken des piezometrischen Wasserspiegels innerhalb des Schwankungs-Bereiches eine ähnliche Verdichtung des in natürlicher Lagerung eingebrachten Lösses erzeugen, wie sie auch in den Sy-Horizonten gegeben ist. (Veröff. i. Vorber.) Wir sind daher der Auffassung, daß die Entstehung der oben besprochenen Sy-Verdichtungs-Horizonte in der Weise zu erklären ist, daß im Schwankungs-Bereich der PGS ein ständiges "Durchrühren" oder "Verkneten" des feuchten Löß-Materials durch wiederholten Einschluß, durch Kompression und gefügezerstörendes Ausweichen von Poren-Luft stattfindet.

Weitere Beobachtungen zur Gefüge-Verformung durch okkludierte und komprimierte Luft-Bläschen ergaben sich im Verlauf der Gelände-Arbeiten: Beim Ausbaggern der Boden-Einschläge kann die Gruben-Sohle bis zu mehreren Metern unterhalb der PGS in den Löß eingetieft werden, ohne daß größere Sickerwassermengen selbst stundenlanges Arbeiten in den Gruben behindern. Die Wasser-Leitfähigkeit der durch Luft-Okklusion betroffenen Grundwasser-Bodenhorizonte ist dafür offensichtlich zu gering. Gleichzeitig macht sich jedoch auch ein Umstand bemerkbar, der auf die Ausdehnung und das Ausweichen der komprimierten Poren-Luft zurückgeführt werden muß. Die Gruben-Wände werden elastisch und reagieren auf Faust-Druck mit Ein- und Wieder- ausbeulung. In den wandnahen Partien des feuchten Lösses sammeln sich ganze Isolier-Lagen sichtbarer Luft-Blasen, die anscheinend an der Behinderung des Wasser-Austrittes mit beteiligt sind.

Eigenartige Erscheinungen zeigen sich auch bei der Entnahme von Stechzylinder-Proben aus den Horizonten unterhalb der PGS und zwar selbst dann, wenn die leeren Stechzylinder nicht in den Boden hineingedrückt werden, sondern durch vorsichtiges Herauspräparieren des Boden-Monolithen und Draufschieben des Zylinders gefüllt werden. Etwa 3 bis 4 Stunden lang - beschleunigt bei Erschütterungen - quillt die vorher glatt an der Ober- und Unterkante des Zylinders abgeschnittene

Boden-Füllung aus dem Stechzylinder heraus. Der Ausdehnungs-Betrag kann dabei bis zu 15 % betragen. Ursache für diese "Quellung" ist ebenfalls die nach mechanischer Druck-Entlastung sich ausdehnende und ausweichende Okklusions-Luft. Sie sammelt sich in Form einer großen Zahl stecknadelkopf-großer Blasen, die erheblich zu nachträglicher Umverteilung der Porengrößen-Bereiche beitragen kann. Größere Blasen können sich dabei schlauchförmig zur Oberfläche hin Bahn brechen und die Luft entweichen lassen.

4.3.4 Zur Definition des phreatischen (piezo- metrischen) Grundwasser-Spiegels

Der erhebliche Luft-Einschluß unterhalb der PGS erlaubt uns bei Lössen mit einer geringen Grundwasser-Spiegeltiefe nicht, die in der Hydrologie gebräuchlichen Begriffe anzuwenden. Wir können weder von einer "Grundwasser-Oberfläche" noch von einem "geschlossenen oder offenen Kapillar-Saum" sprechen. Selbst die Abgrenzung von "Stau- und Grund-Wasser" ist schwierig. Auch der Versuch einer exakten Festlegung der "phreatischen Oberfläche", die durch die Höhe des Wasser-Spiegels eines Brunnens oder eines Beobachtungs-Rohres definiert ist, ist in unserm Fall gewagt, wenn man die folgenden Umstände in Betracht zieht:

Die in Abb. 7 eingetragenen phreatischen Oberflächen oder Grundwasser-Spiegel-Tiefen (PGS) sind einheitlich in ca. 5 m langen Beobachtungs-Rohren gemessen worden. Diese waren nur an ihrem unteren Ende perforiert. In kürzeren Rohren ergaben sich in Phasen abwärts gerichteter Wasser-Bewegung etwas höhere, in Phasen des Gleichgewichtes oder der allgemeinen PGS-Absenkung niedrigere Stände. Starke, bis zu mehreren dm betragende und wochenlang anhaltende Differenzen traten dagegen bei der Verwendung von Rohren auf, die von unten her etwa bis in die Höhe der PGS perforiert waren.

Sie reagieren nach stärkeren Niederschlägen sehr viel rascher mit einem Anstieg des Wasserspiegels als die nur unten per-

forierten Rohre und eilten diesen in den Phasen allgemeiner PGS-Absenkung ebenfalls in ihren Absenkungs-Beträgen voraus. Dabei verhielten sich die Differenz-Beträge gegenüber den Standard-Beobachtungs-Rohren völlig irregulär. Die Ursache für die Abweichungen liegt in dem aus Abb. 7 ersichtlichen Auftreten von Staufrenten, die sich innerhalb des Solums auf- und abbauen. Der im oberen Profil-Abschnitt durch "Luft-Kissen" getragene Überschuß an Niederschlags-Wasser entleert sich von oben in die durchgehend perforierten Rohre und hebt den Spiegel rasch. Nach dem Abbau der Staufrenten findet das in diesen Rohren befindliche Wasser eine bessere Aufnahme-Möglichkeit in die unterhalb der PGS gelegenen Horizonte als das Wasser, das in den lediglich am unteren Ende perforierten Rohren steht.

Das "Von-Oben-Hineinfließen" gestauten Gravitations-Wassers schließt auch die Bestimmung der Wasser-Leitfähigkeit im Grundwasser-Bereich mit Hilfe der Bohrloch-Methode nach HOOGHUUDT aus. Meß-Versuche zu verschiedenen Zeiten lehrten: Das im lockeren A-Horizont bzw. über dem Sy-Horizont gestaute nicht oder nur schwach gespannte Wasser besitzt durchweg eine größere Mobilität als das unterhalb der PGS im Luft-Okklusions-Bereich befindliche "Grundwasser". Der Zufluß zu den Bohrlöchern erfolgt daher überwiegend durch Hineinströmen des Wassers aus den oberflächennahen Horizonten.

In hydrostatischer Hinsicht erscheint folgende Tatsache bedeutungsvoll: Durch den Einschluß von Poren-Luft ist die spezifische Speicher-Fähigkeit der Löß-Decken für Niederschlags-Wasser erheblich reduziert. Dies hat zur Folge, daß normale Niederschlags-Intensitäten eine relativ starke und rasche Anhebung der PGS und damit des hydrostatischen Druckes im Löß bewirken können. So wurde gelegentlich bei einer Tages-Niederschlags-Menge von 11 mm ein Anhebungs-Betrag der PGS von 25-30 cm beobachtet.

Bei diesem "Ansteigen" der PGS wird natürlich die im Anstiegs-Bereich bereits okkludiert vorliegende Luft, aber auch darüber hinaus vorhandene freie Kapillar-Luft eingeschlossen - ein

weiterer Aspekt zu der oben angeschnittenen Frage der natürlichen Regeneration der unterhalb der PGS vorhandenen Okklusions-Luft.

Immer wieder ist es also die Luft-Okklusion, die eine theoretische Betrachtung der hydraulischen Vorgänge in Löß-Decken mit hoher PGS so außerordentlich kompliziert. Es ist uns daher im Augenblick auch noch garnicht möglich, Aussagen über die Abhängigkeiten zwischen den Potential-Gradienten und dem Wasser-Transport, also über die natürliche hydraulische Leitfähigkeit im partiell wassergesättigten Zustand zu machen. Für eine modellmäßige Behandlung des Problems im Labor bestehen zunächst noch wenig Chancen, da es schwer ist, Luft-Okklusions-Zustände zu erzeugen, wie sie sich unter natürlichen Verhältnissen einstellen.

Welche Beiträge können die auf den Arealen IV und VIII (Abb. 7a und 7e) angestellten TOH-Messungen zur Frage der Wasser-Bewegung liefern? Im Profil Rosdorf - Schule (Areal IV, Abb. 7a) sind bei einer PGS, die langfristig unterhalb 2 m liegt, die Verlagerungs-Kurve des TOH-Tracer-Maximums (TM) und die Meß-Intensitäten fast identisch mit denen vom Profil Einbeck. Das heißt: Die höhere Lage des Grundwasser-Spiegels und der höhere Wasser-Sättigungs-Grad des Bodens oberhalb der PGS nehmen keinen Einfluß auf den Vorgang der kapillaren Abwärts-Verdrängung (downward displacement). Anders gestaltet sich jedoch das Verhalten des TM, wenn es die PGS erreicht. Dies zeigt sich bei der Betrachtung der TM-Kurve in Abb. 7e bei höherer PGS. Das TM bleibt, wenn es die PGS erreicht hat, auf dessen Linie liegen und dringt nicht mehr auf dem Wege des downward displacement in den Grundwasser-Bereich hinein. Es löst sich in dieser Lage im Laufe der Zeit langsam auf, d.h. seine Intensität schwächt kontinuierlich bis auf Null ab.

Man kann diese Erscheinung wie folgt erklären: Von der PGS an abwärts und seitwärts konzentriert sich der Wasser-Transport und hydrostatische Druck-Ausgleich fast ausschließlich auf das anteilmäßig geringe, aber gut wasserleitende Grob-

Poren-System. Hierin treten offensichtlich recht hohe Transport-Geschwindigkeiten auf, während das im "langsam dränenden Poren-Anteil" gebundene Wasser infolge der Luft-Okklusion nahezu ruht. Die dadurch bewirkte hydrodynamische Disproportionierung des Senkwassers unterbindet die Isotopen-Verdünnung, d.h. den Austausch zwischen dem bewegten Grobporen-Wasser und dem m.o.w. ruhenden Poren-Wasser. Sie führt dadurch zur Auflösung der TOH-Verdrängungs-Front und sorgt für eine relativ rasche Verteilung des TOH über den gesamten Grundwasser-Bereich, nachdem das Tracer-Maximum dessen Oberfläche erreicht hat.

Zu betonen bleibt, daß an beiden Meßstellen oberhalb der PGS kein seitlicher hydraulischer Transport des TOH zu beobachten war. Wie in Einbeck war lediglich eine symmetrische seitliche Auffächerung des "TOH-Keiles" zur Tiefe hin zu beobachten, die jedoch nicht über das Maß diffusiver Ausbreitung hinausging.

4.3.5 Wasserhaushalts-Bilanz ROSDORF (Areale IV u. VIII) aufgrund von TOH-Messungen

Die Errechnung der Wasserhaushalts-Bilanzen für die beiden Rosdorfer Areale - bei denen es sich um dasjenige mit dem tiefsten und dasjenige mit dem höchsten Grundwasser-Stand handelt - ist in der gleichen Weise und unter den gleichen Voraussetzungen wie bei Einbeck (Areal I) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6 und 7 in Form einer stark eingeschränkten Daten-Auswahl dargestellt.

Areal IV, Tab. 6, weist den tieferen Grundwasser-Stand auf. Wie anhand von Abb. 7 a gezeigt wurde, stimmt der Verlauf der TM-Absenkungs-Kurve mit der von Einbeck überein. So überrascht auch der Befund nicht, daß die einzelnen Größen der Wasserhaushalts-Bilanz nahezu die selben Beträge wie dort erreichen. Lediglich die Vorrats-Beanspruchung ist infolge der etwas höheren Niederschlags-Mengen in Rosdorf geringer.

Tab.: 6
Daten zur Bilanz
des Wasser-Haus-
haltes von Profil
Rosdorf(IV) auf-
grund von HTO-
Messungen

	N	S					A	V			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		NIEDERSCHLAG (mm)	Tiefe des HTO-MAXIMUMS unter 0. (mm)	DIFFERENZ	mm H ₂ O oberhalb HTO-MAXIMUM	DIFFERENZ	mm H ₂ O oberhalb 200 cm Tiefe	DIFFERENZ (VORRATS- ÄNDERUNG)	mm H ₂ O 200 HTO-MAX. 200 cm Tiefe	DIFF. (WASSER- ABFLUSS-GRENZE 200 cm)	VERDUNSTUNG (Sp. 1 - Sp. 5)
NORMAL 65/66	7. III. 66	25	15		45	590			545	- 2	19
	18. III. 66	35	16	+ 1	51	594	+ 4	543	-	2	32
				+ 2		3		+ 4		+ 1	
SOMMER- HALBJAHR 66 MASS / TROCKEN	1. IV. 66	68	18	+ 7	54	598	- 3	544	- 24	47	
	25. IV. 66	70	25	+ 9	75	595	- 52	520	- 61	61	
	31. V. 66	93	34	+ 10	84	543	- 1	459	- 46	48	
	30. VI. 66	112	44	+ 14	129	542	+ 72	413	+ 16	56	
	22. VII. 66	87	58	+ 6	185	614	- 109	429	- 36	160	
	6. X. 66	64	64		112	505		393			
	aus dem Niederschlag... aus dem Boden-Vorrat... (o - 200 cm)	430						- 93		58 + 93 151	172
WINTER- HALBJAHR 66/67 MASS / NORMAL	1. XI. 66	76	68	+ 4	185	558	+ 53	373	- 20	3	
	14. XII. 66	108	93	+ 25	290	621	+ 63	331	- 42	3	
	13. I. 67	87	114	+ 21	363	611	- 10	248	- 83	14	
	8. III. 67	88	132	+ 18	400	603	- 8	203	- 45	51	
	aus dem Niederschlag... in den Boden-Vorrat...	359						+ 98		190	71
SOMMER 67 MASS	19. IV. 67	77	140	+ 8	409	584	- 19	175	- 28	68	
	9. VI. 67	196	150	+ 10	435	577	- 7	142	- 33	170	
	5. VII. 67	77	155	+ 5	434	548	- 29	114	- 28	78	
	aus dem Niederschlag... aus dem Boden-Vorrat...	350						- 55		34 55 89	316

Der Einfluß der Tiefen-Lage des Grundwasser-Spiegels bei Tiefen unterhalb von 2 m, die abweichende strukturelle Beschaffenheit des Oberbodens und dessen pedohydrologischer Zustand scheinen demnach nur von geringerem Einfluß auf die Wasserhaushalts-Bilanzen der Löß-Decken zu sein. Die am Beispiel des Profils von Einbeck mit seiner großen GS abgeleiteten Folgerungen für die Wasser-Bilanz mächtiger Löß-Decken scheinen demnach im südniedersächsischen Raum eine allgemeinere Gültigkeit für alle solche Löß-Decken zu besitzen, deren Grundwasser-Spiegel unterhalb einer kritischen Tiefe (ca. 2 m) liegt. Deren genaue Tiefe bleibt zu ermitteln.

Im vorliegenden Fall bringt uns diese Aussage insofern in Verlegenheit, als der Löß-Bodentyp in Einbeck eine Parabraunerde ist, die eine Entkalkungs-Tiefe von 1.8 bis 2.0 m aufweist. Der Boden in Rosdorf stellt dagegen eine entkalkte und verbrauchte Feucht-Schwarzerde dar, deren Entkalkungs-Tiefe maximal nur 90 cm beträgt. Die rezenten Sickerwasser-Raten und der Betrag der bislang erfolgten holozänen Kalk-Abfuhr sind im letzteren Fall also nicht miteinander in Einklang zu bringen. Nun haben jedoch die an dieser Stelle durchgeführten archäologischen Grabungen den sicheren Nachweis erbracht, daß die Absenkung der Entkalkungs-Grenze hier erst nach der linienband-keramischen Siedlungs-Epoche (ca. 4500 v.Chr.), wahrscheinlich sogar erst nach der Bronzezeit (ca. 100 v.Chr.) erfolgt ist. Die Ursache ist in einer nachträglichen Absenkung des Grundwasser-Spiegels zu sehen, die in diesem Abschnitt des Löß-Rückens durch Veränderungen des gesamten Grundwasser-Regimes (s.o.) ausgelöst worden ist. Es müßte sich dann allerdings im Boden-Profil ein ehemaliger, über dem heutigen S_Y -Horizont liegender zweiter Verdichtungs-Horizont - dem ehemaligen Grundwasser-Stand entsprechend - nachweisen lassen. Dies ist nicht der Fall. Doch haben pedostratigraphische Aufnahmen der archäologischen Längsprofil-Schnitte folgendes erkennen lassen: Der weiter oberhalb im Löß-Rücken unterhalb des A_H -Horizontes ausgeprägte kalkhaltige S_Y -Horizont geht kontinuierlich in den heutigen B_t/B_V -Horizont unseres Profils über. Wir können somit für unseren Standort annehmen, daß die durch Grundwasser-Absenkung eingeleitete Kalk-Auswaschung zu einer Überprägung des ehemaligen S_Y -Horizontes geführt hat, die in einer Verbraunung, Ton-Infiltration und Gefüge-Umwandlung besteht. Somit verbirgt sich der ehemalige S_Y - im heutigen B-Horizont.

Betrachten wir nun die Bilanz-Tabelle 7, die für das Löß-Profil mit dem höchsten Grundwasser-Stand unserer Serie gilt, so ergibt sich folgender Befund:

Tab.: 7

Daten zur Bilanz
des Wasser-Haus-
haltes von Profil
Rosdorf(VIII) auf-
grund von HTO-
Messungen

		(N)					(S)	(A)		(V)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		NIEDERSCHLAG (mm)	Tiefe des HTO-MAXIMUMS unter 0. (mm)	DIFFERENZ	mm H ₂ O oberhalb HTO-MAXIMUM	DIFFERENZ	mm H ₂ O oberhalb 140 cm Tiefe	DIFFERENZ (VORRATS- ÄNDERUNG)	mm H ₂ O zw. HTO-MAX. u. 140 cm Tiefe	DIFF. (WASSER- ABFLUSS-GRENZE 200 cm)	VERDUNSTUNG (Sp. 1 - Sp. 5)
NORMAL	65/66	7. III. 66	18		80				500		
		25. III. 66	32	+ 4	85	5	- 12		483	- 17	27
NASS / TROCKEN	SOMMER-HALBJAHR 66	28		+ 3		15	+ 16			+ 1	13
		1. IV. 66	7	+ 1	100	6	- 2	484	- 8	1	
		7. IV. 66	82	+ 16	106	68	- 12	476	- 80	14	
		9. V. 66	17	- 1	174	- 34	- 21	396	+ 13	51	
		23. V. 66	49	- 1	140	+ 0	- 55	409	- 55	49	
		15. VI. 66	192	+ 15	140	85	+ 74	354	- 11	107	
		26. VII. 66	26	+ 0	225	- 32	- 64	343	- 32	58	
		15. VIII. 66	57	+ 3	193	10	- 73	311	- 83	47	
		11. X. 66			203			228			
				430				- 153			
									103 + 153 256		

aus dem Niederschlag
aus dem Boden-Vorrat
(0 - 140 cm)

Der hochliegende Grundwasser-Spiegel begrenzt hier den bilanzierfähigen Zeitraum auf das Sommer-Halbjahr 1966. Vergleicht man dessen Wasserhaushalts-Bilanz mit dem entsprechenden Bilanz-Abschnitt der Areale I und IV (Tab. 4 u.6), so fällt folgendes auf: Bei etwa gleicher Vorrats-Bearspruchung - man bedenke, daß die Bilanz-Tiefe hier nur 140 cm statt 200 cm beträgt! - ist die Verdunstungs-Größe V um etwa 13 % reduziert, die Abfluß-Größe A (Grundwasser-Spende) dagegen um etwa 64 % erhöht.

Diese Angaben sind allerdings mit größeren Fehler-Möglichkeiten behaftet als die für die anderen Areale. Die hydrologische Flachgründigkeit und Inhomogenität des bilanzierfähigen Solums vergrößert die Möglichkeit der Wasser-Bewegung in anderer Form als der kapillaren Abwärts- oder Aufwärts-Verdrängung. Da jedoch die Phasen der aufwärts gerichteten Wasser-Bewegung im Vergleich zu denen des abwärts gerichteten Transportes relativ kurz sind, ist aufgrund der theoretischen Überlegungen (vgl. S. 136/137) damit zu rechnen, daß die Verdunstungs-Mengen eher noch zu hoch als zu niedrig angegeben sind, und die Abfluß-Spende noch höhere Werte erreicht.

Soweit man aufgrund der relativ kurzen Meß-Zeiträume überhaupt ein Urteil abgeben darf, verhalten sich die Löß-Decken mit Grundwasser-Ständen oberhalb der noch zu ermittelnden kritischen Tiefe von < oder = 2 m Tiefe hydrologisch anders als die Decken, die einen tieferen GS besitzen. Von den beiden auf Seite 90 dargelegten konträren Überlegungen, die den Wasserhaushalt bei hohem Grundwasser-Spiegel betreffen, erweist sich die erste als gültig: Ein hochliegender Grundwasser-Spiegel vergrößert infolge stärkerer kapillarer Aufsättigung des darüber befindlichen Löß-Solums den wasserleitenden Gesamt-Querschnitt gut leitender Poren-Anteile, begünstigt dadurch die Ableitung der Niederschläge und erhöht die Grundwasser-Spende. Dies gilt wie alle bisherigen Aussagen zunächst nur für Grasland, auf das allein sich unsere bisherigen Untersuchungen beschränken.

Die gegenteilige Annahme, daß die Vegetations-Decke bei hohem Grundwasser-Stand infolge Luxus-Konsums von Wasser die Verdunstungs-Mengen hochtreiben müßte, hat sich für Grasland somit nicht bestätigt. Offensichtlich reduziert das ausgeglichene Angebot von Wasser die Ausbreitung und

Vertiefung des Wurzel-Systems, wie das von Grasnarben bei hohem Grundwasser-Stand bekannt ist. Damit fällt der "Docht-Effekt" der Vegetation fort.

Zu klären bleibt abschließend die Frage, warum trotz erhöhter Abfluß-Spenden bei hoher PGS die Kalk-Vorräte des Solums nicht angegriffen werden, sondern im Gegenteil noch eine aufwärts gerichtete Kalk-Anreicherung stattfinden kann. Einerseits könnte die kürzere Kontakt-Dauer zwischen dem abwärts strömenden Sickerwasser und dem Carbonat-Bodenkörper zur Erklärung herangezogen werden. Gravierender ist jedoch die Tatsache, daß sich unterhalb der phreatischen Oberfläche ein mit Ca-hydrogencarbonat gesättigter Grundwasser-Körper befindet, der sich in seinem Chemismus - unbeeinflußt von dem darüber befindlichen Solum - stets durch seitlichen Grundwasser-Zuzug und -Entzug regeneriert. Somit stellt die phreatische Oberfläche ein Bezugs-Niveau dar, von dem aus (besonders im "ruhenden" Poren-Wasser des Poren-Bereiches $< 50 \mu$) ein ständiger diffusiver Aufstieg von Ca-hydrogencarbonat möglich ist, das aufgrund von Partialdruck-Gefällen des CO_2 im Solum oberhalb der PGS abgeschieden wird - eventuell begünstigt durch den vorhandenen Feuchtigkeits-Wechsel. Die Ungleichung: "Kalk-Aufstieg durch Diffusion + Kalk-Aufstieg durch Lösungs-Transport beim Verdunstungs-Hub >> Kalk-Abfuhr durch Sicker-Lösungs-Transport" wird unter unseren Klima-Bedingungen mit ihrer geringen Verdunstungs-Förderung von CaCO_3 demnach überwiegend durch ein Übergewicht der aufsteigenden Diffusion über die abwärts gerichtete Auswaschung zu erklären sein.

5 Z U S A M M E N F A S S U N G

An 8 Löß-Decken großer Mächtigkeit werden unter Gras-Bedeckung im mitteldeutschen Klima-Raum die vertikale Wasser-Bewegung und die Teilgrößen der Wasserhaushalts-Bilanz, Versickerungs- und Evapotranspirations-Raten, gemessen. Als modifizierende Größe wird dabei die Tiefen-Lage des Grundwasser-Spiegels (0,8 m bis > 12 m Tiefe) betrachtet. Die Oberflächen-Böden dieser Löß-Decken sind Übergangs-Stufen zwischen der kalkreichen Feucht-Schwarz-erde - bei hohem Stand des hydrogencarbonat-haltigen Grundwassers - und der Parabraunerde (Griserde) bei Grundwasser-Ständen > 5 m. Die holozäne Entkalkungs-Tiefe sinkt bei Grundwasser-Ständen < 5 m mit zunehmender Grundwasser-Tiefe und bleibt bei noch tieferen Grundwasser-Ständen annähernd konstant bei 2 m stehen.

Die Messungen umfassen: Tiefen-Bestimmungen des phreatischen Niveaus in Piezometer-Rohren unterschiedlicher Perforation, Ermittlungen der pF-Charakteristik und fortlaufende gravimetrische Feuchte-Bestimmungen bis maximal 12 m Tiefe, Vergleich der Real-Saugspannungen und der aus den Wassergehalts-Daten errechneten Äquivalent-Saugspannungen und Messungen der kapillaren Abwärts-Verdrängung - downward displacement, unsaturated flow - mit Hilfe der TOH-Markierung als Grundlage der Wasserhaushalts-Bilanzierung.

Die übliche Umrechnung von Wasser-Gehalten über die pF-Charakteristik in Äquivalent-Saugspannungen führt besonders bei den lockeren parapräimären Lössen zu gravierenden Fehlern. Bei der Wasser-Aufnahme des teil-entwässerten Löß-Materials findet Luft-Okklusion statt. Diese bedingt eine Sorptions-Desorptions-Hysterese der pF-Kurve und führt zu einer erheblichen Erhöhung der Äquivalent-Saugspannung gegenüber der Real-Saugspannung. Bei den untersuchten Lössen liegt der Luft-Okklusions-Bereich zwischen pF 2,5 und 2,9. Die Luft-Okklusion führt zum Wasser-Stau und erschwert die Erstellung von Korrelationen zwischen Wasser-Gehalt und ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit (UHL). Die durch

Hysteresee bedingte Differenz zwischen Äquivalent- und Real-Saugspannung hängt von der Steilheit der pF-Charakteristik im Bereich möglicher Luft-Okklusion ab.

Die pF-Kurve und damit die Neigung zur Luft-Okklusion werden von der Porengrößen-Verteilung des Löß-Materials bestimmt. Diese wiederum ist eine Funktion der Durchfeuchtung der Löß-Decke. Je höher das phreatische Niveau, desto stärker ist die Durchfeuchtung und die plastische Verdichtung des oberen Löß-Profil-Abschnittes. Unter isovolumer Umverteilung der Poren erfolgt eine Abnahme der Poren mit pF 2,5 - 3 zugunsten derjenigen mit pF 3 - 3,7.

In den Ψ -Diagrammen der Löß-Decken mit tiefem Grundwasser-Stand bilden sich in den Jahreszeiten mit starkem Sickerwasser-Angebot "Stauzonen" über weniger durchlässigen "Stausohlen" aus. Zu derartigen Erscheinungen kommt es an solchen Schicht- und Horizont-Grenzen, an denen verdichtetes Löß-Material - z.B. der B_v -Horizont oberhalb der Entkalkungs-Grenze oder fossile pedogene Verdichtungs-Horizonte - über lockerem Löß liegen. Entgegen der herkömmlichen Auffassung wirken nicht die Verdichtungs-Schichten als "Stausohle", sondern der darunter befindliche Löß mit seiner okkludierten, kompressiblen Poren-Luft, die "kissenartig" das in den darüber befindlichen Verdichtungs-Zonen ("Stauzonen") enthaltene Wasser "trägt" und nur langsam nach unten durchsickern läßt. Diese Art des Wasser-Staus bewirkt - da sie tief genug, d.h. außerhalb des Evaporations-Hubs erfolgt - lediglich eine mehrwöchige Verzögerung, nicht aber eine Verminderung des vertikalen Abflusses.

Ob sich bei den vorgegebenen Gefüge-Sprüngen in den Löß-Decken tatsächlich solche Luft-Okklusions-Sickerwasser-Stausohlen ausbilden, hängt von der Tiefe des Grundwasser-Standes ab. Liegt dieser hoch - z.B. < 4 m unterhalb der Entkalkungs-Grenze - so daß die unterhalb des Gefügesprunges anstehenden, zur Luft-Okklusion neigenden Löss nie so weit entwässert werden, daß sich die Poren mit Saugspannungen zwischen pF 2,5 und 2,9 mit Luft füllen, so tritt auch kein

Luftkissen-Stau ein. Mit dem Ansteigen des Grundwassers von 12 auf ca. 4 - 5 m u.O. sinkt die Dauer und Intensität des Wasser-Staues an Luft-Okklusions-Fronten.

Die Tiefen-Lage der Entkalkungs-Grenze ist bei Löß-Parabraunerden aus Löß-Decken mit mehr als 5 m Grundwasser-Tiefe lediglich ein Ausdruck für die Intensität des "downward displacement", die Sickerwasser-Menge und die daraus berechenbare Menge der abgeführten Carbonate des Standortes. Sie liegt in Übereinstimmung mit der hydrologisch bedingten Kalk-Bilanz bei ca. 2 m Tiefe und ist unabhängig von der Grundwasser-Tiefe > 5 m und unabhängig davon, ob im Niveau der CaCO_3 -Grenze oder darunter Luft-Okklusions-Wasserstau stattfindet oder nicht.

Die Wasserhaushalts-Bilanz der Löß-Decken mit Parabraunerden und tiefem Grundwasser-Stand (> 5 m) ist wie folgt charakterisierbar:

Die unter dem B-Horizont in 2 m Tiefe im kalkhaltigen Löß eingeschlossene Poren-Luft wirkt als "Stausohle", indem sie die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit stark reduziert. Unterhalb dieser 2 m-Grenze treten im Löß kaum noch Feuchte-Schwankungen auf. Somit eignet sie sich gut als Untergrenze der hydrologisch zu bilanzierenden Boden-Decke. Die entkalkte 2 m-Boden-Decke fungiert als Wasser-Speicher, der sich im Winter-Halbjahr (250 mm Niederschlag) füllt, bis die Niederschlags-Zufluß-Raten gleich der Versickerungs-Abfluß-Quote werden. Im Zustand der Frühjahrs-Sättigung beträgt die Gesamt-Speichermenge ca. 700 mm. Im Sommer-Halbjahr verdunsten die gesamte fallende Niederschlags-Menge (400 mm) und ca. 50 mm des Vorrates. Trotz dieses Evapotranspirations-Verlustes nach oben entleert sich der "Vorrats-Behälter" langsam und mit abnehmenden Raten nach unten. Nur in den oberen 120 - 140 cm der Parabraunerden herrscht auf- und absteigende Bodenwasser-Bewegung. Im unteren Teil des B-Horizontes und im Löß ist ein permanenter, nur durch gelegentliche sommerliche Stagnation unterbrochener Wasser-Abstieg festzustellen. Im Durchschnitt der Jahre laufen während der Winter-Monate ca. 80 mm,

Während der Sommer-Monate ca. 60 mm aus dem Speicher-Raum zum Grundwasser ab. Das sind rund 21 0/o der Niederschlags-Summe. Rund 79 0/o der Niederschläge verdunsten. Die Gesamt-Speicher-Menge der 2-m-Boden-Decke pendelt dabei zwischen 700 und 550 mm (≈ 7 Ges.-Vol. 0/o Schwankungs-Breite). Die jährlichen Versickerungs-Mengen sind etwa doppelt so hoch wie sie in Lysimeter-Versuchen gefunden wurden. Zukünftig ist besonderes Gewicht auf die exakte Messung der sommerlichen Verdunstungs-Raten zu legen. - Das die 2 m Grenze passierende Gravitations-Wasser ist als sofortige Grundwasser-Spende zu bewerten. Der Löß zwischen Solum und Grundwasser, der als Wasserleiter nach dem Prinzip der "unge-sättigten" kapillaren Abwärts-Verdrängung wirkt, verändert nämlich seinen Wasser-Gehalt infolge Luft-Okklusion und guter UHL kaum.

Die Hydro-Bilanz und die hydraulischen Eigenschaften der Löß-Decken mit hohem (hydrogencarbonat-haltigem) Grundwasser-Stand (< 4 m im Mittel) und Feucht-Schwarzerden unterscheiden sich von denen mit tiefem Grundwasser wie folgt: Man hat zwischen der phreatischen oder piezometrischen Oberfläche (piezometrischer Grundwasser-Spiegel) (PGS) und dem Spiegel des echten, alle Bodenporen füllenden Grundwassers (GS) zu unterscheiden. Zwischen beiden können mehrere Meter feuchter Löß liegen. Bei 5 bis 2 m PGS treten noch die gleichen jährlichen Sickerwasser-Mengen auf wie bei > 5 m Grundwasser-Tiefe, doch kann die Entkalkungs-Tiefe weniger tief abgesenkt sein. Bei < 2 m PGS erhöhen sich die Versickerungs-Mengen, weil der im kapillaren Wasser-Sättigungs-Gleichgewicht stärkere Aufsättigungs-Grad der Poren, hier auch der Dränporen, die hydraulische Leitfähigkeit erhöht. Trotzdem ist die Kalk-Auswaschung verringert oder gleich Null. Zum einen ist die Lösungs-Kontakt-Dauer mit dem Boden-Körper geringer, zum anderen ist bei einer hohen PGS und bei hydrogencarbonat-haltigem Grundwasser ein ständiger aufwärts gerichteter diffusiver Ca-Transport gewährleistet.

Auch hier kommt es zum Einschluß von Poren-Luft und zwar in einem weiten pF-Bereich zwischen 1,8 bis 2,9, der sich mittels einer pF-Kurven-Aufnahme, ausgehend vom natürlichen Sättigungs-Zustand, erfassen läßt. Damit fallen oberhalb des PGS 40 - 80 % des Dränporen-Anteiles für eine Dränage aus. Es kommt zu poredruck-abhängigen Stau-Erscheinungen, die sich mit Piezometer-Rohren unterschiedlicher Perforation erfassen lassen.

Unter den verschiedenen Möglichkeiten des Luft-Einschlusses ist hier besonders die Einkesselung zwischen langsam absinkendem Gravitations-Wasser und von oben eindringendem Niederschlags-Wasser bei hohen Sättigungs-Graden zu nennen. Als Folge findet eine außerordentlich rasche Anhebung des PGS statt.

Zu den Begleit-Erscheinungen der Luft-Okklusion gehört die Bildung von S_y -Horizonten, Stau-Horizonten, die durch eine pedogene Verdichtung hervorgerufen werden. Sie liegen im Schwankungs-Bereich des PGS und entstehen dadurch, daß beim Anheben des PGS die im S_y -Bereich okkludierte Luft komprimiert wird und sich unter Durchknetung des Gefüges zu größeren Bläschen vereinigt.

Weitere Begleit-Erscheinungen der Luft-Okklusion äußern sich in der Luft-Quellung druckentlasteter Stechzylinder-Proben und in der Elastizität von Gruben-Wänden unterhalb des PGS.

Die hydrodynamischen Verhältnisse solcher Standorte werden dadurch kompliziert, daß zwischen PGS (S_y -Hor.) und GS (Gr-Hor.) Distanzen von mehreren Metern liegen können. Dazwischen kann der Löß - je nach der hydrostatischen Poren-Auflast - bis zu 10 und mehr Gesamt-Volumen-% stationär gebundener Poren-Luft enthalten. Der hohe Luft-Gehalt dieser Zone (SC-Horizont) erhält die gelbe Eigenfarbe des Lösses unterhalb und ermöglicht die Entwicklung von Wurzeln unterhalb des PGS. Die laterale und absteigende "Grundwasser"-Bewegung zwischen PGS und GS erfolgt mit großer Geschwindigkeit in dem Poren-System > 50 μ .

Die Wasser-Bewegung in allen feineren Poren-Größen ist dagegen durch die Luft-Okklusion stark behindert. Das absinkende TOH-Tracer-Maximum löst sich daher bereits bei Erreichen der phreatischen Oberfläche auf.

6 L I T E R A T U R - V E R Z E I C H N I S

1. ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENKUNDE Die Bodenkarte 1:25000, Anleitung und Richtlinien zu ihrer Herstellung, Bundesanstalt für Bodenkunde, Hannover (1965)
2. ARBEITSGRUPPE FÜR BODENHORIZONT-BEZEICHNUNG Mitt.Int.Bodenkundl.-Gesellschaft 31, 10-14 (1967)
3. BENECKE, P., u. LORCH, S. Untersuchungen der Versickerung von Niederschlägen mittels J-131 in einer tonig-schluffigen gedränten Seemarsch, Geol.Jhb., 81, 601-620 (1964)
4. BLUME, H.-P. Stauwasserböden, Arbeiten der Univ. Hohenheim (Landwirtsch. Hochschule) Bd.42, 242 S., Verlag Eugen Ulmer Stuttgart (1968)
5. BLUME, H.-P., MÜNNICH, K.-O., u. ZIMMERMANN, U. Tritium tagging of soil moisture-the water budget of forest soils, in "Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies", IAE0 Wien, 315-332 (1967)
6. BLUME, H.-P., MÜNNICH, K.-O., u. ZIMMERMANN, U. Das Verhalten des Wassers in einer Lößparabraunerde unter Laubwald, Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 112, 156-168 (1966)
7. COREY, J.C., u. HORTON, J.H. Movement of water tagged with H-2, H-3, 0-18 through acid kaolinitic soil, Soil Sc.Soc.America Proceed. 32, 471-475 (1968)
8. GEBHARDT, H. Bilanzanalytische Untersuchungen zur Silikatverwitterung und zum Stofftransport in feuchten und nassen Holozänböden aus Löß mit besonderer Bedeutung der Feldspatverwitterung, Diss. Landwirtsch.Fakult.Göttingen (1964)
9. HAAREN, van E.W.J. Das Verhalten radioaktiver Isotope im Boden, Wanderung und Fixierung, in "Symposium über Radioaktivität und Schutz des Wassers", Karlsruhe (1963)
10. HAMID, A., u. WARKENTIN, B.P. Retention of J-131 used as tracer in water-movement studies, Soil Sc. 104, 279-282 (1967)
11. HARTGE, K.H., u. BAILLY, F. Beziehungen zwischen Staunäsemerkmalen, Wasserleitfähigkeit und Porenkontinuität in Lößparabraunerden im südlichen Niedersachsen, Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 116, 10-25 (1967)
12. HARTGE, K.H., u. BAILLY, F. Porenvolumen und Porengrößenverteilung in Lößparabraunerden im südl. Niedersachsen, Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 115, 17-28 (1967)

13. HARTGE, K.H.,u. BAILLY, F. Durchlässigkeit und Stauvermögen, Z. Kulturtechnik u. Flurbereinigung 8, 175-179 (1967)
14. HARTGE, K.H.,u. BENECKE, P. Wasserspannungsgradienten in einem Schluff- und in einem Sandboden, Wasser und Boden 20, 18-21 (1968)
15. HORTON, J.H.,u. HAWKINS, R.H. Flow path of rain from the soil surface to the water table, Soil Sc. 100, 377-383 (1965)
16. KIEFER, H.,u. MAUSHART, R. Strahlenschutzmeßtechnik, 599 S., Verlag G. Braun, Karlsruhe (1964)
17. KRAMER, W.,u. MEYER, B. Messungen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von Bodenproben natürlicher Lagerung mit Hilfe einer Doppelmembran-Apparatur, Göttinger Bodenkundl. Berichte 1, 127-154 (1968)
18. KUNZE, R.J.,u. KIRKHAM, D. Deuterium and self-diffusion coefficient of soil moisture, Soil Sc. Soc. America Proceed. 25, 9-12 (1961)
19. MEYER, B. Bodenkundliche Untersuchungen an der Grabungsfläche 1965 in Rosdorf, Kreis Göttingen, Neue Ausgrabungen u. Forschungen in Niedersachsen 2, 70-81 (1966)
20. MEYER, B., RADDATZ, K.,u. ROHDENBURG, H. Eine eisenzeitliche Siedlung in Rosdorf bei Göttingen - ihre stratigraphische Stellung zum Kalksinter-Auelehm-Komplex und ihr keramischer Fundinhalt, Göttinger Jahrb. 33-42 (1963)
21. MOSCHREFI, N.,u. MEYER, B. Bedeutung der Wasserbewegung im ungesättigten Feuchtezustand (unsaturated flow), des Lufteinschlusses und des Grundwasserstandes für Niederschlagsversickerung und Grundwasserspende - Modellversuche an Lössäulen, Göttinger Bodenkundliche Berichte 1, 1-31 (1968)
22. MÜCKENHAUSEN, E. Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland, 148 S., DLG-Verlag Frankf./M. (1962)
23. MÜNNICH, K.O., ROETHER, W., KREUTZ, W. u.a. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes, Science 152, 346-351 (1966)
24. NAKAYAMA, F.S.,u. JACKSON, R.D. Diffusion of tritiated water in soils, Soil Sc. Soc. America Proceed. 27, 255-258 (1963)
25. NIELSEN, D.R.,u. BIGGAR, J.W. Miscible displacement in soils, Soil Sc. Soc. America Proceed. I. Experimental information, 25, 1-4 (1961)
II. Behavior of tracers, 26, 125-128 (1962)
III. Theoretical considerations, 26, 216-221 (1962)

26. PAPP, M. Wasserhaushalts-Untersuchungen an holozänen Parabraunerden aus wärmzeitlichem Löß in Niedersachsen, Diss. Landwirtschaft. Fakultät Göttingen (1963)
27. PECK, A.J., u. RABBIDGE, R.M. Direct measurement of moisture potential: a new technique, Symposium "Water in the unsaturated zone" Wageningen (1966)
28. ROHDENBURG, H., u. MEYER, B. Zur Feinstratigraphie und Paläopedologie des Jungpleistozäns nach Untersuchungen an südniedersächsischen und nordhessischen Lößprofilen, Göttinger Bodenkundliche Berichte, 2, 1-137 (1968)
29. ROSE, C.W. Agricultural Physics, 226 S., Pergamon Press, London (1966)
30. SCHARPENSEEL, H.W., u. GEWEHR, H. Studien zur Wasserbewegung im Boden mit Tritium-Wasser, Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 88, 35-49 (1960)
31. SCHEFFER, F., u. MEYER, B. Ergebnisse pedologischer Untersuchungen an der Grabungsfläche Rosdorf: pedogenetische und stratigraphische Phasengliederung und weitere Beiträge zur Herkunft dunkler Grabenfüllungen in Lößgebieten, Neue Ausgrabungen und Forschungen in Niedersachsen 2, 72-88 (1965)
32. SCHLICHTING, E., u. BLUME, H.P. Bodenkundliches Praktikum, 209 S., Verlag P. Parey, Hamburg-Berlin (1966)
33. SMITH, W.O., OLSEN, H.W., BAGNOLD, R.A., u. RICE, J.C. Certain flows of air and water in sands during infiltration, Soil Sc. 101, 441-449 (1966)
34. STREBEL, O. Beziehungen zwischen Bodengenese, Nutzungsart und Eigenschaften des Porensystems von Lößböden des Raumes Sarstedt, Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 112, 30-38 (1966)
35. WALTER, H., u. LIETH, H. Klimadiagramm Weltatlas, VEB, G. Fischer Verlag, Jena (1967)
36. WENZEL, M., u. SCHULZE, P.E. Tritium-Markierung, Verlag W. de Gruyter, 176 S., Berlin (1962)
37. ZIMMERMANN, U. Untersuchungen der Grundwasserbildung mit Wasserstoffisotopen, Dipl. Arbeit math.-nat. Fakultät Heidelberg (1966)

