

FREIBERGER
FORSCHUNGSHEFTE

C 104

GEOLOGIE

K. JOHANNES KLENGEL

**Beiträge zur Kenntnis des bodenphysikalischen
Verhaltens pleistozäner Lockergesteine unter
Berücksichtigung der Bedeutung für die geologische
und ingenieurgeologische Praxis**



FFH
C 104_j

BERGAKADEMIE-VERLAG BERLIN

1961

~~Deutsches
Brennstoffinstitut
Hauptforschung~~

D	712
--------------	----------------

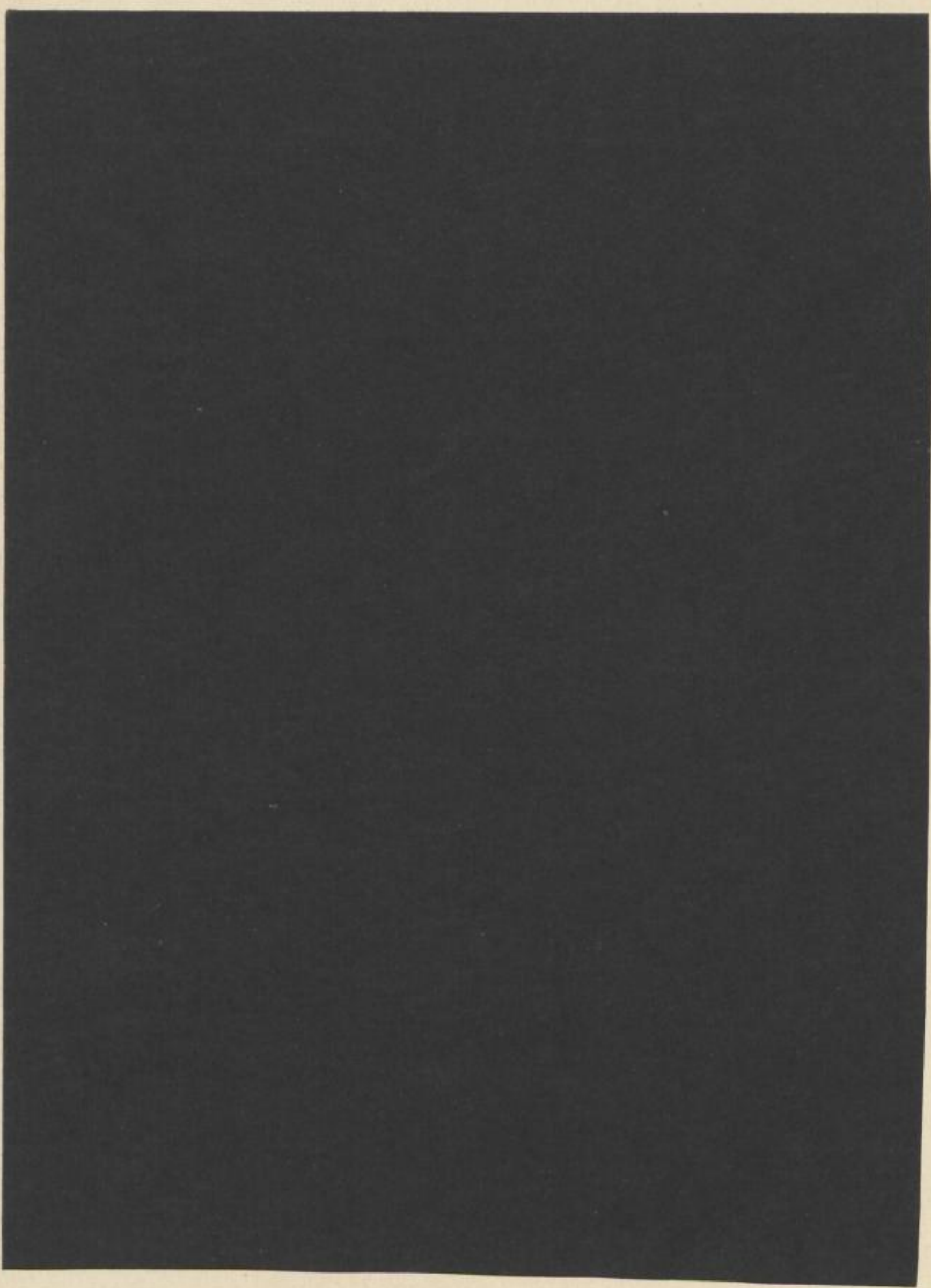


FREIBERGER FORSCH
C 104

TU BERGAKADEMIE FREIBERG

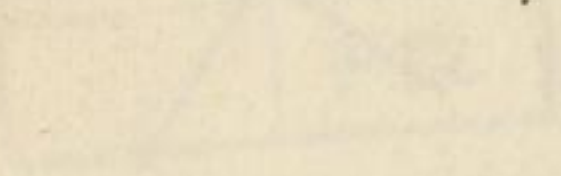


XVI1142.C104J



THE LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CHICAGO

1911



FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

C 104

GEOLOGIE

Beiträge zur Kenntnis des bodenphysikalischen Verhaltens pleistozäner Lockergesteine unter Berücksichtigung der Bedeutung für die geologische und ingenieurgeologische Praxis

Von

K. JOHANNES KLENGEL



Akademie-Verlag · Berlin

Freib. Forsch.-H.

C 104

S. 1—181

87 Bilder

14 Tabellen

Berlin, April 1961

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE
Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

C 104

GEOLOGIE

An der Bergakademie vorgelegte und genehmigte Dissertation
zur Erlangung der Würde eines Dr. rer. nat.

Referent: Prof. Dr. rer. nat. A. Watznauer, Freiberg

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. K. Keil, Dresden



XVI 1142 j
C104

Aus den Arbeiten des Geologischen Instituts der Bergakademie Nr. 62

„Freiberger Forschungshefte“, Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften. Herausgeber: Der Rektor der Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. habil. O. Oelsner. — Chefredakteur (kommissarisch): G. Läßker, Freiberg, Klubhaus der Bergakademie, Aug.-Bebel-Str. 5 (Fernruf 2497, Telex 057 8535). — Verlag: Akademie-Verlag GmbH, Berlin W 8, Leipziger Str. 3—4 (Fernruf 220441, Telex 011 773), Postscheckkonto 35021. — Die Freiberger Forschungshefte erscheinen in zwangloser Folge in den Reihen A, B, C und D. Ausführliches Verzeichnis aller lieferbaren Hefte von der Redaktion der Bergakademie oder dem Akademie-Verlag. — Preis dieses Heftes 19,50 — DM. Bestell-Nr. 2062/C 104. Vertrieb: In der Deutschen Demokratischen Republik durch den Buchhandel; in Westdeutschland durch den Buchhandel (Auslieferung KUNST UND WISSEN, Erich Bieber, Stuttgart S, Wilhelmstr. 4—6); im gesamten Ausland durch eine Importbuchhandlung, den Deutschen Buch-Export und -Import, GmbH, Leipzig C 1, Postschließfach 276, oder den Verlag. — Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“ Bad Langensalza. — Lizenz-Nr. 202 • 100/651/61. — Printed in Germany. Alle Rechte vorbehalten. ES 18 F 3, 20 E 6 Kartengenehmigung: Mdl der DDR Nr. 6266



Vorwort

An dieser Stelle möchte ich vor allem meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. K. KEIL, Direktor des Institutes für Ingenieurgeologie und Geotechnik des Verkehrsbauwesens, Dresden, für die Unterstützung meiner Arbeit danken.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr. A. WATZENAUER, Direktor des Geologischen Institutes der Bergakademie Freiberg, für eine Reihe wissenschaftlicher Anregungen und sein Interesse am Fortgang meiner Arbeiten, den Herren Professoren Dr. HECK und Dr. GEHL, Geologischer Dienst Schwerin, für die Unterstützung der Geländearbeiten und Probenahme und den verantwortlichen Herren des Seehydrographischen Dienstes, Stralsund-Dänholm, für die Unterstützung mit neuem Kartenmaterial zur Bearbeitung spezieller Fragen des Steilküstenrückganges im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klützhöved.

Nicht zuletzt möchte ich allen meinen Dresdener Kolleginnen und Kollegen für ihre große Hilfsbereitschaft bei der Durchführung des umfangreichen Untersuchungsprogrammes im Geotechnischen Laboratorium Dank sagen.

JOHANNES KLENGEL

INHALT

1 Allgemeines	10
1.1 Aufgabe und Ziel der Arbeit	10
1.2 Die Untersuchungsgebiete	11
1.21 Klütz-Höved	11
1.22 Altenburg	12
1.3 Probenahme	13
1.4 Begriffserläuterung	14
1.5 Laboruntersuchungen	14
1.51 Mineralchemische Untersuchungsverfahren	14
1.52 Bodenphysikalische Untersuchungsverfahren	17
2 Ergebnisse der petrographischen, mineralchemischen und bodenphysikalischen Untersuchungen	38
2.1 Die petrographische Ausbildung der untersuchten Lockergesteine	38
2.11 Geschiebemergel Klütz	38
2.12 Geschiebelehm Klütz	41
2.13 Schluffe Klütz	41
2.14 Sande Klütz	44
2.15 Geschiebemergel Altenburg	44
2.16 Geschiebelehm Altenburg	45
2.2 Der mineralchemische Aufbau der untersuchten Lockergesteine	45
2.21 Geschiebemergel Klütz	45
2.22 Geschiebelehm Klütz	47
2.23 Schluffe Klütz	48
2.24 Sande Klütz	48
2.25 Geschiebemergel Altenburg	48
2.26 Geschiebelehm Altenburg	50
2.3 Die bodenphysikalischen Eigenschaften der untersuchten Lockergesteine	50
2.31 Geschiebemergel Klütz	51
Kornverteilung	51
Kalkgehalt, Glühverlust	52
Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgewicht	52
Natürlicher Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit	53
Breiwasserzahl, Einheitswasserzahl	54
Maximale Wasseraufnahmefähigkeit	54
Zerfallsversuche	54
Durchlässigkeitskoeffizient	54
Zusammendrückbarkeit	55
Scherfestigkeit	55
Proctordichte	56
Frosthebung	57
2.32 Geschiebelehm Klütz	59
s. 2.31	

2.33 Schluffe Klütz.	65
s. 2.31	
2.34 Sande Klütz	70
s. 2.31	
2.35 Geschiebemergel Altenburg	73
s. 2.31	
2.36 Geschiebelehm Altenburg	80
s. 2.31	
3 Anwendung der bodenphysikalischen Erkenntnisse auf die geologische und ingenieurgeologische Praxis	86
3.1 Die bodenphysikalischen und mineralogischen Zusammenhänge und Unterschiede der untersuchten Lockergesteine.	86
3.11 Abhängigkeit der Kennwerte untereinander	86
3.12 Vergleich des unterschiedlichen bodenphysikalischen Verhaltens	98
3.13 Ergebnisse	103
3.2 Die Bedeutung der Kennwerte für die Untersuchung von Geschiebemergel und -lehm.	105
3.3 Die festgestellten Unterschiede zwischen weichsel- und elstereiszeitlichen Geschiebemergeln und -lehm und ihre Ursachen.	105
3.4 Die Verlehmung der Geschiebemergel	107
3.5 Lagerungsverhältnisse und Schichtenparallelisierung.	108
3.51 Klütz-Höved	108
3.511 Allgemeines	108
3.512 Kiese, Sande, Schluffe und Tone	109
3.513 Geschiebemergel und -lehm	110
3.514 Vergleich mit Brodtener Steilufer.	110
3.515 Schlußfolgerungen	111
3.52 Altenburg	116
3.6 Die geologische Vorbelastung der Sedimente im Gebiet des Klütz-Höved und ihre Beziehung zur Eisauflast	117
3.61 Die heutigen Anschauungen über die Ermittlung der Eisdicken	118
3.62 Bemerkungen zur Eisdicke im Gebiet des Klütz-Höved	119
3.7 Die Gewinnbarkeit der untersuchten Lockergesteine.	120
3.71 Bodenklassen	120
3.72 Einteilung der untersuchten Lockergesteine	122
3.73 Schlußfolgerungen	124
3.8 Bemerkungen zum Kliffabtrag und zur Kliffsicherung im Gebiet des Gr.- u. Kl.-Klütz-Höved	125
3.81 Allgemeines	125
3.82 Physiographische Einteilung von Lockergesteinssteilküsten	125
3.821 Grundlagen	125
3.822 Verbreitung der drei Kliffotypen im Gebiet des Klütz-Höved	127
3.823 Morphologie der Steilküste im Gebiet des Klütz-Höved	129
3.83 Die Stärke des Küstenrückganges im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved	132
3.831 Ermittlung des Rückganges durch Kartenvergleich	132
3.832 Zusammenhänge zwischen Änderung des Küstenverlaufes, Kliffaufbau und Klifftyp.	133
3.833 Der Landverlust in den vergangenen 60 bis 80 Jahren im Gebiet des Gr.- u. Kl.-Klütz-Höved	135

3.84	Böschungsrutschungen als Hauptform des Steilküstenabtrages.	135
3.841	Die auftretenden Rutschungen.	135
3.842	Die Ursachen der Rutschungen.	135
3.842.1	Allgemeines	135
3.842.2	Die stabilitätsmindernden Faktoren und ihre Wirkung auf das Steilufer	136
3.842.3	Untersuchung der Standsicherheit der Kliffböschungen.	142
3.85	Möglichkeiten der Kliffsicherung.	152
3.851	Bautechnische Maßnahmen	152
3.852	Geotechnische Maßnahmen	154
3.853	Anwendung der verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen am Klütz- Höved	154
3.854	Ergebnis.	156
3.9	Die Frostveränderlichkeit der untersuchten Lockergesteine.	157
3.91	Grundlagen	157
3.92	Feststellung der Frostveränderlichkeit	158
3.921	Kornkriterium (SCHAIBLE).	158
3.922	Frosthebungsversuche.	160
3.923	Ergebnis	160
3.924	Vorschläge.	161
3.93	Sicherungsmaßnahmen	163
3.931	Frostschuttschichten	163
3.932	Untergrundstabilisierung	164
3.10	Die Stabilisierung von Geschiebelehm mit Kalk	165
3.10.1	Grundlagen	165
3.10.2	Verwendeter Kalk	166
3.10.3	Der Einfluß von Kalk auf das bodenphysikalische Verhalten des Klützer und Altenburger Geschiebelehmes.	166
3.10.4	Schlußfolgerungen	176
	Mineralchemische Veränderungen.	176
	Einfluß der Kalkzugabe auf Scherfestigkeit, Zusammendrückbar- keit, Verdichtungswilligkeit und Frostveränderlichkeit	178
Literatur	180

Aufgabe und Ziel der Arbeit

Die Ablagerungen der Grund- und Endmoränen nehmen einen beträchtlichen Teil der Landoberfläche im Gebiet nördlich der Mittelgebirge und vor allem im norddeutschen Raum ein.

Ingenieurgeologische Arbeiten in diesen Gebieten sind ohne eingehende Beschäftigung mit den hier anstehenden eiszeitlichen Lockergesteinen nicht möglich. Demgegenüber ist jedoch festzustellen, daß über das bodenphysikalische Verhalten dieser Gesteine und die Vielzahl der daraus abzuleitenden praktischen Fragen bisher wenig bekannt geworden ist. Der überwiegende Teil aller in den letzten Jahrzehnten

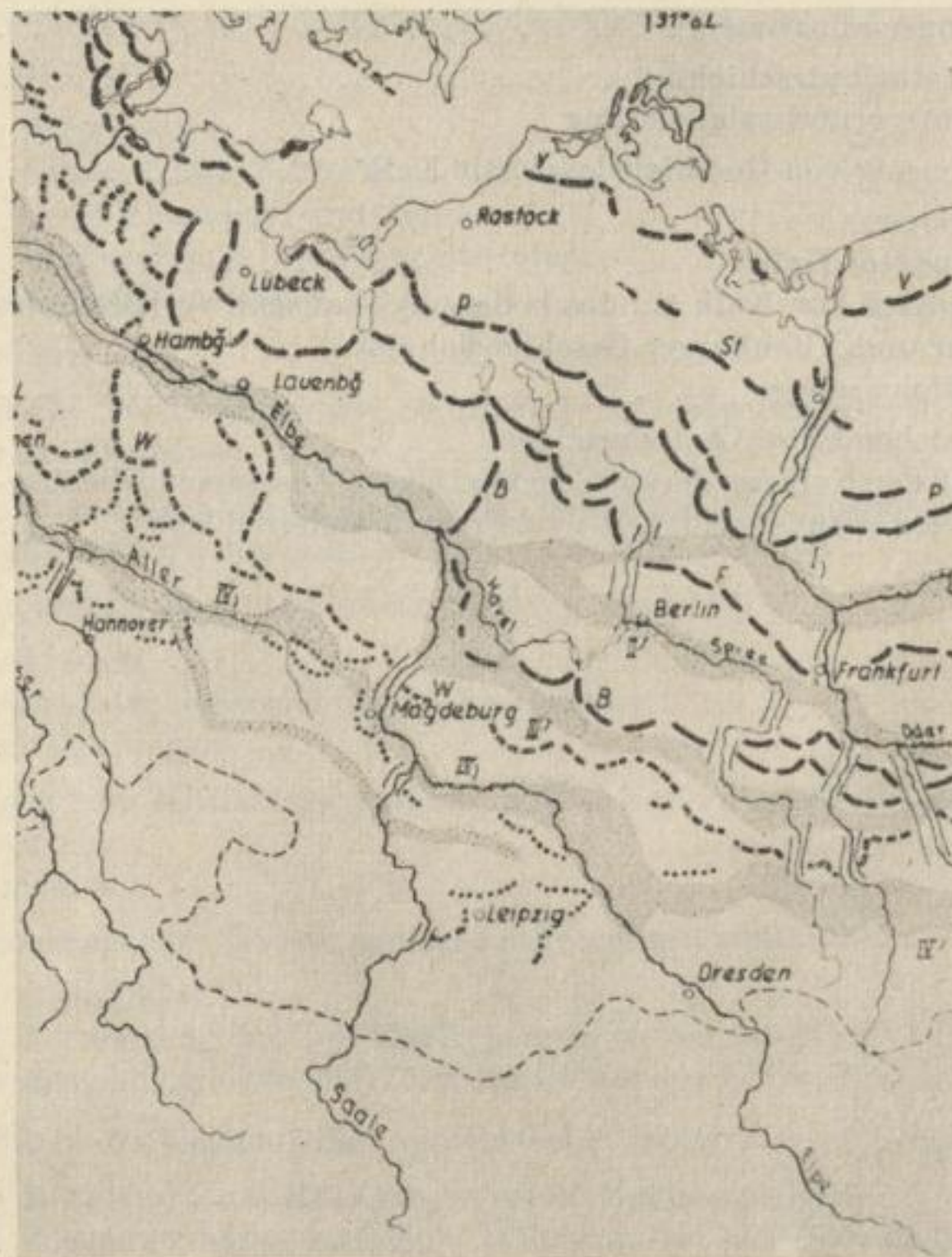


Bild 1. Eisrandlagen in Mitteleuropa mit Angabe der Untersuchungsgebiete

durchgeführten Untersuchungen beschränkte sich auf rein sedimentpetrographische Arbeiten mit dem Hauptziel, genetische Fragen zu klären.

Die vorliegende Arbeit verfolgt deshalb das Ziel, eine ingenieurgeologische Bewertung verschiedener geotechnisch bedeutsamer pleistozäner Lockergesteine durchzuführen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse auf eine Reihe aktueller Probleme der geologischen und ingenieurgeologischen Praxis anzuwenden.

Infolge der Aufwendigkeit der bei der Durchführung einer bodenphysikalischen Untersuchungsreihe anfallenden Laboruntersuchungen war es erforderlich, die zu bearbeitenden Proben auf ein vertretbares Mindestmaß zu beschränken.

1.2

Die Untersuchungsgebiete

Als besonders geeignet für die geplante Untersuchung erschien dem Verfasser einmal das Steilküstengebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved mit seinem bis zu 40 m mächtigen Anschnitt der eiszeitlichen Lockergesteine, da hier durch eine im Jahre 1954 durchgeführte Diplomarbeit [1] eine Kliffkartierung, Profilaufnahme und eine größere Anzahl gestörter Proben zur Verfügung standen. Zum anderen wurde ein in den letzten Jahren für die Deutsche Reichsbahn hergestellter Eisenbahneinschnitt [2] in der Nähe der thüringischen Stadt Altenburg als zweites Untersuchungsgebiet herangezogen, da die zum Teil vom Verfasser betreuten Bohrungen die Gewinnung einer größeren Anzahl gestörter und ungestörter Proben für die genannten Zwecke möglich machte (Bild 1).

1.21

Klütz-Höved

Das Küstengebiet des Klütz-Höved zwischen Travemünde und Boltenhagen hat eine Länge von 25 km. Das westliche Drittel bis in die Gegend von Gr.-Schwansee ist fast ausschließlich als Flachküste ausgebildet. Nur stellenweise wird sie auf kurze Strecken von kleinen Steiluferabschnitten mit Höhen von 3 bis 4 m unterbrochen. Hier konnten deshalb auch nur zwei Punkte für eine Probenahme festgelegt werden. Erst östlich von Gr.-Schwansee ist dann ein bis fast 20 m ansteigendes Kliff vorhanden, das noch einmal auf kurze Strecken unter Dünensande untertaucht, dann aber den gesamten Küstenabschnitt bis in das Gebiet Redewisch/Boltenhagen ohne Unterbrechung aufbaut. Die Steilküste erreicht dabei Höhen von maximal 45 m am Kl.-Klütz-Höved und von maximal 30 m am Gr.-Klütz-Höved. In diesem Gebiet wurde der Hauptteil der Proben entnommen. Erst etwa 1 km nördlich der Straße Redewisch verliert das Kliff wieder stark an Höhe und verschwindet allmählich unter Dünensanden, die zur Flachküste der Bucht von Boltenhagen überleiten. Die in der Steilküste aufgeschlossenen Sedimente (Geschiebemergel, Geschiebelehm, Sande und Schluffe) sind in Bänke, Lagen und Linsen stark unterschiedlicher Mächtigkeit aufgespalten und zeigen eine im allgemeinen flachwellige Lagerungsform. Starke Störungen des Schichtenverbandes in Form von Faltungen oder Verwerfungen lassen sich nur an einigen Stellen eindeutig nachweisen. Eine Parallelisierung dieser Schich-

tenfolge ist infolge dieses Aufbaues und infolge fehlender Verbindungsglieder durch zugerutschte oder bewachsene Kliffabschnitte nicht durchzuführen (Bild 2).

Das Hinterland der Küste zeigt eine flachwellige, zum Teil kuppige Oberfläche. Sie findet weiter im Süden eine Begrenzung in dem häufig Unterbrechungen aufweisenden Höhenzug der „Inneren Baltischen Endmoräne“, der im Bereich der Gabelung des Travemünder und Wismarer Endmoränenlobus bis in das Gebiet der heutigen Küstenlinie herantritt. Daraus kann man folgern, daß es sich zumindest bei den oberflächennah anstehenden Lockergesteinen um im Grenzgebiet Endmoräne/Grundmoräne abgelagerte Sedimente des Pommerschen Stadiums der Weichselvereisung (Würm) handelt.

1.22

Altenburg

Das Untersuchungsgebiet im Bereich des Tunnelabtrages Altenburg hat eine Ausdehnung von ca. 0,25 km² (Bild 3).

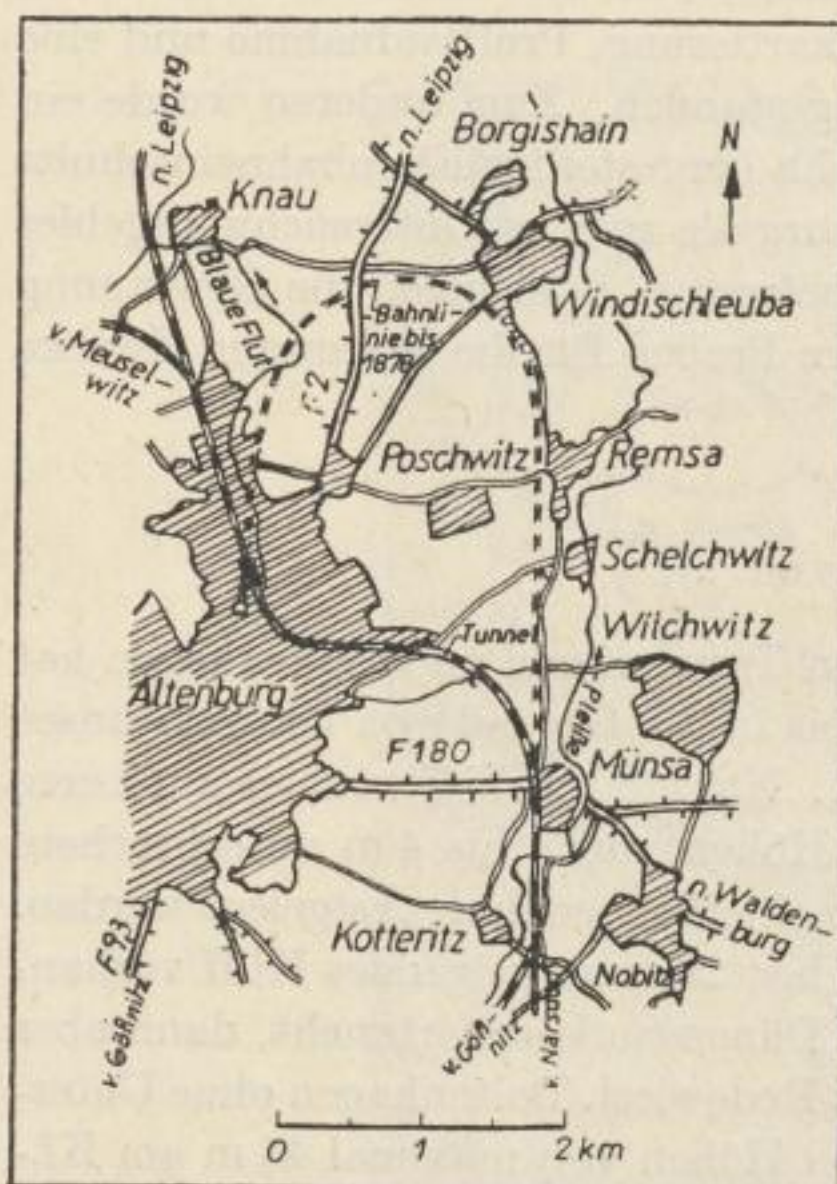


Bild 3. Karte von Altenburg/Thür. und Umgebung

Die Mächtigkeit des Pleistozäns beträgt in diesem Gebiet etwa 20 bis 25 m, im Liegenden davon folgen Kiese und Braunkohlenablagerungen des Eozäns. Die pleistozänen Sedimente sind fast völlig horizontal abgelagert. So stehen unter einer 1 bis 2 m mächtigen Lößlehmüberdeckung bis zu etwa 20 m Tiefe Geschiebemergel an, dessen hangende Partien auf durchschnittlich 5 m Mächtigkeit verlehmt sind. Bei etwa 8 bis 10 m Tiefe ist in den Geschiebemergel ein durchgehender Horizont von Sanden, Schluffen und Tonen von wechselnder Mächtigkeit zwischen 0,5 und 5 m eingelagert. Im Liegenden dieser mächtigen Geschiebemergelbank stehen unter tonig-schluffigen bzw. sandigen Ablagerungen Kiese an, die wahrscheinlich bereits ins Tertiär gehören.

Nach GRAHMANN [3] gehören die pleistozänen Sedimente der Elster (Mindel-) vereisung an, deren südlichste Ausdehnung bis in das Gebiet von Zwickau reicht. Der

Vorstoß der Saale (Riß-)vereisung kam bereits im Raume südlich Borna zum stehen. Der Geschiebemergel im Raum Altenburg ist unzweifelhaft als zur Grundmoräne gehörend anzusprechen und läßt sich offenbar wie auch weiter nördlich (GRAHMANN) infolge der zwischenlagernden Bändertone und Schmelzwassersande zwei Einzelvorstößen zuordnen.

1.3

Probenahme

Infolge des tiefen Anschnittes der Sedimentfolge im Bereich der Steilküste des Klütz-Höved war es möglich, die für die Untersuchung benötigten Proben in den verschiedenen Tiefen von Hand zu entnehmen. Während der Kliffkartierung im Sommer des Jahres 1954 waren an Hand von rund 100 Vertikalprofilen bereits gegen 350 gestörte Proben als Schlitzproben über die gesamte aufgeschlossene Mächtigkeit eines jeweiligen Sedimentes entnommen worden. Im Sommer 1956 wurden dann an 14 repräsentativen Profilen, die nach Lage, Aufschluß und Probenentnahmemöglichkeit ausgewählt worden waren (vgl. Bild 2), 51 ungestörte Proben entnommen. Die Entnahme erfolgte in den bindigen Lockergesteinen mittels Stahlstutzen (Höhe 30 cm, Durchmesser 10 cm), in den sandig-schluffigen mit Hilfe von Messingbüchsen (15 cm, 10 cm). Nach Entfernung der durch Frost gelockerten Oberflächzone wurde ein horizontaler Anschnitt hergestellt und die Stutzen bzw. Büchsen wurden eingedrückt oder vorsichtig eingeschlagen. Um einen möglichst geringen Verlust des natürlichen Wassergehaltes durch Verdunstung in Kauf nehmen zu müssen, wurden die Probebehälter verwachst bzw. durch wasserdichte Deckel verschlossen. Eine Probenahme außerhalb des Steilküstengebietes hätte den großen Nachteil eines Verzichtes auf Probematerial aus größeren Teufen gebracht und außerdem infolge der wenigen vorhandenen natürlichen Aufschlüsse im Inland eine gleichmäßige Entnahme in bestimmter räumlicher Verteilung unmöglich gemacht. Das freiliegende Profil einer Steilküste bietet den idealen natürlichen Aufschluß zur sachgemäßen Entnahme ungestörter Proben von Hand und erspart die für den vorliegenden Zweck unwirtschaftliche Durchführung von Flachbohrungen zum Aufschluß des Baugrundes.

Im Raum Altenburg wurden im Rahmen der Baugrunduntersuchung für das Aufschlitzen des alten Eisenbahntunnels und Herstellen eines ca. 20 m tiefen Einschnittes gegen 25 Aufschlußbohrungen bis zu fast 30 m Teufe gestoßen. Dabei wurden eine große Anzahl von gestörten Proben aus dem durch Schappen geförderten Material und ungestörten Proben in Stahlstutzen über das Gestänge entnommen. Für die vorliegende Untersuchung konnten 31 ungestörte und eine größere Anzahl gestörter Proben aus repräsentativen Profilen, die für die Baugrunduntersuchung nicht verwendet wurden, ausgewählt und benutzt werden. Um das festgelegte Untersuchungsprogramm nicht zu überschreiten, wurde hier die Probenahme auf Geschiebemergel und -lehm beschränkt. Für die vorliegende Untersuchung standen danach folgende verschiedenen Lockergesteine zur Verfügung:

Geschiebemergel	}	vom Gr.- u. K.-Klütz-Höved
Geschiebelehm		
Schluffe		
Sande		

Geschiebemergel	}	von Altenburg
Geschiebelehm		

1.4 Begriffserläuterung

Im folgenden werden einige der wichtigsten verwendeten allgemeinen Begriffe erläutert, um bei der Vielzahl der im Schrifttum vorzufindenden Bedeutungen Mißverständnissen vorzubeugen.

Lockergestein oder Erdart werden entsprechend der bodenphysikalischen Bezeichnungen für alle diagenetisch nicht verfestigten Sedimente verwendet. Diese werden unterteilt in bindige (oder haftfeste, kohärente, veränderlichfeste) und nichtbindige (oder rollige, kohäsionslose, feste). Für die bodenphysikalischen Kennwerte wurden die Bezeichnungen und Dimensionen nach DIN 4015 gewählt. Ihre Formelzeichen werden bei der Erläuterung der einzelnen Versuche jeweils mit angeführt.

1.5 Laboruntersuchungen

Die zur Verfügung stehenden Proben wurden nach den im folgenden erläuterten Untersuchungsverfahren auf ihre mineralogische Zusammensetzung und ihr bodenphysikalisches Verhalten untersucht.

Verschiedene Versuche konnten infolge ihrer Aufwendigkeit nur mit Durchschnittsprobenmaterial, das aus der Vielzahl der gestörten Proben eines Lockergesteines gemischt wurde, durchgeführt werden. Hier wurde dann der Mittelwert einer Reihe von Einzelversuchen verwendet.

1.51 Mineralchemische Untersuchungsverfahren

Die meisten bindigen Lockergesteine bestehen aus verschiedenen Anteilen von Quarz, Feldspat, Kalkspat, Limonit oder ähnliches und Tonmineralen. **Mengenmäßiger Anteil und Typ der Tonmineralen sind für das bodenphysikalische Verhalten eines Lockergesteines von grundlegender Bedeutung.** Zum Verständnis dieser wichtigen Tatsache sollen zuerst kurz die heutigen Kenntnisse über Aufbau und Zusammensetzung der wichtigsten und für die Untersuchung von Lockergesteinen bedeutungsvollen Tonmineralen dargelegt werden [4, 5].

Alle **Tonmineralen sind chemisch als Aluminiumsilikate zu bezeichnen.** Neben den vier Grundelementen Si, Al, O und H enthalten sie auch noch geringere Anteile von Fe, Mg, Ca und K. Es sind heute gegen 30 Tonmineralen bekannt, deren Kristallgitter aber alle aus nur zwei strukturellen Grundbauelementen bestehen, und zwar den

SiO-Tetraedern und den
AlOH-Oktaedern.

Diese Einheiten besitzen negative Überschlußladungen, die jeweils durch Vernetzung zu Sechseringen ausgeglichen werden. Unter H₂O-Austritt schließen sich dann entweder ein Tetraeder- und ein Oktaedersechsering oder ein Tetraeder- und zwei Oktaedersechseringe zu sogenannten Schichtpaketen zusammen. Mehrere

dieser Schichtpakete bilden ein Tonminerkristallblättchen. Setzen sich nun die Kristallgitter aus einer Aufeinanderfolge von zweischichtigen Schichtpaketen zusammen, so spricht man von Zweischichtmineralen (Kaolingruppe), bei der Aufeinanderfolge dreischichtiger Schichtpakete von Dreischichtmineralen (Montmorin- und Glimmerähnliche Gruppe). Nach diesem Prinzip erfolgt die Einteilung der Tonmineralen (Bild 4).


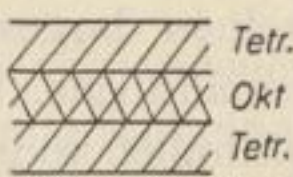
Zweischichtminerale	Dreischichtminerale	
Struktur- schem ^a : 		
Grundformel: $Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	$Al_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$ (Pyrophyllit)	
1. Kaolinminerale	2. Montmorin- minerale	3. Glimmer- artige Minerale
Kaolinit	Montmorillonit	Illit
Halloysit	Beidellit	} diokta- edrisch
Metahalloysit	Nontronit	
	Hektorit	Vermiculit
		} triokta- edrisch

Bild 4. Aufbauschema der Tonmineralien

Bei den Mineralen der Kaolingruppe ist das Kristallgitter elektrisch neutral und Ionen können nur an den Randzonen sorbiert werden, wo durch Unterbrechung der Sechseringbindungen nicht abgesättigte Ladungen auftreten. Entsprechend niedrig ist auch das Ionenaustauschvermögen. Das geringe Wasserhalte-, Quellungs- und Schrumpfvermögen dieser Tonminerale kann ebenfalls damit erklärt werden.

Im Gegensatz dazu haben die Mineralen der Montmoriningruppe eine negative Überladung infolge teilweisen Ersatzes der Zentralionen Si und Al durch niederwertigere Ionen, wie z. B. Mg oder Fe. Diese freien Valenzen werden durch Kationen besetzt, wodurch das hohe Ionenaustauschvermögen dieser Tonminerale erklärbar wird. Außerdem ist bei den Mineralen der Montmoriningruppe der Abstand der Schichtpakete nicht — wie bei der Kaolingruppe — konstant, sondern variabel, und in den Zwischenräumen können sich H_2O -Molekülschichten reversibel einlagern. Die Ursache dafür ist in der relativ schwachen Bindung zwischen zwei dreischichtigen Schichtpaketen, die — im Gegensatz zu den Zweischichtmineralen — nur durch geringe Nebenvalenzkräfte hervorgerufen wird, zu suchen. Die Folge aller dieser Erscheinungen ist hohes Wasseraufnahmevermögen, hohe Quellung und Schrumpfung und stark bildsames Verhalten der Tonminerale der Montmoriningruppe.

Bei der Gruppe der glimmerähnlichen Tonminerale sind infolge hoher negativer Überschlußladungen die zum Ausgleich gebundenen K-Ionen fest in das Gitter ein-

gebaut, so daß es neutral reagiert. Austauschfähige Kationen sind nur auf Spalt- und Bruchfläche beschränkt. Die Mittelstellung, die diese Tonmineralen hinsichtlich Wasseraufnahmevermögen, Bildsamkeit usw. einnehmen, ist dadurch zu erklären, daß bei der Verwitterung ein Teil der festgebundenen K-Ionen herausgelöst wird und durch H_2O ersetzt werden kann.

Man nimmt heute an, daß diese erläuterten typischen Vertreter gegenüber den Übergangsgliedern mit Misch- und Wechsellagerung in den Böden mit ihrem unterschiedlichen Verwitterungsgrad zurücktreten.

Als Folge des im einzelnen dargestellten schichtförmigen Aufbaues zeigen alle Tonminerale eine blättchenähnliche, schuppige Gestalt, weshalb sie auch andere größere Mineralkörnchen einhüllen können. Die Durchmesser dieser Kristalle schwanken je nach Mineraltyp zwischen 100 und 500 Millimikron, die Dicken zwischen 1 und 100 Millimikron (1 Millimikron = 10^{-6} mm). Dabei ist das Verhältnis Durchmesser zu Dicke besonders bei den Montmorilloniten auffallend hoch (bis zu 500:1). Die an die Tonminerale austauschfähig gebundenen Kationen werden bei Wasserbenetzung hydratisiert und im gegebenen Fall diffus in der Wasserhülle verteilt, so daß sie dort in gewissen Grenzen beweglich sind. Da die Wasserhüllen nebeneinanderliegender Tonkristalle ineinanderfließen, geraten die darin schwärmenden Kationen in den Bereich der Anziehungskräfte dieser Kristalle und werden in einer Schicht dazwischen angeordnet. Dieser Vorgang bewirkt den Zusammenhalt verschiedener Tonteilchen. Eine solche Bindung ist auch zwischen Ton und einem anderen Mineral möglich infolge der meist negativen Aufladung der Außenflächen. Die leicht mögliche Bewegung an den durch die Kationenschicht zusammengehaltenen Kristallen ist die Ursache für die Bildsamkeit aller Tonminerale enthaltenen Lockergesteine. Ihr Anteil darf dabei natürlich eine gewisse Grenze nicht unterschreiten, da sonst keine Bindung untereinander möglich ist. Beim Wasserentzug durch Austrocknung werden die Abstände zwischen den Kristallflächen kleiner und die Anziehung zwischen Kristalloberflächen und Kationenschicht wird stärker. Die Folge davon ist die Erhöhung der Festigkeit des jeweiligen bindigen Lockergesteines. Bei zu hoher Wasserzugabe tritt der umgekehrte Fall ein, da die Abstände zwischen den Kristalloberflächen und der Kationenschicht zu groß werden. Dieser Vorgang kann so weit gehen, bis die Anziehungskräfte Null werden, was dem Fließzustand eines bindigen Lockergesteines entspricht.

Die verschiedenen Tonmineraltypen können nur mit Hilfe verschiedener chemisch-mineralogischer Analysen erfaßt werden. Dafür kommen vor allem elektronenmikroskopische und röntgenographische Untersuchungen in Frage. Weiterhin sind die Differentialthermoanalyse und das Ionenaustauschverfahren bekannte und aufschlußreiche Versuchsmethoden. Zur Abrundung des Bildes werden noch einfache chemische Vollanalysen herangezogen, aus denen durch Umrechnung auf die vorhandenen Minerale geschlossen werden kann.

Von den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Geschiebemergeln und -lehm von Klütz-Höved und Altenburg konnten nur Differentialthermoanalysen und chemische Vollanalysen durchgeführt und das Ionenaustauschvermögen bestimmt wer-

den. Die Differentialthermoanalysen wurden dabei in der Akademie der Wissenschaften Berlin, die chemischen Analysen im Institut für Grobkeramik Meißen bearbeitet. Die Bestimmung des Ionenaustauschvermögens erfolgte nach Aufbau einer eigenen Versuchseinrichtung im Geotechnischen Laboratorium. Durch Vergleich dieser Ergebnisse mit den bodenphysikalischen Kennwerten soll versucht werden, Abhängigkeiten zu finden. Außerdem sollen auf diese Weise die untersuchten Lockergesteinstypen auch mineralchemisch charakterisiert werden.

Ionenaustauschvermögen (T-Wert-Bestimmung)

Die an der Oberfläche aller Tonminerale vorhandenen Kationen können versuchsmäßig gegen die Kationen einer Salzlösung ausgetauscht werden. Durch Bestimmung der Menge der austauschfähigen Kationen in Milliäquivalent (mval) in einem Tonmineral enthaltenden Lockergestein ist es möglich, auf die vorkommenden Tonmineraltypen zu schließen [6]. Bei den Tonmineralen der Montmorillonitgruppe ist das Ionenaustauschvermögen am größten mit ca. 100 mval pro 100 g. Bei den glimmerähnlichen Tonmineralen liegen die Werte zwischen 10 und 100 mval, bei den Mineralen der Kaolinitgruppe unter 10 mval pro 100 g. Zur Bestimmung der austauschfähig gebundenen Kationen (i. w. Ca, Mg, Na, K, H, Al) im Labor wurde Ammoniumacetatlösung benutzt, in die 5 bis 10 g der zu untersuchenden Probe eingegeben wurde. Nach Auswaschen des nicht reagierten Ammoniumacetats mit Methanol wurde der NH_4^+ -Gehalt der Probe durch Überdestillieren als NH_3 im Wasserdampfstrom bestimmt.

Differentialthermoanalyse (DTA)

Die differentialthermoanalytische Untersuchung einer Tonminerale enthaltenden Probe gestattet es, Beziehungen zwischen den sich beim Erhitzen oder Abkühlen abspielenden Vorgängen zur jeweiligen Temperatur aufzustellen [7]. Ausgangspunkt für diese Untersuchungsmethode ist die Tatsache, daß jedes Tonmineral Wasser in wechselnder Menge und verschiedener Bindungsenergie an sich gebunden hat, das beim Erhitzen allmählich ausgetrieben wird. Die beim Versuch aufgenommenen Reaktionskurven gestatten aus ihrer Lage, Form und Größe auf die in einer Probe enthaltenen Einzelkomponenten zu schließen. Die sogenannte Entwässerungskurve bildet dabei eine für jeden Tonmineraltyp charakteristische Beziehung zwischen dem durch Wasserabgabe entstandenen Wärmeverlust und der Temperatur des Ofens. Bei der Versuchsdurchführung mit der Apparatur der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin wurden je drei Proben jeden Materials in einer Stickstoffatmosphäre mit einer Geschwindigkeit von $10^\circ/\text{min.}$ bis zu 1000°C aufgeheizt.

1.52 Bodenphysikalische Untersuchungsverfahren

Von den für das Untersuchungsprogramm ausgewählten Erdarten wurden sämtliche bekannten und in den Erdbaulaboratorien üblichen bodenphysikalischen Kenn-

werte bestimmt, und zwar

Kornverteilung,
 Kalkgehalt, Glühverlust, Raumgewicht, spezif. Gewicht und Hohlraumgehalt
 Wasserwerte ($w_n, w_f, w_a, w_o, w_1, w_{max}, w_{zer}$ und k),
 Zusammendrückbarkeit,
 Scherfestigkeit,
 Proctordichte,
 Frosthebung.

Im folgenden sollen die zur Anwendung gekommenen Versuchsverfahren und für das Verständnis der Arbeit wichtige Zusammenhänge erläutert werden. Hinsichtlich der Versuchsdurchführung und -auswertung wird auf die Spezialliteratur [8, 9] verwiesen.

Kornverteilung

In der Arbeit wurde die Kornverteilung der Korngrößen $> 0,06$ mm Durchmesser infolge der Bindigkeit des Materials nach der Naßsiebmethode unter Verwendung der Siebe 6,0, 2,0, 0,6, 0,2, 0,1, 0,06 mm Durchmesser ermittelt. Die Korngrößen $< 0,06$ mm

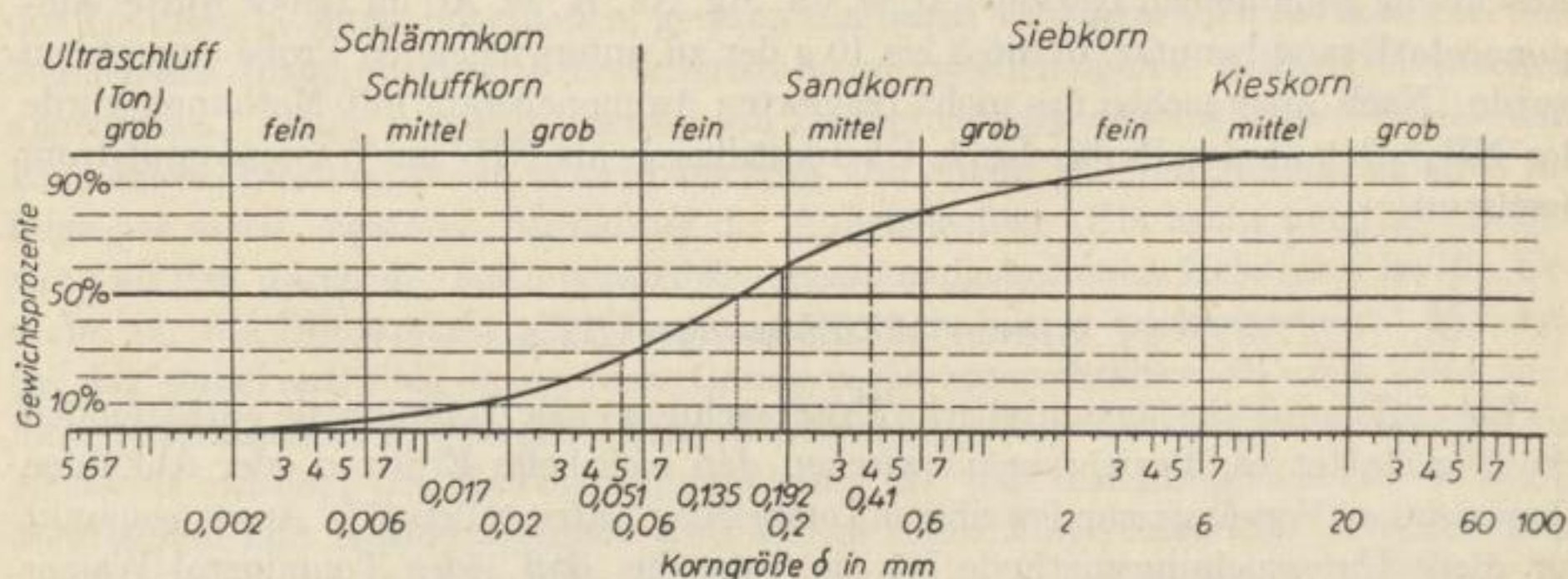


Bild 5. Kornverteilungskurve mit eingezeichneten Beispielen zur Ermittlung von U , Q_{25} , M_d und Q_{75}

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,192}{0,017} \quad \begin{array}{l} Q_{25} = 0,051 \\ M_d = 0,135 \\ Q_{75} = 0,41 \end{array}$$

Durchmesser wurden nach dem Aräometerschlammverfahren nach CASAGRANDE bestimmt. Die Bezeichnung der Korngruppen erfolgte nach DIN 4022 (Bild 5):

Körnungen > 60 mm Durchmesser	Steine
60 — 2 mm	Kieskorn
2 — 0,06 mm	Sandkorn
0,06 — 0,002 mm	Schluffkorn
$< 0,002$ mm	Ultraschluffkorn (oder Feinstkorn, Tonkorn)

Jede Korngruppe wird weiter in die Untergruppen grob-mittel-fein unterteilt.

Das Auftragen der Ergebnisse erfolgte entweder als Kornsummenkurve in halb-logarithmischer Darstellung, als Säulendarstellung oder als Dreiecksdarstellung im gleichseitigen Dreieck mit den Gruppen Sand-Kies/Schluff/Ultraschluff.

Im Gegensatz zu früheren Anschauungen sagt die Kornverteilungskurve nichts über den für das bodenphysikalische Verhalten eines bindigen Lockergesteines so außerordentlich wichtigen Ton(mineral)anteil aus. Die Auffassung, daß der als Tonkornanteil bezeichnete Gehalt einer Probe an Korngrößen $< 0,002$ mm sich mit dem tatsächlichen Tonmineralanteil decken würde, ist heute nicht mehr haltbar. Der die Eigenschaften eines bindigen Lockergesteines — also auch des Geschiebemergels und -lehmes — bestimmende Gehalt an Tonmineralen reicht nach neueren Forschungen bis zu Korngrößen von etwa 0,1 mm. Andererseits können feinste Quarzteilchen, die wesentlich andere Eigenschaften als die eigentlichen Tonminerale aufweisen, bis zu Korngrößen kleiner als 0,002 mm hinabreichen. Da außerdem auch noch die Tonminerale selbst in verschiedene Typen mit unterschiedlichem chemisch-physikalischem Verhalten aufzuteilen sind (vgl. 1.51), ergibt sich ganz eindeutig, daß mit der Kornverteilung allein *keine* eindeutige quantitative Aussage über Aufbau und bodenphysikalisches Verhalten eines bindigen Lockergesteines getroffen werden kann.

Erst mit Hilfe einer Reihe anderer bodenphysikalischer Kennwerte (Fließgrenze, Bildsamkeit, maximale Wasseraufnahme) kann man das durch die Kornverteilung gewonnene Bild in für die meisten ingenieurgeologischen Belange ausreichendem Maße ergänzen. Über den tatsächlichen Aufbau des jeweiligen Lockergesteines geben sie jedoch keine Auskunft, da ihre Ergebnisse das Verhalten der unterschiedlichen Mineraltypen summiert widerspiegeln.

Die bisherigen Bemühungen, klare Abhängigkeiten zwischen Mineralgehalt und bodenphysikalischen Kennwerten zu finden, sind für monomineralische Lockergesteine (z. B. reinen Kaolinton) lösbar, beginnen aber bereits bei zweimineralischem Aufbau und unterschiedlichen Anteilen der einzelnen Minerale schwierig zu werden. Bei mehrmineralischem Aufbau und unterschiedlichen Anteilen lassen sich durch die bereits erwähnten gegenseitigen Überdeckungen nur noch annäherungsweise Beziehungen finden.

Da es ohne zeichnerische Darstellung nicht möglich ist, mehrere Kornverteilungskurven untereinander zu vergleichen, wurden viele Versuche durchgeführt, Kornverteilungskurven durch einen einfachen Zahlenwert auszudrücken. Die Bedeutung z. B. der Quartilmaße (Q_{25}/Q_{75}), des Medianwertes (Md), des Sortierungskoeffizienten

($S_o = \sqrt{\frac{Q_{75}}{Q_{25}}}$) und der Schiefe ($S_k = \frac{Q_{75} \cdot Q_{25}}{Md^2}$) sind mit Recht außerordentlich um-

stritten. Sie sind nicht in der Lage, den Verlauf einer Kornverteilungskurve exakt wiederzugeben, außerdem lassen sich verschiedene Kornverteilungskurven finden, die ausnahmslos durch denselben Zahlenwert ausgedrückt werden. Weiterhin ist der

Ungleichförmigkeitsgrad zu nennen ($U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$), der den Anstieg der Kurve im Bereich zwischen 10 und 60% angibt und daraus gewisse Schlüsse auf die verschiedenen vor-

handenen Kornfraktionen und damit auf einen gleichförmigen oder ungleichförmigen Aufbau zuläßt. Die hier erwähnten Kornkennwerte (vgl. Bild 5) wurden an den verschiedenen Proben bestimmt, um durch vergleichende Untersuchungen ihre Bedeutung für die vorliegende Arbeit zu überprüfen.

Kalkgehalt und Gehalt an organischer Substanz

Die Bestimmung des Kalkgehaltes ist gerade für die Charakterisierung der eiszeitlichen Lockergesteine von großer Bedeutung, da das Eis entsprechend dem überfahrenen und aufgenommenen Untergrundmaterial, Grund- und Endmoränen mit wechselndem Gehalt an CaCO_3 absetzte. Die Ermittlung des Kalkgehaltes erfolgte im Gerät nach SCHEIBLER.

Die untersuchten pleistozänen Lockergesteine führen augenscheinlich sehr gleichmäßige Mengen organischer Bestandteile, so daß eine Bestimmung für alle Proben nicht lohnend erschien. Infolgedessen wurden nur die Durchschnittsproben auf organische Substanzen untersucht. Eine Ausnahme bildeten die Schluffe von Klütz-Höved, in denen verschiedentlich während der Probenahme pflanzliche Reste festgestellt werden konnten. Hier wurden deshalb für die meisten Proben diesbezügliche Untersuchungen durchgeführt. Die Kenntnis des Gehaltes an organischen Bestandteilen ist insofern von Interesse, als diese Bestandteile ein den Tonmineralen ähnlich großes Wasseraufnahmevermögen haben und demzufolge eine bemerkenswerte Auswirkung auf das bodenphysikalische Verhalten besitzen können.

Die Bestimmung der organischen Bestandteile erfolgt mit Hilfe des Glühversuches.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Die Bestimmung des Raumgewichtes (γ) erfolgte durch Wägung einer Volumeneinheit der ungestörten Probe.

Das spezifische Gewicht (γ_s) wurde nach der Pyknometermethode ermittelt, wobei Gewicht und Volumen der Festmasse — also der Minerale — einer Probe festgestellt werden.

Das Porenvolumen (n) und die Porenziffer (ε) als Kennwerte für den Hohlraumgehalt einer Erdart wurden aus dem Volumen (V), dem Trockengewicht (G_t) und dem spezifischen Gewicht nach folgenden Formeln ermittelt:

$$n = \left(1 - \frac{G_t}{V \cdot \gamma_s}\right) \cdot 100 ; \quad \varepsilon = \frac{V \cdot \gamma_s}{G_t} - 1$$

Mit Hilfe der Porenziffer, des spezifischen Gewichtes und des Wassergehaltes läßt sich auch das Verhältnis zwischen Wasservolumen und Porenvolumen im Boden — als Feuchtigkeitsgehalt (f) — ermitteln:

$$f = \frac{w \cdot \gamma}{100 \cdot \varepsilon}$$

Natürlicher Wassergehalt

Der als natürlicher Wassergehalt (w_n) bezeichnete Entnahmewassergehalt der Proben wurde nach der Trockenschrankmethode ermittelt.

Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit

Bei zunehmendem Wassergehalt geht ein bindiges Lockergestein allmählich, und zwar in Abhängigkeit von seinem Kornaufbau, vom ausgetrockneten und damit festen in den wasserübersättigten und schließlich in den fließenden Zustand über. Ein Lockergestein, das vorwiegend auch im Feinkornbereich aus Quarz-Bestandteilen zusammengesetzt ist, wird infolge seiner kleinen Wasserbindekräfte — die hier ausschließlich vom Korn-Feinheitsgrad abhängen — schon bei geringer Wasserzugabe übersättigt sein. Das vorhandene Wasser kann durch die Mineralkörner nicht mehr als Wasserhülle gebunden werden, die Körnchen schwimmen gewissermaßen im Wasser, sie stehen unter Auftrieb, der Fließzustand ist erreicht. Andererseits können Lockergesteine mit hohem Tonmineralgehalt — infolge der hohen Wasserbindekraft der Tonminerale — viel Wasser aufnehmen, ehe ihre Oberflächen abgesättigt sind. Ein solches Lockergestein wird sehr langsam den Fließzustand erreichen. Der Übergang vom festen Zustand in den flüssigen geht dabei über mehrere dazwischenliegende Zustandsformen — halbfest, steif, weich, breiig — vor sich. Von ATTENBERG wurden innerhalb dieser Zustandsformen oder „Konsistenzbereiche“ drei leicht erkennbare „Konsistenzgrenzen“ festgelegt, die durch dosierte Wasserzugabe bzw. Wasserentzug in genormten Versuchen ermittelt werden können. Dabei handelt es sich um die Schrumpfgrenze (w_s) zwischen festem und halbfestem Zustand, die Ausrollgrenze (w_a) zwischen halbfestem und steifplastischem Zustand und die Fließgrenze (w_f) zwischen breiigplastischem und flüssigem Zustand. Die beiden gebräuchlichsten sind dabei Ausroll- und Fließgrenze.

Je größer nun die Differenz zwischen dem Wassergehalt bei der Ausrollgrenze und dem bei der Fließgrenze ist, desto größer ist der Anteil an wasserbindefähigen Mineralien in der untersuchten Probe. Diese Differenz zwischen dem Wassergehalt an der Fließgrenze und dem an der Ausrollgrenze bezeichnet man als Bildsamkeit (w_{fa}) [früher Plastizitätszahl (Pl)]. Lockergesteine mit einer kleinen Bildsamkeit sind demzufolge arm an stark wasserbindefähigen Mineralen. Das gleiche gilt im umgekehrten Sinne. Dabei ist zu beachten, daß Ausroll- und Fließgrenze gemeinsam nach oben rücken, je höher der zusätzliche Anteil von Quarz im Feinstkornbereich ist, während die Bildsamkeit davon natürlich nicht berührt wird.

Die Beziehungen zwischen der Fließgrenze und Bildsamkeit werden in der Plastizitätskarte von CASAGRANDE [10] zum Ausdruck gebracht (Bild 6); sie gestattet eine Klassifikation der bindigen Lockergestein (vgl. Seite 87, Bild 39).

Den für die Bildsamkeit ermittelten Wert kann man nach SKEMPTON [11] dem Kornanteil $< 0,002$ mm gegenüberstellen und erhält daraus die sogenannte „Aktivität“ nach der Formel $A = \frac{w_{fa}}{< 0,002\text{mm}}$. Seine Untersuchungen an Tonen führten ihn

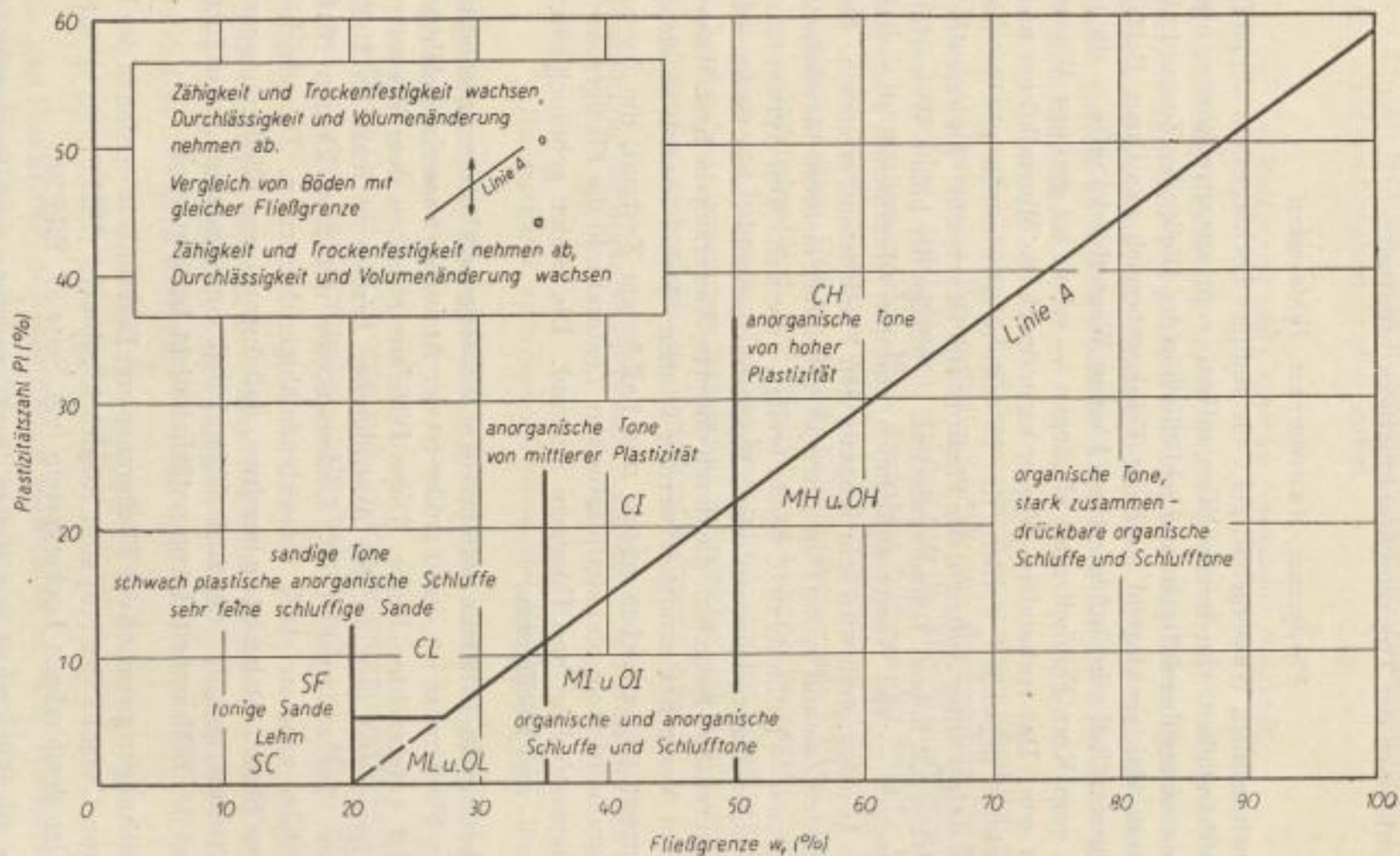


Bild 6a. Plastizitätskarte n. CASAGRANDE

Bodengruppe	Bodenklasse	Symbol	Symbol für Beimengungen	Bodenarten (Erdarten)
Grobkörnige Böden (Erdarten) mit mehr als 50% Kornanteil größer als 1 mm \varnothing	Kies und kiesige Erdarten	G gravel = Kies	W (ungleichförmig) P (gleichförmig)	G W G P G F G C
	Sand und sandige Erdarten	S sand = Sand	F (feinkörnig) C (tonig-schluffig)	S W S P S F S C
Feinkörnige Böden (Erdarten) mit mehr als 50% Kornanteil kleiner als 1 mm \varnothing	Schluff und schluffige Erdarten	M (Mo = Mehlsand)		M L M I M H C L C I C H
	Ton und tonige Erdarten	C (clay = Ton)	L leicht plastisch	O L O I O H
	Organische Erdarten (Schluff, Ton)	O	I mittelplastisch H hochplastisch	
Faserige organische Erdarten	Torf	Pt (peat = Torf)		

Bild 6b. Erläuterung zur Plastizitätskarte nach CASAGRANDE

zur Festlegung von Grenzen für die Aktivität verschiedener sich in ihrem Tonmineralgehalt unterscheidender Tone:

$A < 0,75$	sog. „inaktive“	} Tone
$A = 0,75$ bis 1,25	“ „normale“	
$A > 1,25$	“ „aktive“	

Bei Beachtung der für reine Minerale bestimmten Werte für die Aktivität und der Zusammensetzung eines Lockergesteines können daraus bereits Schlüsse auf den vorhandenen Tonmineraltyp gezogen werden.

Quarz	$A = 0,0$	Kaolinit	$A = 0,33-0,46$
Calzit	$A = 0,18$	Illit	$A = 0,9$
Muskowit	$A = 0,23$	Ca-Montmorillonit	$A = 1,5$
		Na-Montmorillonit	$A = 7,2$

In der Arbeit soll die Bedeutung dieses Wertes für die untersuchten bindigen Lockergesteine festgestellt werden.

Praktische Bedeutung hat außerdem noch die Zustandszahl (k_v), die unter Einbeziehung des natürlichen Wassergehaltes dessen Abweichen von der Fließ- und Ausrollgrenze zum Ausdruck bringt. Es ist möglich, aus der Zustandszahl auf die zulässige Belastung (p_{zul}) zu schließen.

Breiwasserzahl und Einheitswasserzahl

Bei diesen beiden Wasserwerten handelt es sich um neue erst vor einigen Jahren von OHDE eingeführte Kennzahlen [12], die mit der Belastung in Verbindung gebracht wurden. Sie sind in der Arbeit vergleichsweise an allen Proben von Klützhöved und am Durchschnittsprobematerial von Altenburg ermittelt worden, um festzustellen, inwieweit die aus den beiden Kennwerten ableitbaren Beziehungen zum Reibungsbeiwert und zum Wasserdurchlässigkeitsbeiwert auch für Geschiebelehme und Geschiebemergel Gültigkeit haben (Bild 7). Als OHDEZahl wurde die Differenz $w_0 - w_1$ bezeichnet.

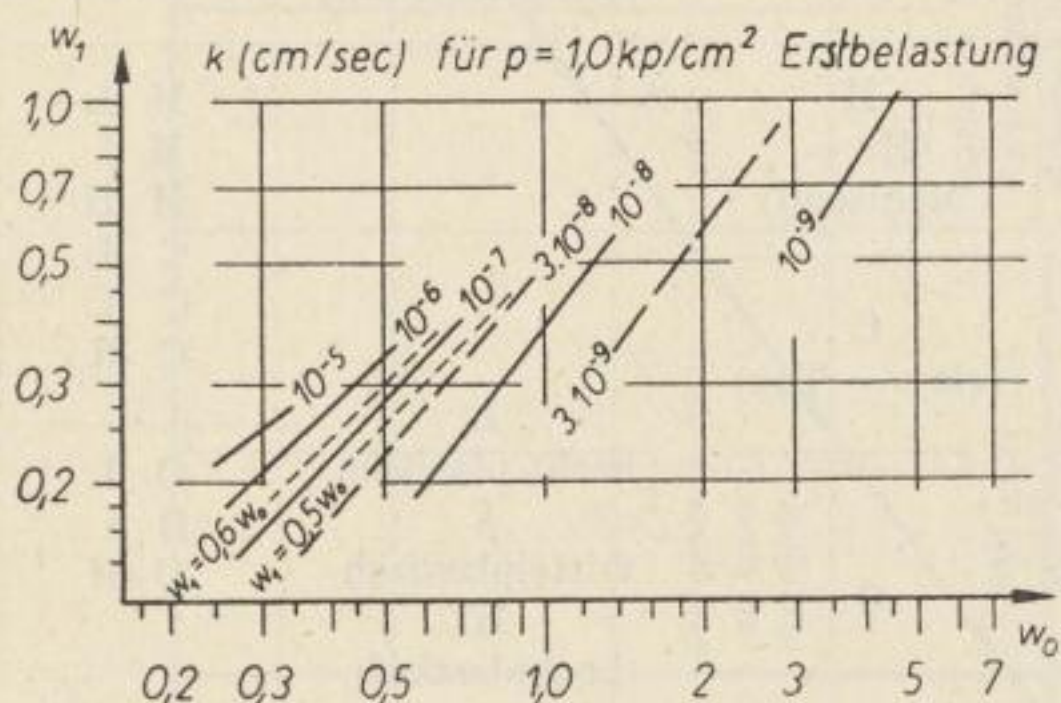


Bild 7. Nomogramm zur Bestimmung von k aus w_0 und w_1 nach OHDE

Maximale Wasseraufnahmefähigkeit

Die Feststellung der maximalen Wasseraufnahmefähigkeit erfolgte im Gerät nach ENSLIN (Bild 8). Lockergesteine, die vorwiegend aus einer Mineralart zusammengesetzt sind, lassen sich damit gut voneinander trennen.

So sind Werte für w_{\max} (in % zur Trockensubstanz) von 30 für Quarzmehl, etwa 100 für das Tonmineral Kaolinit, etwa 300 für das Tonmineral Ca-Montmorillonit und bis zu 700 für das Tonmineral Na-Montmorillonit festgestellt worden. Interes-

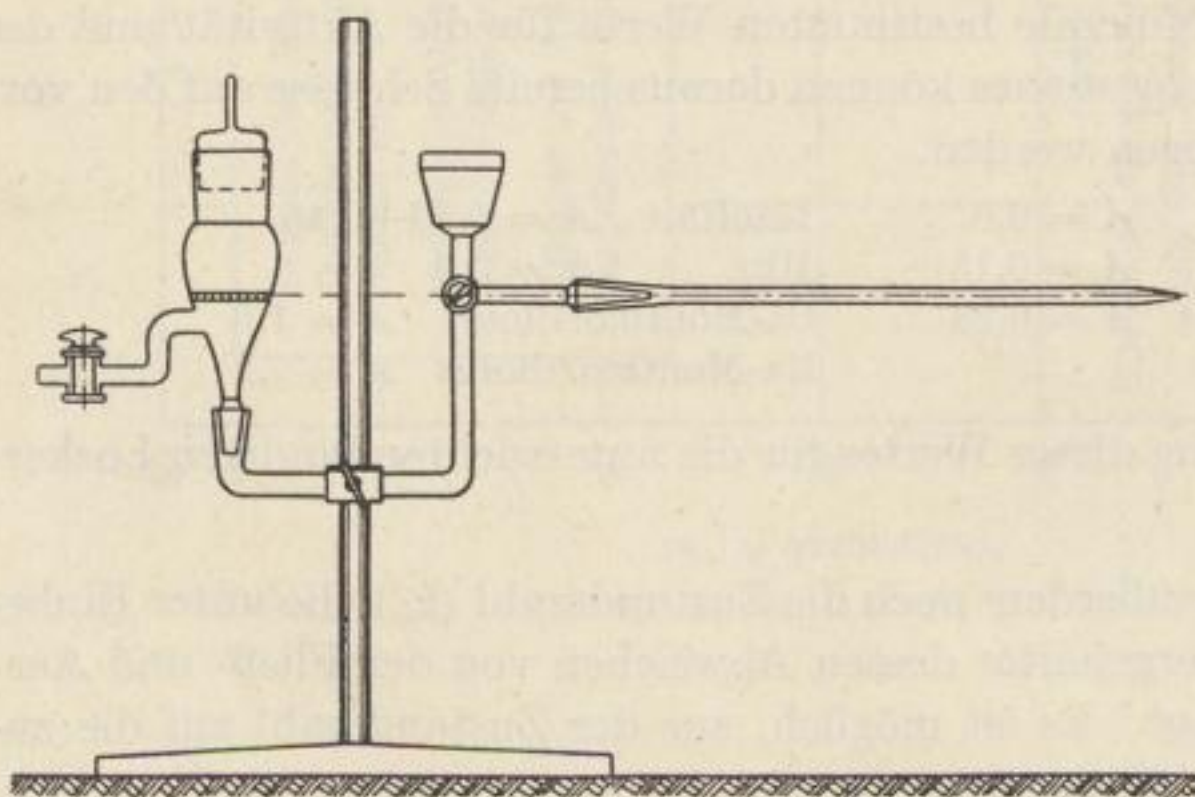


Bild 8. Enslingerät zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit

sant ist in diesem Zusammenhang, daß die Kolloide der Huminsäuren eine maximale Wasseraufnahmefähigkeit zeigen, die an 500 herankommt, so daß also hohe Werte bei humusreichen Lockergesteinen noch kein Kriterium für die Anwesenheit von Tonmineralen sind. Da reine Minerale in der Natur nicht oder nur in den seltensten Fällen vorkommen, sind bei natürlichen Böden die festgestellten Werte als Mittelwerte aller vorkommenden Mineraltypen zu werten. Die für ein vielseitig zusammengesetztes Lockergestein ermittelten Werte liegen infolge des in unseren Klimaten vorwiegend auftretenden Tonminerals Kaolinit und der verschieden großen Quarzmehlmengungen meist im Bereich 50 bis 100, so daß Schwankungen innerhalb dieser Größenordnung im allgemeinen auf das Konto der verschiedenen Anteile Kaolinit und Werte anderer Größenordnung zu Lasten quellfähigerer Tonminerale gehen werden.

Zerfallsversuche

Für die vorliegende Arbeit wurden mehrere Versuchsreihen mit Durchschnittsprobematerial durchgeführt, um die ermittelten Abhängigkeiten bei der Behandlung der Fragen des Kliffzerfalls und der Abrasionserscheinungen anwenden zu können.

Die Ermittlung der Zerfallsgeschwindigkeit erfolgte in einem wassergefüllten Standzylinder, in den die in einem Drahtgestell befindliche Probe bei verschiedenem Wassergehalt eingehängt und die Abnahme des Gewichtes der zusammenhängenden Probe in gewissen Zeitabständen gemessen wurde.

Durchlässigkeit

Die Ermittlung des Durchlässigkeitskoeffizienten für die einzelnen pleistozänen Lockergesteine wurde an mehreren Proben im Labor durchgeführt, da hieraus Beziehungen zur Versickerung und zum Abfließen des Grund- und Oberflächenwassers vor allem am Steilufer des Klütz-Höved gewonnen werden können. Andererseits ist die Kenntnis des Durchlässigkeitskoeffizienten zur allgemeinen Charakterisierung eines Lockergesteines von Interesse.

Die Bestimmung von k erfolgte im Druckdurchlässigkeitsgerät bei einer lotrechten Belastung von 3 kp/cm^2 .

Zusammendrückbarkeit bei verhinderter Seitenausdehnung

Die Untersuchung der Proben erfolgte im Druckgerät nach STEIN mit 20 cm^2 Grundfläche (Bild 9a und b). In bestimmten zeitlichen Abständen wird darin die in Abhängigkeit von der lotrechten Belastung und den Materialeigenschaften erfolgende Zusammendrückung der eingebauten Probe gemessen.

Bei Sand beruht diese im wesentlichen auf der Umlagerung — nicht Verformung — der einzelnen Körner, die dadurch eine dichtere Lagerung einnehmen. Deshalb werden auch die anteiligen Setzungen mit zunehmender Auflast geringer. Bei Entlastung schwillt der Sand infolge Nachlassens des Verklemmungsdruckes nur

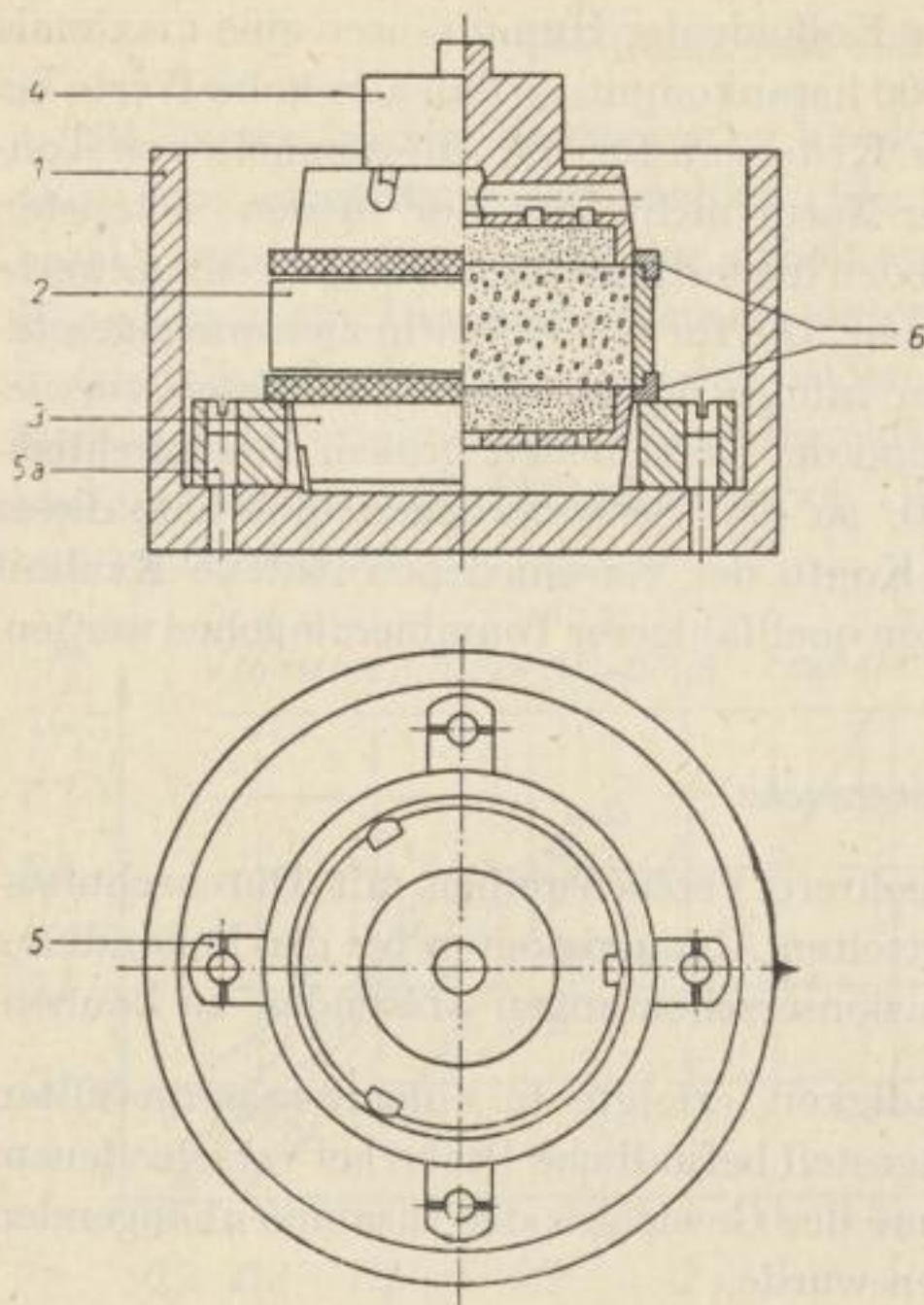


Bild 9a. Druck-Durchlässigkeitsgerät nach STEIN (Prinzipskizze)

1 Topf; 2 Probenring; 3 unteres Druckstück;
4 Druckstempel 5 und 5a Stützen mit Stützenbolzen

in geringem Maße, da ja die erfolgte Umlagerung nicht wieder aufgehoben werden kann. Der Setzungsverlauf selbst verläuft bei Sanden infolge ihrer hohen Durchlässigkeit sehr rasch. Bei einem bindigen Lockergestein beruht die Zusammendrückung dagegen auf dem Auspressen des Porenwassers, das bei der Lastaufbringung, da es am schnellen Abfließen infolge der geringen Durchlässigkeit gehindert wird, die gesamte Last trägt. Mit dem Auspressen des Porenwassers überträgt sich die Last allmählich auf das Korngerüst. Je mehr Wasser demnach ein bindiges Lockergestein besitzt, um so größer wird die Setzung sein, je undurchlässiger es ist, desto langsamer wird sie verlaufen. Ein vollkommenes Auspressen des Wassers ist in einem bindigen Lockergestein auf mechanischem Wege nicht möglich, da das Wasser zu fest an die Tonteilchen gebunden ist. Bei der Entlastung unter Wasserzugabe schwillt ein bindiges Lockergestein durch eine Vergrößerung der Wasserhüllen wesentlich mehr als ein rolliges Lockergestein. Da während der Belastung ein Teil der in bindigen Lok-

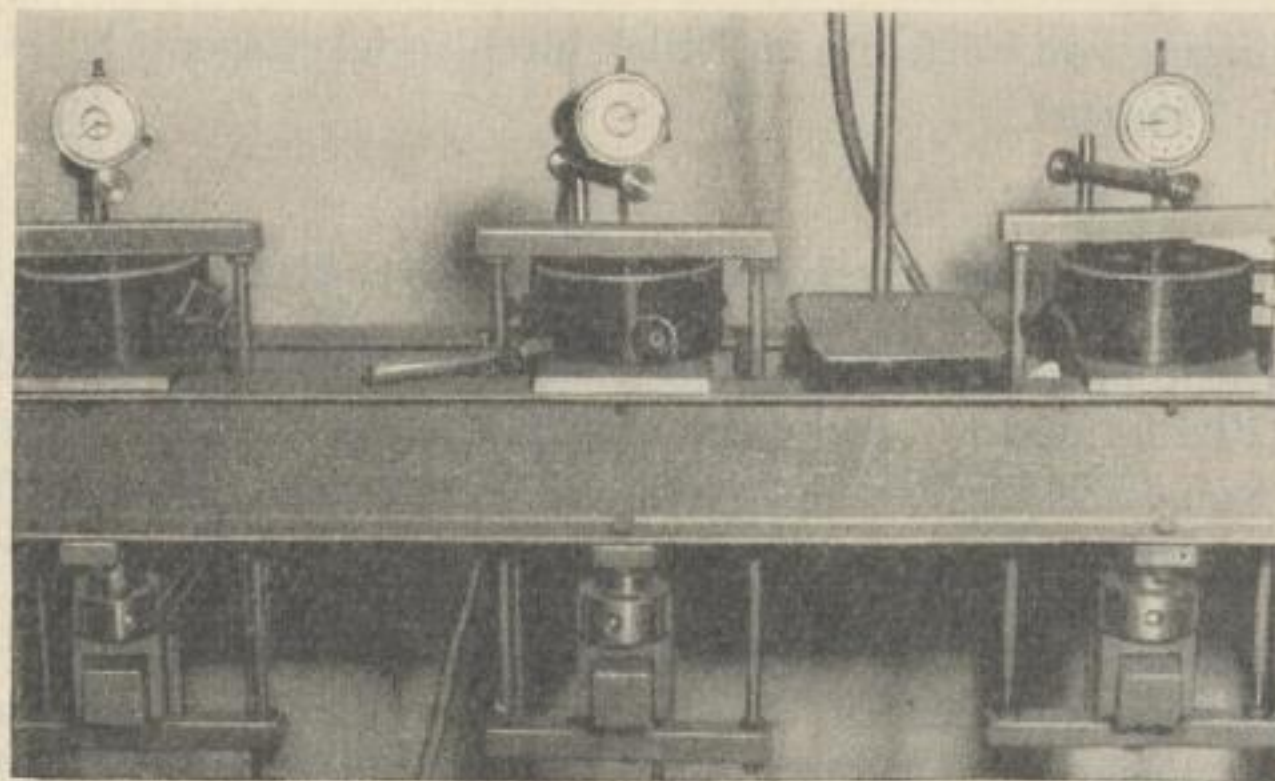


Bild 9b. Druck-Durchlässigkeitsgerät nach STEIN

kergesteinen vorhandenen Wabenstruktur zusammenbricht, können die Tonminerale bei der Entlastung nicht mehr soviel Wasser ansaugen, wie sie bei der Belastung abgegeben haben, so daß die Probe beim Schwellen nicht mehr dieselbe Höhe erreichen kann wie bei Beginn der Belastung.

Die Veranschaulichung der Versuche erfolgt durch Auftragung der Ergebnisse als Zeitsetzungslinie oder als Druck-Setzungs-(Porenziffer)Diagramm. Im ersten Fall wird für jede Laststufe die Setzung der Probe infolge der Belastung als Funktion der Zeit dargestellt. Die Zeitsetzungslinie kann man zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs von Bauwerkssetzungen verwenden, ebenso sind sie geeignet zur indirekten Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten nach Verfahren von THERZAGI und CASAGRANDE. Da diese Fragen über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgehen, konnte auf die Darstellung von Zeitsetzungslinien verzichtet werden. Die Ermittlung von Druck-Setzungs- bzw. Druck-Porenziffer-Diagrammen war dagegen für die vorliegende Arbeit von Bedeutung, da hieraus, neben allgemein interessierenden Fragen über die Zusammendrückbarkeit in Abhängigkeit vom korn- und mineralmäßigen Aufbau der untersuchten Lockergesteine vor allem das Problem der geologischen Vorbelastung — als aussagekräftiger Wert hinsichtlich der ehemaligen Eisauflast — abgeleitet werden kann. Für die Darstellung der Druck-Setzungs-(Porenziffer)Kurven wird die Belastung (p) in kp/cm^2 auf der waagerechten Achse und die Setzung (s) als auf die Ausgangsprobenhöhe (h) bezogene Endsetzung (Δh) jeder Belastungsstufe

auf der senkrechten Achse aufgetragen ($s = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100$ i. %). An Stelle der bezogenen

Setzung oder auch zusätzlich dazu kann auf der senkrechten Achse die Porenziffer (ε) aufgetragen werden. Die Berechnung der Anfangsporenziffer (ε_0) erfolgt nach der Formel

$\varepsilon_0 = \frac{V \cdot \gamma_t}{G_t} - 1$. Die Verkleinerung $\Delta \varepsilon$ der Porenziffer ergibt sich aus der verlorenen Höhe der Probe — der Zusammendrückung Δh — nach der Formel

$\varepsilon_p = \frac{h - h_0 - \Delta h}{h_0}$.

Bei den so dargestellten Druck-Setzungs- oder Druck-Porenziffer-Kurven lassen sich sowohl bei linearer als auch halblogarithmischer (p -Achse logarithmisch) Auftragung bei der Prüfung ungestörter Proben zwei sich unterscheidende Kurvenäste erkennen. Da der größte Teil aller Lockergesteine infolge der vielfältigen geologischen Gegebenheiten zu irgendeinem Zeitpunkt seit seiner Entstehung unter einer bestimmten Belastung gestanden hat, also verdichtet worden ist, muß der Zusammendrückungsversuch einer mit Sorgfalt entnommenen und eingebauten ungestörten Probe eines bindigen Lockergesteines diese sogenannte geologische Vorbelastung widerspiegeln. Aus diesem Grunde zeigt die Druck-Setzungs-Kurve eines ungestörten Bodens bis zur Erreichung der Vorbelastung nur einen flachen Abfall, d. h. geringe Setzungen trotz steter Lastzunahme, da die Zusammendrückung bis zur Vorbelastung durch natürliche Vorgänge — z. B. Sedimentauflast oder Eisdruck — bereits erfolgt ist und im Druckversuch nur noch einmal wiederholt wird. Erst nach Überschreiten des Druckes der Vorbelastung beginnt der Erstverdichtungsast der Druck-Setzungs-Kurve, der als Folge einer erstmaligen Zusammendrückung stark abfällt, d. h. bei Lastzunahme eine wesentlich höhere Setzung als der Wiederverdichtungsast zeigt. Der Übergang vom

Wiederverdichtungsast zum Erstverdichtungsast kann sich bei linearer Auftragung als mehr oder weniger deutlicher Wendepunkt, bei halblogarithmischer Auftragung als mehr oder weniger gut erkennbarer Knick bemerkbar machen. Normalerweise wird eine auf Zusammendrückung untersuchte Probe nach der letzten Laststufe noch entlastet, um das Schwellen, dessen Höhe vom Tonmineralgehalt und der Möglichkeit der Wasseraufnahme abhängig ist, als Entlastungs- oder Schwellkurve aufzutragen.

Aus der Belastungs- und Entlastungskurve kann man jeweils für einen bestimmten kleinen Belastungsbereich die Steifezahl (E_s) als das Verhältnis

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta h}{h}} = \frac{\Delta p}{\Delta s} = E_s \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

bestimmen.

Diese Zahl ist also von der Belastung abhängig, ändert sich mit dieser und kann den durch den Versuch ermittelten Kurvenverlauf nicht charakterisieren. Es sind Versuche unternommen worden, den Kurvenverlauf analytisch wiederzugeben. In der Arbeit wird die von OHDE gefundene Beziehung angewendet $E_v = V = \bar{v} \cdot p^\omega$ (kp/cm²). Darin bedeutet p die auf die Erdprobe wirkende Belastung; v den Verdichtungsbeiwert (Materialkonstante), der aus dem Verlauf der Kurve — getrennt nach Wiederbelastungs- und Erstbelastungsast — berechnet werden muß; ω den Sandigkeits-exponenten. Die Beziehung $V = \bar{v} \cdot p^\omega$ wurde dabei nach der von RUDERT u. FRITZSCHE entwickelten halbgraphischen Methode aus den Zusammendrückungsversuchen errechnet. Sie gestattet gleichzeitig die schnelle Ablesung der Vorbelastung p_v (Bild 10). Bei diesem schnellen und relativ einfach durchzuführenden Verfahren wird das Drucksetzungsdiagramm linear aufgetragen, und zwar in einem Maßstab, der den gebogenen Verlauf dieser Kurve gut widerspiegelt. Bei verschiedenen Laststufen werden dann mit Hilfe eines Spiegellineals Tangenten an die Kurve angelegt und daraus der Tangens des Neigungswinkels, also der $E_s(V)$ -Wert, abgelesen. Die für V gefundenen Werte werden nun in Abhängigkeit vom jeweiligen p auf doppeltlogarithmisches Papier aufgetragen und eine ausgleichende Gerade hineingelegt. Dabei ergibt sich bei ungestörtem Untersuchungsmaterial ein gut abzulesender Knick in der Ausgleichsgeraden, der den Wiederbelastungsast und den Erstbelastungsast voneinander trennt und die geologische Vorbelastung zum Ausdruck bringt. Aus diesem Diagramm lassen sich v und ω für den Wiederbelastungs- und Erstbelastungsast einfach ablesen und damit für jede Kurve die Gleichung nach OHDE aufstellen.

Scherfestigkeit

Als Scherfestigkeit eines Lockergesteines bezeichnet man den Widerstand, den es einer durch äußere Kräfte verursachten Verschiebung in einer Gleit- oder Bruchfläche entgegensetzt. Seine Höhe ist dabei abhängig vom Kornaufbau, dem Wassergehalt, der Stärke der senkrechten Belastung und der Geschwindigkeit seiner Aufbringung als Folge des sich einstellenden Porenwasserdruckes.

Die Scherfestigkeit der nichtbindigen, sandigen Lockergesteine hat ihre Ursache in der durch das verzahnte Einzelkorngefüge hervorgerufenen inneren Reibung. Diese

Druckversuch bei verhinderter Seitenausdehnung

Erdart: Geschiebelehm
(KLütz-Höved)
Zustand: ungestört
Gerät-Nr.: 1
Druckstempel: 0,227 kg

Probenfläche F: 20 cm²
Stoffgewicht γ_s : 2,68 g/cm³
Wassergehalt ^{Einbau} nach Ausb. w: 0,085 %
Trockengewicht nach Ausb. G_{tr} : 72,85 g

Uhrstand	Schichtdicke
mm	mm
<u>0,015</u>	<u>19,8</u>

Ablesung mit Paßstück +
 Ablesung mit Erdprobe -
 Paßstückhöhe
 Ablesungsdifferenz/Schichtdicke bei Einbau /
 Uhrstand bei Versuchsbeginn / Horizont \bar{z}_1 + /
 Uhrablesung vor Uhrumstellung -
 Uhrablesung nach Uhrumstellung / Horizont \bar{z}_2 + /
 Uhrstand bei Ausbau: Schichtdicke bei Ausbau -

Höhe des Festmassenraumes pro Flächeneinheit $z_o = \frac{G_{tr} \cdot 10}{F} \cdot \frac{1}{\gamma_s} = \dots \dots \dots$ mm

Höhe des Porenraumes nach Ausbau pro Flächeneinheit $z_p = \frac{G_{tr} \cdot 10}{F} \cdot w = \dots \dots \dots$ mm

Schwellzahl $S = \frac{2,3}{\epsilon \cdot 1,0 - \epsilon \cdot 10,0} (1 + \epsilon \cdot 10) \cdot P_{1,0} = \dots \dots \dots$ $\cdot p = \dots \dots \dots$ kg/cm²

Bild 10a. Laborprotokoll eines Druckversuches bei verhinderter Seitenausdehnung

Last + Druckstempel kg kg / cm ²		Uhrstand u mm		Setzung ‰
	0,1	0,126		0,636
	1,0	0,233		1,10
	2,0	0,489		2,47
	3,0	0,577		2,92
	4,0	0,628		3,18
	5,0	0,722		3,65
	6,0	0,758		3,83
	7,0	0,786		3,98
	8,0	0,814		4,11
	9,0	0,837		4,23
	10,0	0,869		4,38
	11,0	0,889		4,54
	4,0	0,785		3,97
	2,0	0,776		3,92
	0,1	0,585		2,96

Bild 10a. Laborprotokoll eines Druckversuches bei verhinderter Seitenausdehnung
(Rückseite)

als Reibungsfestigkeit ($\mu = \text{tg } \rho$) bezeichnete Korn-an-Korn-Reibung wird um so stärker, je größer die direkten Berührungsflächen der einzelnen Mineralkörnchen sind (Kornform) und je mehr die Einzelkörner infolge einer Auflast (σ) aneinandergepreßt werden, d. h., die Scherfestigkeit eines Sandes oder Kieses wächst proportional der wirksamen Auflast ($\tau = \mu \cdot \sigma$). Demzufolge wächst die Scherfestigkeit eines nichtbindigen Lockergesteines mit der Tiefe. Eine außerordentliche Zunahme erfährt die Scherfestigkeit von Sanden bei einer kapillaren Durchfeuchtung durch die wirksamen Kapillarspannungen, die die einzelnen Mineralkörnchen fest aneinanderpressen und eine sogenannte „scheinbare Haftfestigkeit oder Kohäsion (c_s)“ hervorrufen, die also zusätzlich zur Reibungsfestigkeit wirksam ist ($\tau = \mu \cdot \sigma + c_s$). Bei einer Austrocknung oder Wassersättigung verschwinden die Kapillarkräfte und damit auch die scheinbare Kohäsion. Bei bindigen Lockergesteinen kommt zur Reibungsfestigkeit grundsätzlich noch die echte Haftfestigkeit (c) hinzu. Sie ist eine Folge der bei den feinsten Mineralkörnchen wirksamen Anziehungskräfte. Diese echte Haftfestigkeit wächst mit abnehmendem Wassergehalt bzw. zunehmender Verdichtung infolge der dadurch sich ergebenden Annäherung der Feinstbestandteile. Bei Wassersättigung und der daraus folgenden völligen Auffüllung der Wasserhüllen um die feinsten Körnungen sind die Anziehungskräfte nicht mehr wirksam und die Haftfestigkeit wird Null (vgl. 1.51). Daraus ergibt sich, daß die Scherfestigkeit eines bindigen

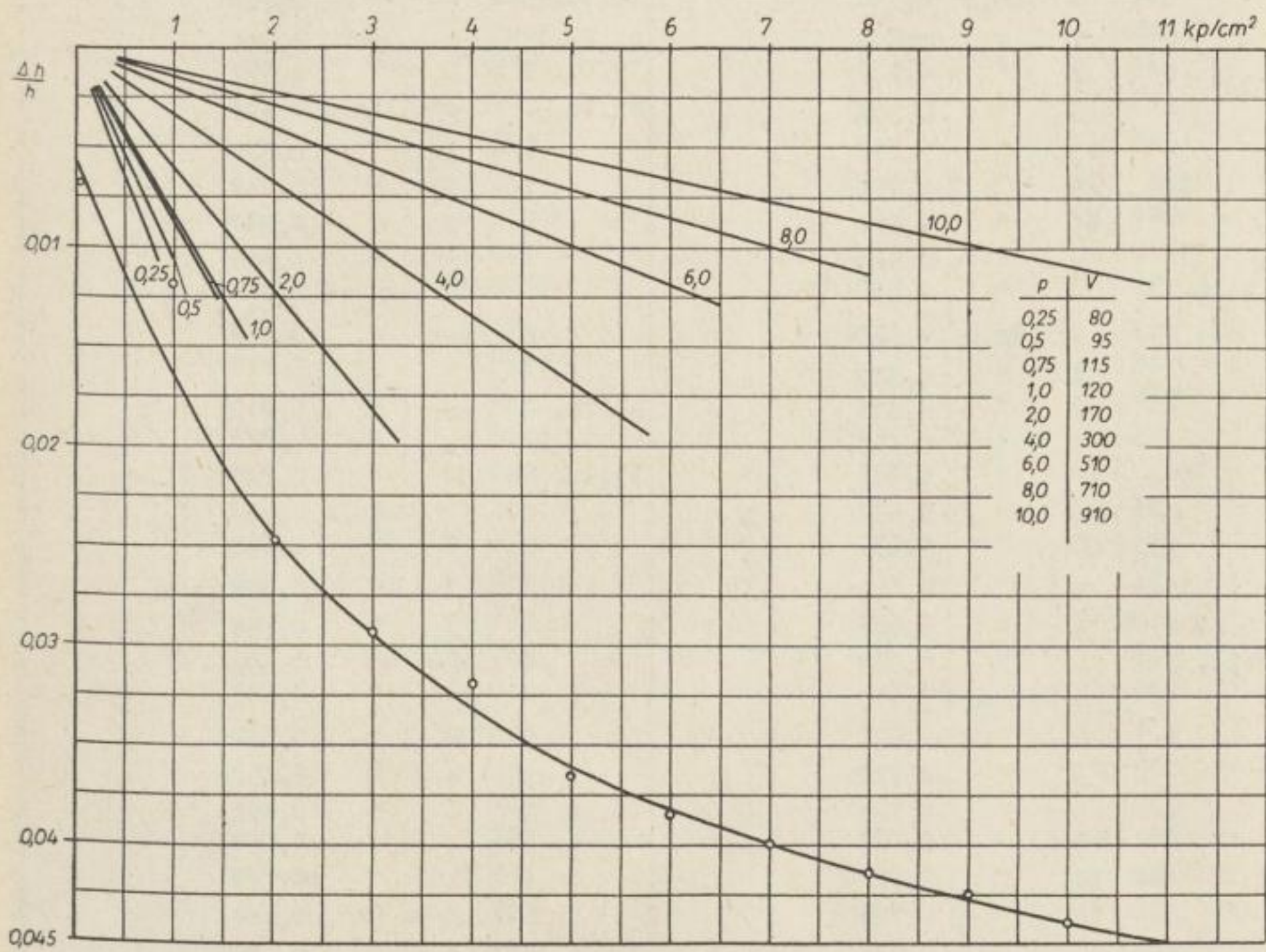


Bild 10c. Auswertung eines Druckversuches bei verhinderter Seitenausdehnung zur Bestimmung der Gleichung $V = \bar{v} ; p^{\omega}$

Druckversuch

Dat.	Zeit		Last kg	Meßuhr		Temp.	Zeit	Last kg	Meßuhr			
	Uhrzeit	min		mm	Δ				Uhrzeit	min	mm	Δ
30.9.	1501	-	2(HA)	0,015			9.10.	810	-	120,0	0,737	
1.10.	810	-	"	0,141				811	1	"	0,769	
	1345	-	"	0,141				813	3	"	0,770	
	1358	-	20,0	0,141				815	5	"	0,770	
	1403	5	"	0,2141				825	15	"	0,770	
	1413	15	"	0,2143				840	30	"	0,770	
	1428	30	"	0,2143				910	60	"	0,771	
	1458	60	"	0,214				1545	60	"	0,773	
2.10.	715	-	"	0,248			10.10.	745	-	"	0,773	
	725	-	40,0	0,248				755	-	140,0	0,773	
	730	5	"	0,489				756	1	"	0,790	
	740	15	"	0,490				750	3	"	0,791	
	755	30	"	0,490				800	5	"	0,791	
	825	60	"	0,491				810	15	"	0,792	
	1545	-	"	0,493				825	30	"	0,792	
3.10.	800	-	"	0,494				855	60	"	0,793	
	804	-	60,0	0,494			10.10.	1525	-	"	0,799	
	805	1	"	0,589				11.10.	1550	-	0,801	
	807	3	"	0,589				12.10.	725	-	0,801	
	809	5	"	0,589				12.10.	730	-	160,0	0,801
	819	15	"	0,590					731	1	"	0,812
	834	30	"	0,590					733	3	"	0,812
	904	60	"	0,592					735	5	"	0,812
	1535	-	"	0,582					745	15	"	0,812
4.10.	735	-	"	0,582					800	30	"	0,812
	745	-	80,0	0,582					830	60	"	0,813
	746	1	"	0,632					1150	-	"	0,815
	748	3	"	0,632				14.10.	805	-	"	0,819
	750	5	"	0,633					1540	-	"	0,828
	800	15	"	0,633				15.10.	805	-	"	0,829
	815	30	"	0,633					806	-	180,0	0,829
	845	60	"	0,633					807	1	"	0,842
	1534	-	"	0,640					809	3	"	0,842
5.10.	1130	-	"	0,642					811	5	"	0,842
8.10.	725	-	"	0,643					821	15	"	0,843
	730	-	100,0	0,643					836	30	"	0,845
	731	1	"	0,722					906	60	"	0,847
	733	3	"	0,722					1540	-	"	0,852
	735	5	"	0,722				16.10.	811	-	"	0,852
	745	15	"	0,722					944	-	200,0	0,852
	800	30	"	0,723					945	1	"	0,879
	830	60	"	0,725					947	3	"	0,880
	1559	-	"	0,732					949	5	"	0,880
9.10.	805	-	"	0,737					959	15	"	0,880
									1014	30	"	0,880

Bild 10b. Laborprotokoll eines Druckversuches bei verhinderter Seitenausdehnung zur Bestimmung der Gleichung $V = \bar{v} ; p^{\phi}$

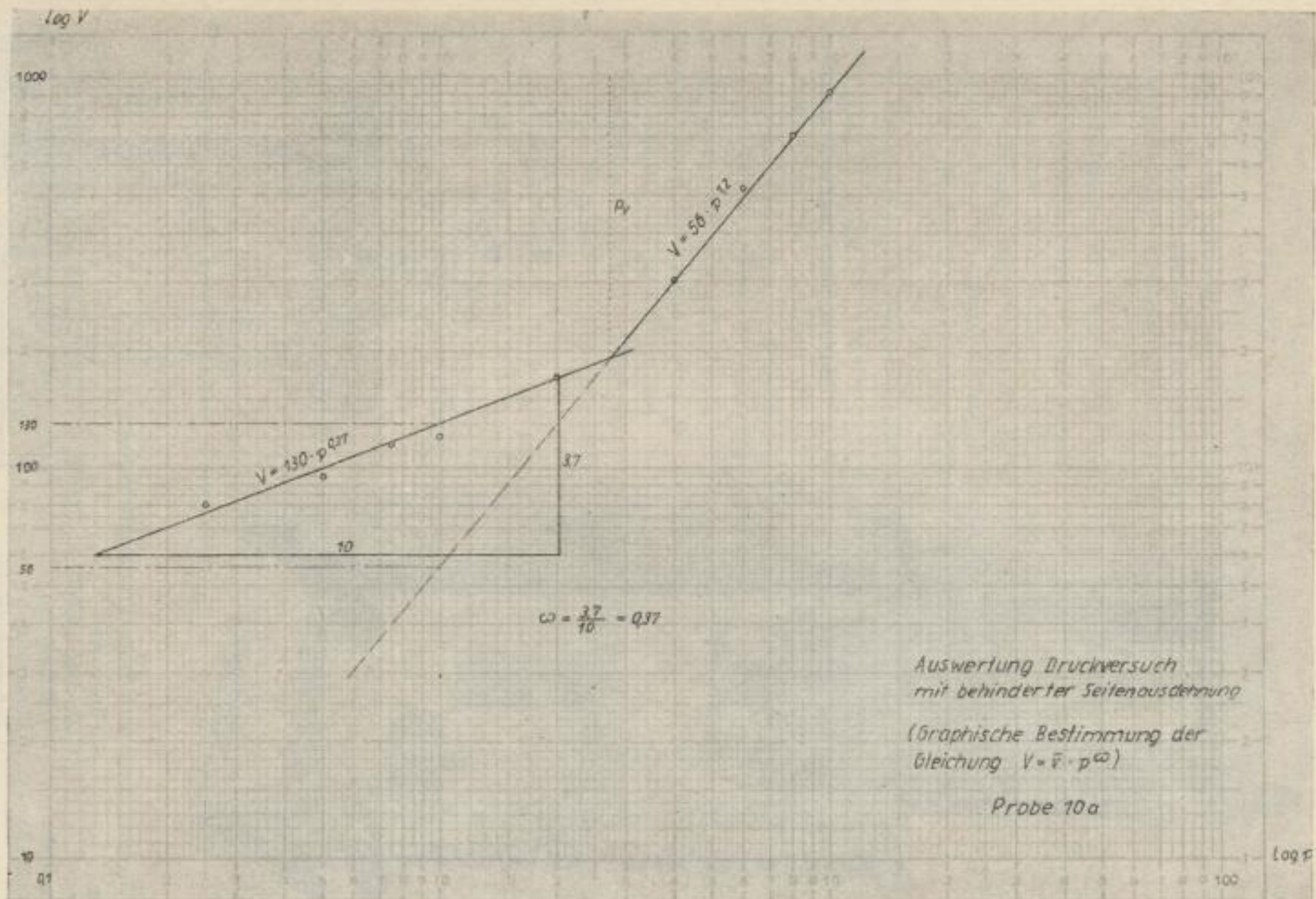


Bild 10d. Auswertung eines Druckversuches mit verbotener Seitenausdehnung zur Bestimmung der Gleichung $V = \bar{v} \cdot p^\omega$

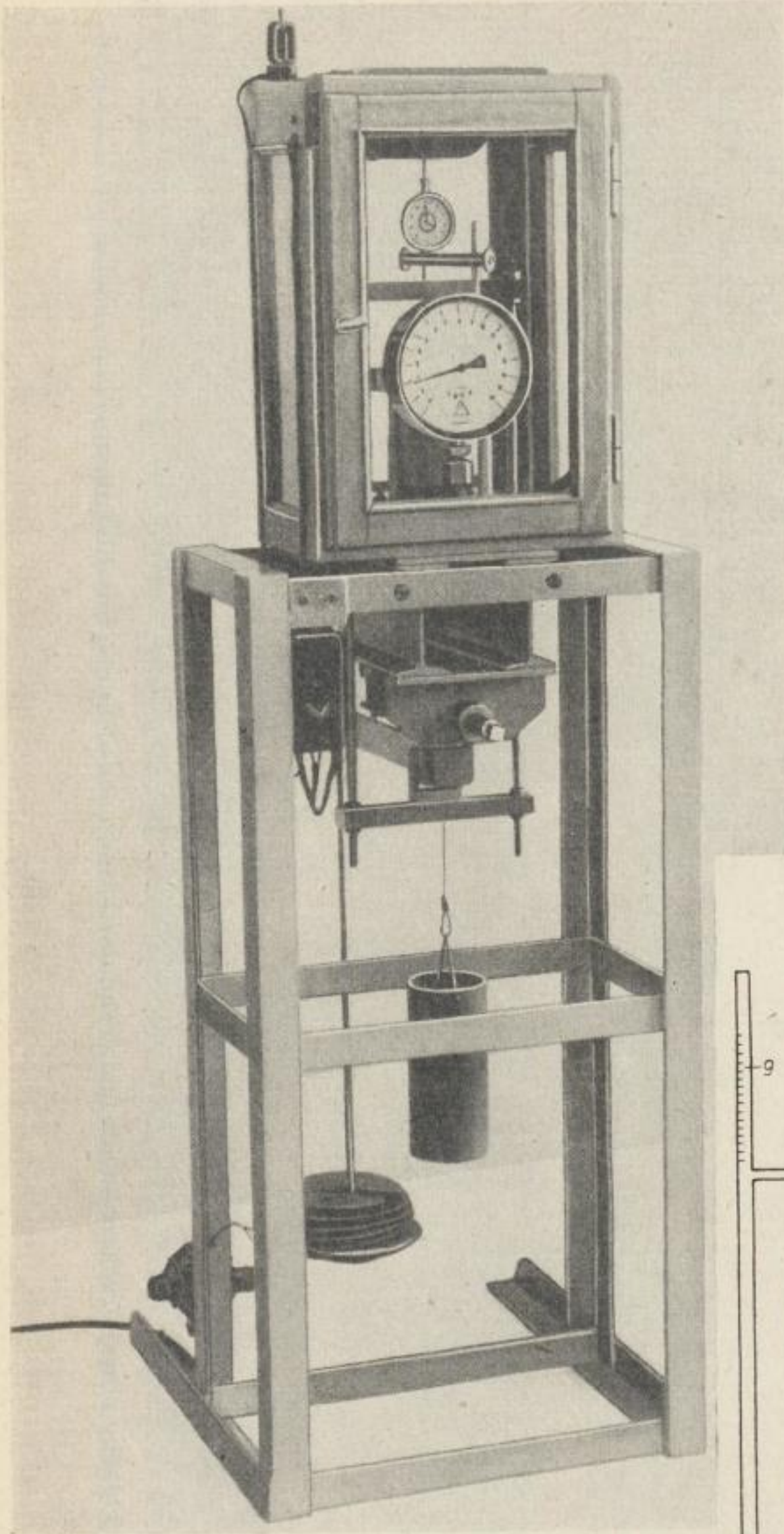
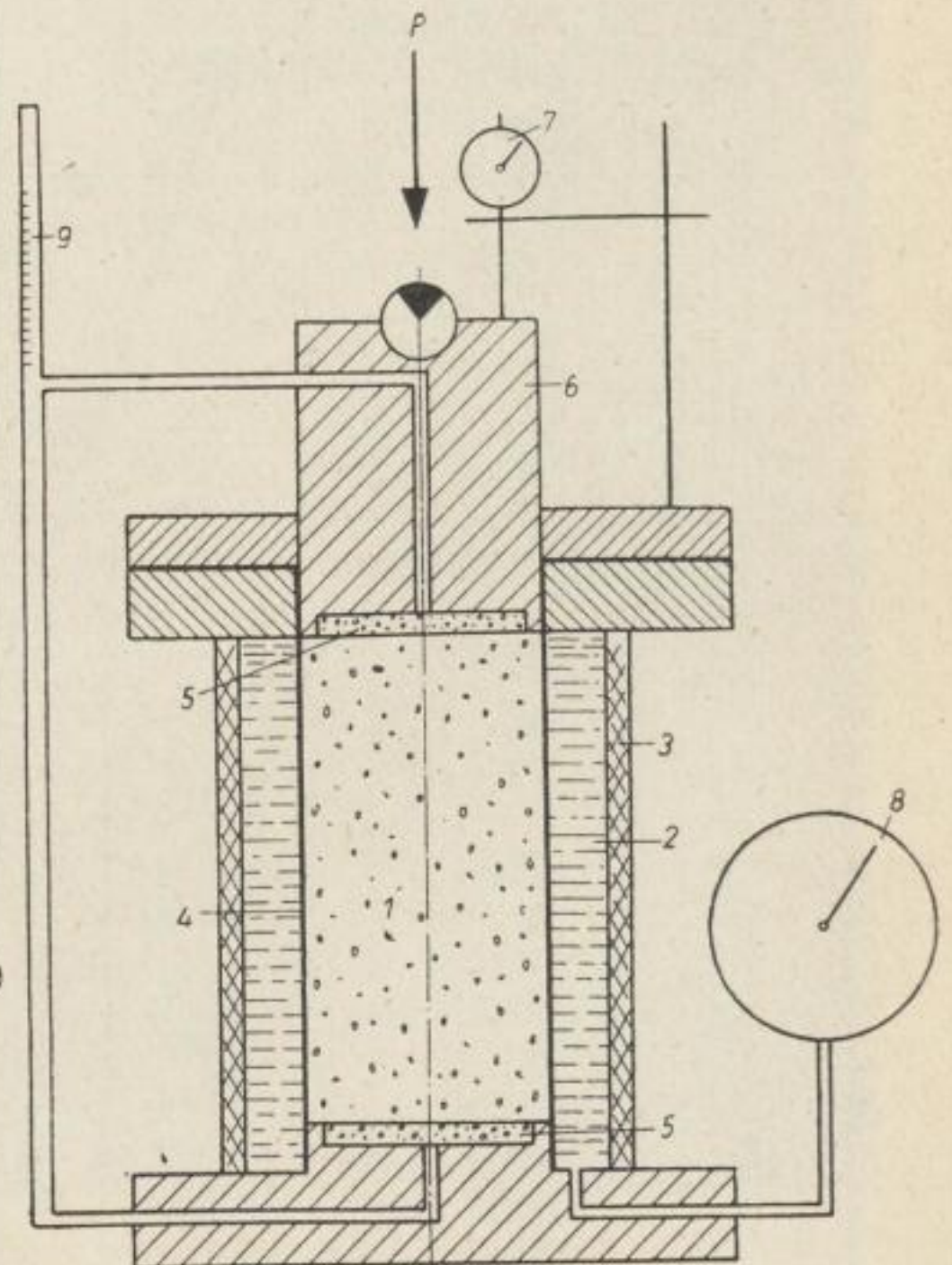


Bild 11 a. Seitendruckgerät nach STEIN (Prinzipskizze)

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1 Probe | 5 Filtersteine |
| 2 Wasser | 6 Druckstempel |
| 3 Glaszylinder | 7 Meßuhr |
| 4 Gummihülle | 8 Manometer |
| | 9 Porenwassermesser |

Bild 11 b. Seitendruckgerät nach STEIN



Lockergesteines sowohl von den im Untergrund wirksamen Spannungen als auch von seinem Wassergehalt abhängig ist. Werden dabei die lotrechten Spannungen schnell wirksam, kann das Porenwasser sich nicht rasch genug den neuen Bedingungen angleichen, die Last wird also zuerst vom Porenwasser aufgenommen und die Reibung zwischen den Bodenteilchen kann völlig aufgehoben werden. Der Boden gleitet dann gewissermaßen auf den Wasserhüllen, und die Reibungsfestigkeit geht verloren.

Scherfestigkeitsuntersuchungen an den vorhandenen Geschiebemergel- und Geschiebelehmproben waren für die vorliegende Arbeit von großer Wichtigkeit, da hiervon der gesamte mit der Kliffzerstörung und -sicherung zusammenhängende Fragenkomplex abhängt. Außerdem ist die Feststellung der Reibungsfestigkeit und Haftfestigkeit für die rein bodenphysikalische Charakterisierung der bearbeiteten Lockergesteine und die Beziehung zu anderen Kennziffern von Interesse.

Die Untersuchung der Scherfestigkeit erfolgte ausschließlich im Seitendruckgerät nach STEIN [13], das im Gegensatz zu den in vielen Versuchsanstalten üblichen Kreisring- oder Kastenschengeräten die Verwendung und Untersuchung ungestörter zylinderförmiger Proben in den Abmessungen 20 cm² Grundfläche und 10 cm Höhe gestattet (Bild 11 a und b). Der besondere Vorteil dieser Methode liegt auf der Hand, denn nur ungestörte Proben können infolge zusätzlicher Berücksichtigung der Gefügeausbildung ein genaues Bild der für ein Lockergestein charakteristischen Scherfestigkeit zeigen. Durch die Verwendung aufbereiteter Proben für die erstgenannten Gerätetypen wird trotz Aufbringens einer lotrechten Last zur Konsolidierung des Erdmaterials vor allem die Höhe der tatsächlich vorhandenen Haftfestigkeit verfälscht. Bei dem hier verwendeten Gerät wird die zu untersuchende Probe in eine Gummihülle eingebaut, die sich in einem wassergefüllten dickwandigen Glaszylinder befindet. Mit Kolben wird die Probe lotrecht belastet (σ_v) und ihre Setzung an einer Meßuhr abgelesen. An einem mit dem Wasser in Verbindung stehenden Manometer kann der sich einstellende Seitendruck (σ_h) abgelesen werden. Die Verwendung von Filtersteinen gestattet den notwendigen Porenwasserausgleich für die Durchführung von Versuchen im offenen System. Andererseits kann der Versuch auch im geschlossenen System, d. h. ohne Filtersteine, durchgeführt werden. Bei Verminderung des Seitendruckes durch Ablassen eines Teiles des zwischen Glaszylinder und Probe befindlichen Wassers kann der Versuch auch bis zum Erreichen des Bruchzustandes ablaufen.

Die Berechnung der Reibungsfestigkeit und Haftfestigkeit geschieht dabei mit Hilfe der MOHRschen Spannungskreise (Bild 12).

Proctordichte

Die Durchführung dieses Versuches erfolgte in einem aufklappbaren (zur leichten und einwandfreien Entnahme des verdichteten Erdmaterials für die Durchführung der Frostversuche) Zylinder mit den Abmaßen 10,9 cm Durchmesser und 15 cm Höhe. Darin wurden die zu untersuchenden Lockergesteine in drei Schichten von je

Triaxialversuch

Auftrag: Klütz-Höved

Nr. 14a /

Erdart: Geschiebemergel

Probenfläche $F = 20 \text{ cm}^2$ Höhe $h_0 = 10 \text{ cm}$

Bemerkungen: ungestört

Datum Temp.	Zeit	σ_v kg/cm ²	σ_h kg/cm ²	Uhrstand mm		Datum Temp.	Zeit	σ_v kg/cm ²	σ_h kg/cm ²	Uhrstand mm	Wasser cm ³	Korr. v kg/cm ²
30.7.	1442	1,0	0,00	0,00		4.8.	744	13,0	4,78	10,85		
	1447	"	0,00	0,57			745	14,0	4,78	10,85		
	1451	2,0	0,00	0,57			1035	"	5,35	11,13		
	1452	"	0,36	0,738								
	1453	3,0	0,36	0,738				14,0	4,85	12,90	2,3	13,11
	1515	"	0,47	3,000				"	4,04	14,79	5,7	13,53
	1516	4,0	0,47	3,000				"	4,15	16,80	9,1	13,3
31.7.	734	"	0,87	3,278				"	3,89	17,43	12,1	13,05
	750	5,0	0,87	3,278				"	4,02	18,53	12,1	13,01
	1214	"	1,31	5,031				"	3,51	20,62	19,5	-
	1215	6,0	1,31	5,031				"	3,82	20,73	19,5	12,45
	1550	"	1,77	5,944				"	3,60	22,62	22,8	12,2
	1551	7,0	1,77	5,944				"	3,51	24,42	26,4	11,94
1.8.	736	"	2,12	6,860				"	3,32	24,71	26,4	11,9
	1310	8,0	2,15	7,455				"	3,55	27,41	31,9	11,5
	1600	"	2,64	7,519		6.8.	937	14,0	3,60	27,45		
	1601	9,0	2,64	7,519								
2.8.	820	"	3,02	8,341								
	824	10,0	3,02	8,341								
	1305	"	3,53	8,845								
	1307	11,0	3,53	8,845								
	1630	"	3,98	9,420								
3.8.	730	"	9,91	9,612								
	731	12,0	3,91	9,612								
	1615	"	4,48	10,189								
	1620	13,0	4,48	10,189								

Bild 12a. Laborprotokoll eines Seitendruckversuches zur Bestimmung der Scherfestigkeit

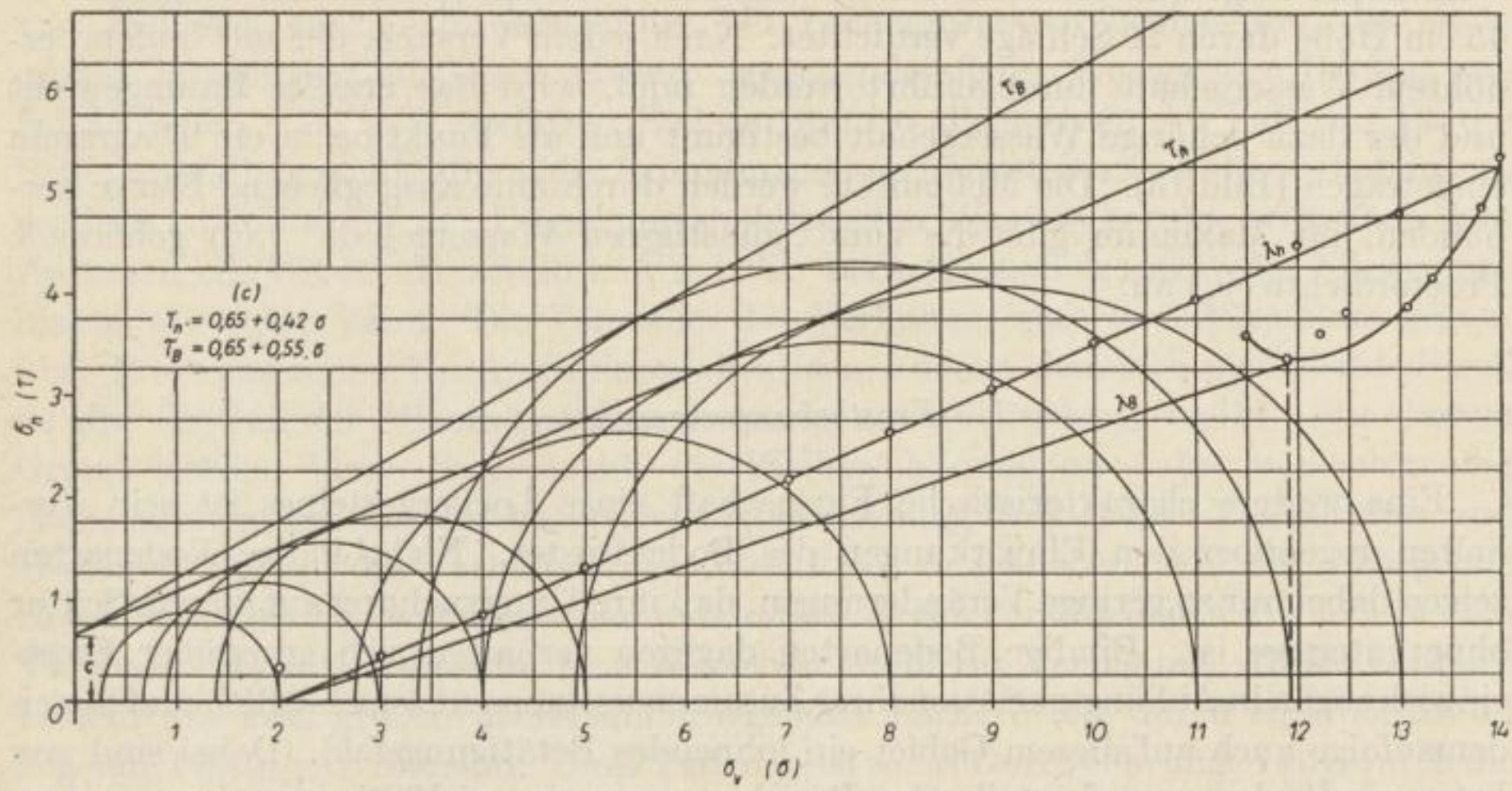


Bild 12b. Auswertung eines Seitendruckversuches zur Bestimmung der Scherfestigkeit

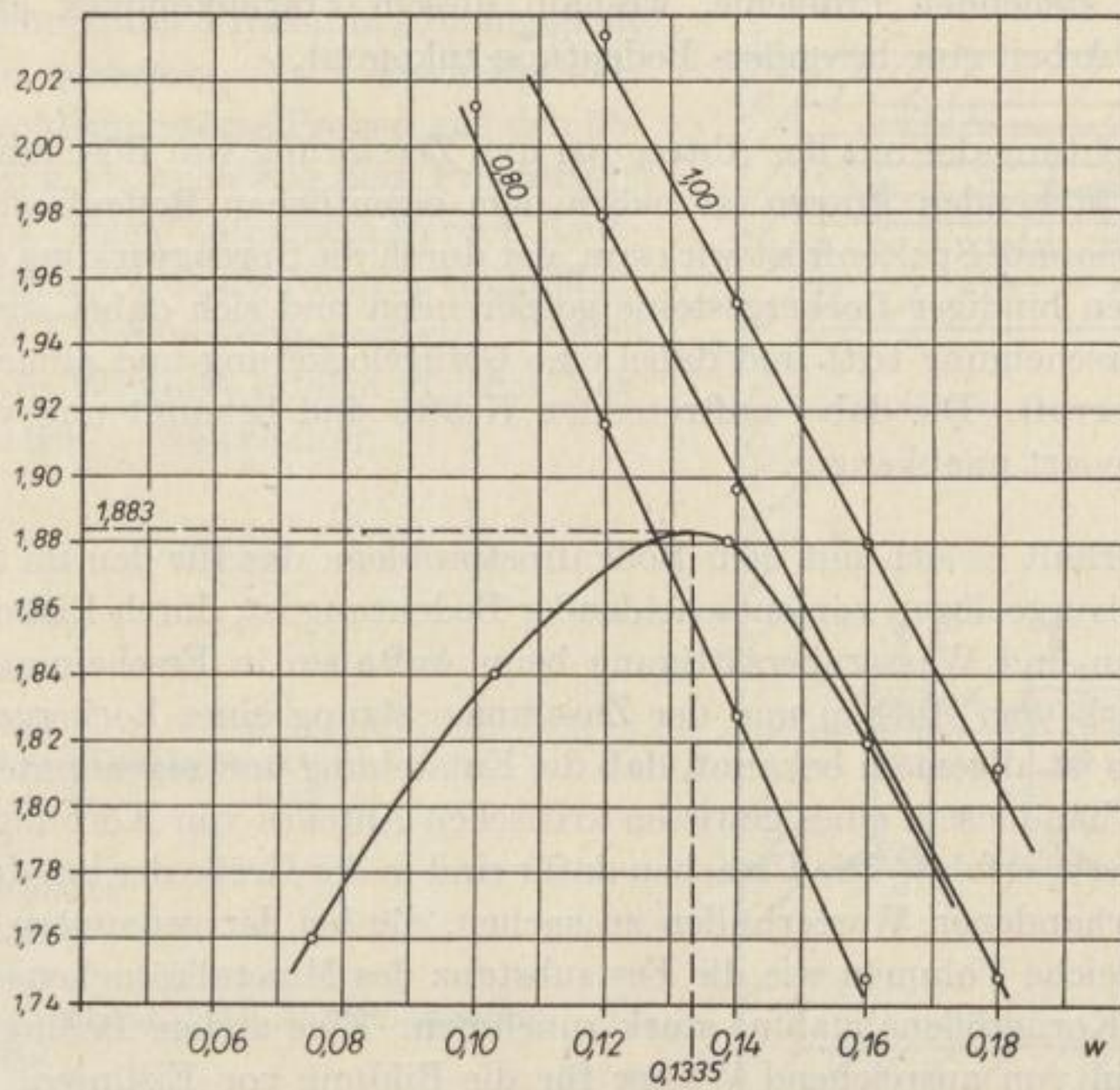


Bild 13. Auswertung eines Proctorversuches zur Bestimmung von w_p und γ_p mit eingezeichneten Sättigungskurven

5 cm Dicke eingebaut und mit einem Fallgewicht von 2,5 kp aus einer Fallhöhe von 45 cm Höhe durch 20 Schläge verdichtet. Nach jedem Versuch, der mit laufend erhöhtem Wassergehalt durchgeführt werden muß, wird das erzielte Raumgewicht und der dazu gehörige Wassergehalt bestimmt und als Funktion in ein Diagramm eingetragen (Bild 13). Die Meßpunkte werden durch eine ausgeglichene Kurve verbunden, ihr Maximum gibt die zum „günstigsten Wassergehalt“ (w_p) gehörende Proctordichte (γ_p) an.

Frosthebungsversuche

Eine weitere charakteristische Eigenschaft eines Lockergesteines ist sein Verhalten gegenüber den Einwirkungen des Bodenfrostes. Nichtbindige Bodenarten zeigen dabei nur so geringe Veränderungen, daß ihre Untersuchung auf diesem Sektor ohne Interesse ist. Bindige Bodenarten dagegen verhalten sich gegenüber Frostwirkungen in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung unterschiedlich und bieten demzufolge auch auf diesem Gebiet ein lohnendes Betätigungsfeld. Dabei sind von Interesse die daraus aufzustellenden Beziehungen zu den vielfältigen anderen bodenphysikalischen Kennwerten. Besondere praktische Bedeutung haben aber vor allem die Einflüsse des Frostes auf alle mit der Abtragung und oberflächlichen Zerstörung von Gesteinen und mit den ingenieurgeologischen Fragen des Straßenbaus im Zusammenhang stehenden Probleme, weshalb diesem Fragenkomplex auch in der vorliegenden Arbeit eine besonders Bedeutung zukommt.

Bei Betrachtung der mit der Abtragung und Zerstörung von Böschungen im Zusammenhang stehenden Fragen ist neben dem eigentlichen Bodenfrost vor allem auch der sogenannte Spaltenfrost wirksam, der durch die Sprengwirkung des in Spalten und Rissen bindiger Lockergesteine gefrierenden und sich dabei ausdehnenden Wassers in Erscheinung tritt und dabei eine Gefügelockerung und allmähliche Zerstörung hervorruft. Die dabei auftretenden Kräfte sind bekannt und von der beteiligten Bodenart unabhängig.

Anders verhält es sich mit dem Bodenfrostproblem, das für den im Straßenbau tätigen Ingenieurgeologen von entscheidender Bedeutung ist, durch Eislinsenbildung beim Gefrieren und Wasserübersättigung beim Auftauen in Erscheinung tritt und besonders stark vom Aufbau und der Zusammensetzung eines Lockergesteines abhängig ist. So ist allgemein bekannt, daß die Entstehung von sogenannten Eislinsen erst beim Vorhandensein eines gewissen kritischen Anteiles von Körnungen <0,125 mm Durchmesser erfolgt. Die Ursachen dafür sind in der Größe der um die einzelnen Körnchen vorhandenen Wasserhüllen zu suchen, die bei der genannten Korngröße bereits das gleiche Volumen wie die Festsubstanz des Mineralkörnchens haben und mit weiterer Korngrößenabnahme stark zunehmen. Eine andere Bedingung ist das Vorhandensein von ausreichend Wasser für die Bildung von Eislinsen. Daraus ergibt sich die Bedeutung der Durchlässigkeit eines bindigen Lockergesteines für die Möglichkeit der Eislinsenbildung. Je mehr quellfähige Minerale — also Tonminerale — ein Lockergestein nämlich führt, um so schneller wird die Nachschubfähigkeit für

das zur Eislinsenbildung benötigte Wasser verringert. Die größten Anreicherungen von Eislinsen kann man demzufolge bei Lockergesteinen beobachten, die einen großen Prozentsatz aus Quarzsubstanz bestehender feiner Korngrößen führen, was bei Schluffen (Löß und ähnlichen Bodenarten) im allgemeinen der Fall ist. Da die Eislinsenbildung nicht nur auf der Sammlung des in unmittelbarer Nähe vorhandenen, sondern auch des aus der Umgebung mobilisierten Wassers beruht, tritt nach dem Auftauen ein Wasserüberschuß auf, der das Lockergestein bis über die Fließgrenze hinaus erweichen kann. Die Versuche, das Verhalten eines Lockergesteines gegenüber Frost aus seiner Kornverteilung abzulesen, können demnach nicht befriedigen, da der Einfluß der Mineralzusammensetzung unberücksichtigt bleibt. Aus diesem Grund wurden Versuche gemacht, die Eislinsenbildung im Labor versuchsmäßig nachzuahmen und aus der unterschiedlichen Hebung bei gleichem Temperatur- und Wassereinfluß auf das Verhalten gegenüber Frost zu schließen. Für die vorliegende Arbeit stand der im Geotechnischen Laboratorium von verschiedenen Vorbildern vom Verfasser [14] mitentwickelte Frostversuchsschrank zur Verfügung. Dieser Schrank besteht aus zwei großen übereinanderliegenden Fächern, die durch eine horizontal liegende Platte getrennt sind. Diese Platte weist sechs Durchbohrungen auf, durch die in Kunststoffringen steckende zylinderförmige Proben vom unteren nicht gekühlten Fach nach oben in das eigentliche Kühlfach auftragen (Bild 14). Der Kälteeinfluß kann bei dieser Versuchsanordnung nur von oben wirksam werden, während von unten ein freier Wassernachschub in die Probe möglich ist. Mit Hilfe von Meßuhren wird die Hebung der Proben in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Nach dieser Methode können sowohl ungestörte Proben aus den üblichen Stützen als auch aus dem Proctortopf entnommene Proben untersucht werden. Letzteres Verfahren wurde als Neuheit eingeführt, um bei der Untersuchung gestörter Proben vergleichbare Werte — infolge gleicher Verdichtungsarbeit — zu erhalten.

- A Anschluß an Kühlaggregat
- K Kühlschlangen
- M Meßuhren
- I Isolationsplatte
- R Ringzylinder
- Z Vollzylinder
- S Sandzwischenlage gegen Ausschlämmung
- F Filterplatte
- W Wasserzufuhrstutzen

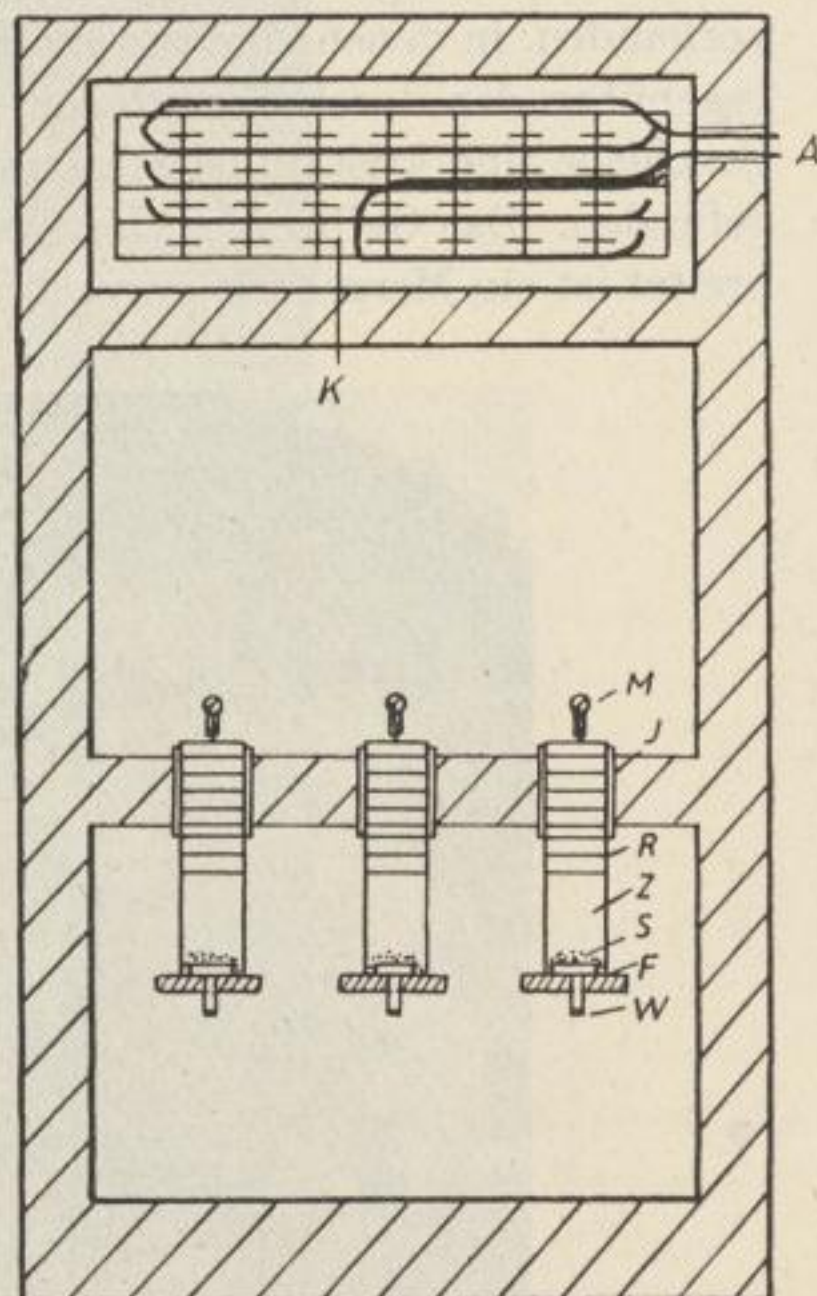


Bild 14. Frostversuchsschrank des Geotechnischen Laboratoriums Dresden

2 ERGEBNISSE DER PETROGRAPHISCHEN, MINERALCHEMISCHEN UND BODENPHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN

2.1 Die petrographische Ausbildung der untersuchten Lockergesteine

Die bei der Probenahme im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved und während der Böschungsherstellung im Bereich des Eisenbahntunnels Altenburg festgestellten petrographisch-strukturellen Eigenheiten der verschiedenen Sedimente werden im folgenden zusammengefaßt dargestellt. Damit können die nicht voneinander zu trennenden Zusammenhänge zwischen petrographisch-struktureller Ausbildung und bodenphysikalischem Verhalten erfaßt werden.

2.11 Geschiebemergel Klütz

Der im Gebiet des Klütz-Höved anstehende Geschiebemergel zeigt überwiegend graue Farbtöne, die je nach dem Feuchtigkeitsgehalt dunkler oder heller sind. Örtlich kann er allerdings neben dem grauen Grundton auch eine schwach bläuliche, grünliche oder rötliche Färbung aufweisen. Rötlichbraune Streifen und Flecken entlang von Klüften und Rissen als Folge der Ausfällung von Eisenverbindungen sind im Geschiebemergel selten. Die Geschiebeführung ist unterschiedlich. Es sind Partien vorhanden, in denen eine gewisse Häufung, andere dagegen, in denen eine Abnahme gegenüber der durchschnittlichen Geschiebeführung festzustellen ist. Die meisten Geschiebe sind kristalliner Herkunft. Selten wurden sedimentäre oder Kreidegerölle gefunden. Das Gefüge des Geschiebemergels ist ebenfalls nicht gleichbleibend. Verbreitet ist ein Mergel mit unregelmäßiger Klüftung (Bild 15). Je nach dem Abstand



Bild 15. Unregelmäßig geklüfteter Geschiebemergel

der Klüfte liegen dazwischen kleinere oder größere Zonen, die eine gänzlich ungliederte und massige Ausbildung zeigen (Bild 16). In einzelnen Kliffabschnitten steht auch ein in kleine Parallelepipede von 2 bis 5 cm Kantenlänge gegliederter



Bild 16. Massig ausgebildeter Geschiebemergel



Bild 17. Zerrütteter Geschiebemergel

Mergel an (Bild 17). Dieser intensiv in drei fast aufeinander senkrecht stehenden Richtungen feinmosaikartig von Scherflächen durchsetzte Geschiebemergel dürfte sein auffälliges Gefüge durch eine besonders starke Eisbeanspruchung erhalten haben, wobei die Bruchgrenze des Erdmaterials überschritten wurde. Bei der Verwitterung zerfällt dieser Mergel in kleine kantige Trümmerstücken (Bild 18). Sehr unregelmäßig sind in den Geschiebemergel Schmitzen, Linsen oder feine Lagen von



Bild 18. Zerfall des zerrütteten Geschiebemergels bei Verwitterung

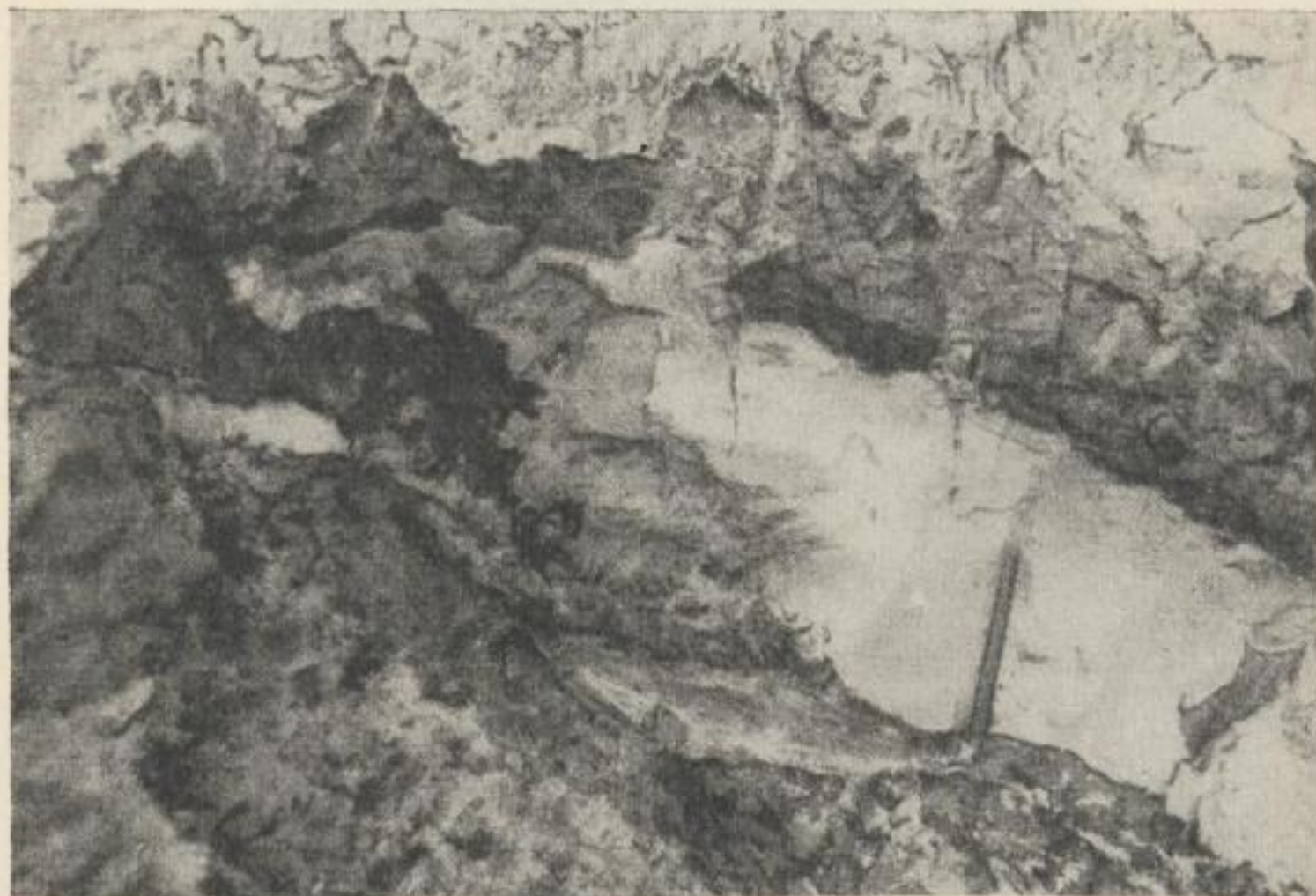


Bild 19. Sandlinse im Geschiebemergel

nichtbindigen Erdarten eingelagert (Bild 19), die verschiedentlich — durch Häufung in parallelen Lagen — eine Schichtung hervorrufen. Auch Einlagerungen von Schreibkreide kommen vor, und zwar ausschließlich im Bereich der Ablagerungen von Gr.-Klütz-Höved. Es konnte auch festgestellt werden, daß der Geschiebemergel an verschiedenen Stellen des Kliffs parallel der Anschnittsfläche in dünnen millimeterstarken Schalen abblättert (Bild 20). Die Annahme, daß die Ursache dafür in rhythmisch wechselnden Materialeigenschaften liegt, fand keine Bestätigung.

2.12 Geschiebelehm Klütz

Die hangenden Zonen des Geschiebemergels von Klütz-Höved sind durchschnittlich bis auf 5 oder 6 m Mächtigkeit — je nach dem Kliffaufbau — verlehmt. Durch den Einfluß des durch Sickerwässer usw. herantransportierten Sauerstoffs wurden Oxydationsstufen des Eisens erreicht, die dem Geschiebelehm hellbraune bis rotbraune Farbtöne verleihen. In den Übergangszonen zum unveränderten Mergel nimmt der graue Farbton immer mehr zu bis zum normalen dunkelgrauen Geschiebemergel. Kräftig rötlich gefärbte Ausfällungen von Eisenverbindungen in Form von Flecken im Mergel oder dünnen Häutchen, Belägen und Streifen auf Klüften sind sehr häufig. Auch weißlichgraue Ausfällungen von Kalk in unterschiedlicher Intensität und Größe sind für den Geschiebelehm des Klütz-Höved typisch. Hinsichtlich Geschiebeführung und Gefüge gilt das für den Geschiebemergel unter 2.11 Gesagte. Ergänzend ist nur zu bemerken, daß die unregelmäßige Klüftung als Folge der intensiv wirkenden Verwitterungseinflüsse im Geschiebelehm und hier besonders in den hangenden Zonen weit verbreitet ist. Oft sind die Klüfte etwas geöffnet und nach Regenfällen wassererfüllt.

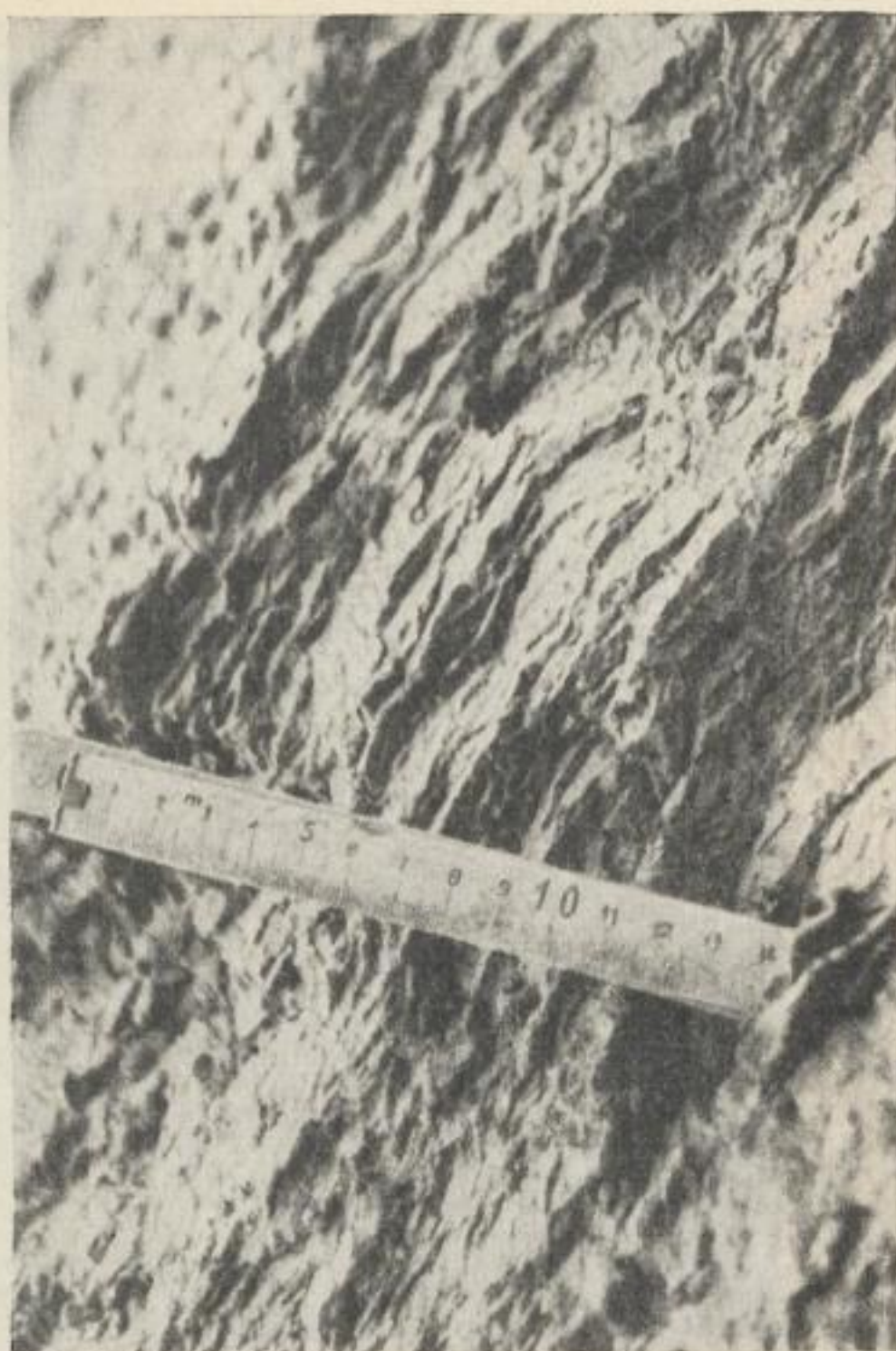


Bild 20. Schalenförmig parallel der Oberfläche abblätternder Geschiebemergel

2.13

Schluffe Klütz

Die in der Arbeit unter der Bezeichnung ‚Schluffe‘ zusammengefaßten feinkörnigen Sedimente zeigen überwiegend hellbraune Farbtöne, die verschiedentlich in Grau oder Hellbraun übergehen. Sie weisen — wie aus der Beschreibung der Einzel-



Bild 21. Gebänderter von
kleinen Geschieben durch-
setzter Schluff



Bild 22. Rippelschichtung in schluffigen Lockergesteinen

profile hervorgeht [1] — verschiedene Gefügearten auf. Die weiteste Verbreitung im Gebiet des Klütz-Höved hat ein meistens ungeschichteter, aber oft durch Lagen hellerer oder dunklerer Färbung gebändert erscheinender Schluff, der ganz sporadisch von etwa 2 bis 3 cm großen Geschieben durchsetzt ist (Bild 21). Er ist am Profil 3, 6, 7, 8, 9 und 11 aufgeschlossen. Eine weitere Gruppe schluffiger Lockergesteine zeigt Rippelschichtung [15] (Bild 22). Auf den feinen Schichtfugen sind



Bild 23a. Kleinfältelung in schluffigen Lockergesteinen



Bild 23b. Kleinfältelung in schluffigen Lockergesteinen

häufig dünne Lagen von schwarzbraunem zerreiblichem organischem Material festzustellen (Profil 12). Eine andere Gruppe zeigt eine eigenartige Kleinfältelung in Form unregelmäßiger wolkenförmiger Strukturen (Bild 23a und b). Sie ist besonders gut am Profil 5 aufgeschlossen. Hierbei kann es sich sowohl um Stauchungserscheinungen als auch um Froststrukturböden handeln. Selten sind die Schluffe im Gebiet des Klütz-Höved auch geschichtet (Profil 9). Beschränkt auf den Bereich des Profiles 13 blieb eine Gruppe tonig-schluffiger Sedimente, in denen bräunliche und graue Lagen wechsellagern, die vereinzelt kleine Kalkkonkretionen führen. Eine sehr undeutliche feinste Schichtung war hier zu erkennen.

2.14

Sande Klütz

Die im Gebiet des Klütz-Höved anstehenden Sande sind hellgrau bis hellbraun gefärbt. Sandschichten in hangenden Kliffpartien zeigen nicht selten durch ausgefallte Eisenverbindungen auch rotbraune Färbung. Die Sande sind mehr oder weniger deutlich geschichtet (Bild 24), vereinzelt sind sie auch feingefältelt (Profil 3).



Bild 24. Geschichtete Feinsande

Organische Substanz in Form dünner Lagen wurde in den Sanden relativ häufig festgestellt. Im Gegensatz zu den untersuchten Feinsanden, die auf große Strecken im Kliff aufgeschlossen sind, treten gröbere Sande oder Kiese völlig zurück.

2.15

Geschiebemergel Altenburg

Der im Gebiet von Altenburg anstehende Geschiebemergel ist dunkelgrau gefärbt, verschiedentlich zeigt er fast schwarze Farbtöne. Die Geschiebeführung ist auffällig

gering. Bei der Herstellung des Einschnittes in diesem Gebiet konnte festgestellt werden, daß der Geschiebemergel intensiv von Rissen und Klüften durchzogen ist. Auffällig ist die außerordentlich starke Zerrüttung des Mergels, die über die gesamte aufgeschlossene Mächtigkeit verbreitet ist. Man hat den Eindruck, als ob das Lockergestein aus etwa 5 bis 10 cm Kantenlänge aufweisenden Parallelepipeden zusammengesetzt ist. Diese feinmosaikartige Gliederung ist als Folge einer die Bruchgrenze überschrittenen Beanspruchung anzusehen, die auf Eislast und -bewegung zurückzuführen sein dürfte. Auch spiegelglatte Harnischflächen konnten hin und wieder erkannt werden. Die Gefügefestigkeit dieses Mergels ist trotzdem außerordentlich hoch, was in den bei der Gewinnung notwendig gewordenen Sprengungen zum Ausdruck kommt.

2.16

Geschiebelehm Altenburg

Der aus dem Geschiebemergel durch Verwitterung hervorgegangene Geschiebelehm im Gebiet Altenburg zeigt die normalen gelb-braunen und örtlich durch Eisenausfällungen rötlichen Farbtöne. Grau-weißliche Kalkausfällungen sind sehr selten. Das Gefüge des Geschiebelehmes unterscheidet sich in keiner Weise von dem des Geschiebemergels. Auch hier ist eine mosaikartige Gliederung festzustellen.

2.2

Der mineralchemische Aufbau der untersuchten Lockergesteine

Die mittels Sieben zu trennenden Fraktionen $> 0,06$ mm Korngröße der verschiedenen Sedimente wurden unter dem Binokular einer Übersichtsuntersuchung unterzogen, um einen Überblick über Kornform und Mineraltyp der Einzelkörner zu erhalten. Die Schlammfraktion wurde mit Hilfe des Ionenaustauschvermögens und der Differentialthermoanalyse untersucht. Außerdem wurde vom Gesamtmaterial einer Probe jeweils eine quantitative chemische Analyse durchgeführt.

Für die Übersichtsuntersuchung unter dem Binokular wurden mehrere Proben des jeweiligen Durchschnittsmaterials naß gesiebt und in die Fraktionen 6,0 bis 2,0 mm; 2,0 bis 0,6 mm; 0,6 bis 0,2 mm und 0,2 bis 0,06 mm getrennt. Ihre Untersuchung erfolgte im Auflicht und diente der Feststellung des ungefähren Aufbaues der Siebfraktionen, ihrer eventuellen Unterschiede bei den verschiedenen Lockergesteinen und der sich daraus ableitbaren Beziehungen zum bodenphysikalischen Verhalten.

2.21

Geschiebemergel Klütz

Untersuchung unter dem Binokular

Am Aufbau der Feinkiesfraktion waren ca. 20% Quarz, 5% Kalk und 75% Gesteinsbruchstücke beteiligt. Mit abnehmender Korngröße nimmt der Quarzgehalt stark zu, in der Grobsandfraktion auf 50%, in der Mittelsandfraktion auf 70% und

in der Feinsandfraktion auf 90%. Entsprechend nimmt der Gehalt an Gesteinsbruchstücken ab. Außerdem waren in der Grob- und Mittelsandfraktion nicht selten verkittete Feinbestandteile aus Quarz zu erkennen. Der Kalkanteil bleibt gleichmäßig gering und besteht vorwiegend aus organischen Resten. Ein auffälliger Anteil an Serizitschüppchen ist nur in der Feinsandfraktion zu erkennen. Der überwiegende Teil der Körnchen zeigt etwa isometrische Form mit schwach gerundeten Kanten.

Ionenaustauschvermögen

Um einen möglichst fehlerfreien Mittelwert für das Ionenaustauschvermögen zu erhalten, wurden vier Proben vom Durchschnittsprobematerial parallel untersucht. Dabei wurden gut übereinstimmende Werte, und zwar 11,2; 9,8; 10,0; und 9,4 mval/100 g, ermittelt. Der Durchschnittswert des Geschiebemergels liegt danach bei 10,1 mval/100 g. Gegenüber den bei der Untersuchung von Tonen bekannt gewordenen Zahlen liegen diese Werte hoch.

Differentialthermoanalyse

Als Hauptbestandteil wurde mit Hilfe der DTA Quarz festgestellt. Daneben ist noch in kleineren Mengen Kalkspat mit Mg vorhanden. Die schwache endotherme Reaktion bei 500 bis 600° deutet auf ein nicht näher zu bestimmendes Tonmineral und die schwache Exothermie bei 300 bis 400° auf organisches Material hin.

Chemische Analyse

Die quantitative chemische Analyse zeigte folgende mittlere Zusammensetzung dieses Lockergesteins:

10,60%	Glühverlust
62,20%	Kieselsäure (SiO ₂)
8,16%	Tonerde (Al ₂ O ₃ + TiO ₂)
2,59%	Eisenoxyd (Fe ₂ O ₃)
11,00%	Kalziumoxyd (CaO)
1,80%	Magnesiumoxyd (MgO)
2,25%	Kaliumoxyd (K ₂ O)
0,70%	Natriumoxyd (Na ₂ O)
0,00%	SO ₃

Das Ergebnis der vorliegenden chemischen Analyse wurde nach BOLLMANN auf Mineralkomponenten umgerechnet. Daraus ergibt sich folgendes Bild:

17,84%	Feldspat
12,56%	Tonsubstanz
45,02%	Quarz
3,47%	Limonit
19,62%	Calzit
3,76%	Magnesit

Diese Umrechnung als mineralogische Analyse kann nur annähernd als Anhalt für die tatsächliche Zusammensetzung dienen, da bei diesem Rechengang die Zuordnung der einzelnen Oxydgruppen zu den jeweiligen Mineralen nicht ohne Fehler ist.

2.22

Geschiebelehm Klütz

Untersuchung unter dem Binokular

Gegenüber den untersuchten Geschiebemergelproben sind keine auffälligen Unterschiede festzustellen. Ein geringer Anteil der Gesteinsbruchstücke in der Feinkies- und Grobsandfraktion weist Kaolinisierungserscheinungen auf.

Ionenaustauschvermögen

Das Ionenaustauschvermögen wurde von vier Proben bestimmt. Die ermittelten Werte zeigten mit 9,4; 9,8; 10,0 und 10,2 mval/100 g gute Übereinstimmung. Der Durchschnittswert beträgt demnach 9,8 mval/100 g. Auch dieser Wert liegt gegenüber den für Ton bekannt gewordenen Werten hoch.

Differentialthermoanalyse

Das Ergebnis dieser Untersuchung deckt sich völlig mit dem vom Geschiebemergel (Hauptbestandteil Quarz mit Kalkspat, wenig Tonminerale und organische Bestandteile).

Chemische Analyse

Die quantitative chemische Analyse zeigte folgende mittlere Zusammensetzung dieser Erdart:

9,45%	Glühverlust
66,20%	Kieselsäure
7,12%	Tonerde + TiO ₂
2,88%	Eisenoxyd
10,82%	Kalziumoxyd
1,08%	Magnesiumoxyd
2,02%	Kaliumoxyd
0,77%	Natriumoxyd
0,00%	SO ₂

Die Umrechnung auf Mineralkomponenten nach BOLLMANN ergab folgendes Bild:

16,33%	Feldspat
10,36%	Tonsubstanz
50,65%	Quarz
3,84%	Limonit
19,31%	Calzit
2,26%	Magnesit

2.23

Schluffe Klütz

Untersuchung unter dem Binokular

Die Schluffe führen in der Grobsandfraktion etwa 30% Quarz und 70% Gesteinsbruchstücke. Auch hier nimmt der Quarzgehalt mit abnehmender Korngröße zu, und zwar über 60% in der Mittelsandfraktion auf rund 95% in der Feinsandfraktion. Der restliche Anteil besteht in der Mittelsandfraktion aus Gesteinsbruchstücken, in der Feinsandfraktion aus Serizitschüppchen. Der Kalkanteil ist gleichmäßig gering. Die etwa isometrischen Körnchen sind kantengerundet.

Chemische Analyse

Die durchgeführte quantitative chemische Analyse ergab folgende mittlere Zusammensetzung dieses Lockergesteines:

6,40%	Glühverlust
74,46%	Kieselsäure
6,48%	Tonerde + TiO ₂
1,53%	Eisenoxyd
6,89%	Kalziumoxyd
1,41%	Magnesiumoxyd
1,90%	Kaliumoxyd
0,62%	Natriumoxyd
0,00%	SO ₃

Die nach BOLLMANN durchgeführte Umrechnung auf Mineralkomponenten zeigte folgendes Bild:

14,93%	Feldspat
9,50%	Tonsubstanz
60,35%	Quarz
2,03%	Limonit
12,30%	Calzit
2,95%	Magnesit

2.24

Sande Klütz

Untersuchung unter dem Binokular

Die im Gebiet des Klütz-Höved aufgeschlossenen Feinsande führen in den beiden vorhandenen Fraktionen (Fein- und Mittelsand) fast ausschließlich Quarz mit einem geringen Anteil an Serizit (5 bis 10%). In der Mittelsandfraktion konnte noch durch Fe-Verbindungen verkittetes Feinkorn festgestellt werden. Die mehr oder weniger isometrischen Quarzkörnchen sind kantengerundet, der Glimmer ist schuppenförmig.

2.25

Geschiebemergel Altenburg

Untersuchung unter dem Binokular

Im Altenburger Material sind die Gesteinsbruchstücken über die verschiedenen Fraktionen wesentlich gleichmäßiger verteilt als im Klützer. Sie nehmen in der Fein-

kiesfraktion etwa 50% ein und gehen über 35% in der Grobsandfraktion und 25% in der Mittelsandfraktion auf etwa 20% in der Feinsandfraktion zurück. Der Kalkanteil beträgt in allen Fraktionen etwa 5%. Er besteht nicht aus organischen Resten, sondern aus stark gerundeten Körnchen. Die Kornform der Quarze ist auch hier mehr oder weniger isometrisch mit gerundeten Kanten. Die Gesteinsbruchstücke in der Feinkies- und Grobsandfraktion zeigen gestreckte Formen mit schwach gerundeten Kanten. Serizitschüppchen sind in der Feinsandfraktion in geringem Maße vorhanden.

Ionenaustauschvermögen

Als Menge der austauschfähig gebundenen Ionen wurden bei drei Versuchen 14,4; 15,2; 15,4 Milliäquivalent pro 100 g festgestellt. Der Durchschnittswert beträgt danach für das untersuchte Material 15 mval/100 g. Dieser Wert liegt im Vergleich zu den bei reinen Tonen ermittelten Werten sehr hoch.

Differentialthermoanalyse

Die Ergebnisse dieser Analyse weisen nach, daß der Hauptbestandteil des Altenburger Geschiebemergels Quarz ist. Daneben wurden kleinere Mengen von Kalkspat festgestellt. Außerdem enthält das Material ein nicht näher bestimmbares Tonmineral sowie organische Substanzen.

Chemische Analyse

Die chemisch auf ihre quantitative Zusammensetzung untersuchte Durchschnittsprobe zeigte folgenden Aufbau:

7,90%	Glühverlust
67,30%	Kieselsäure
11,56%	Tonerde + TiO ₂
3,94%	Eisenoxyd
5,74%	Kalziumoxyd
1,17%	Magnesiumoxyd
2,07%	Kaliumoxyd
0,47%	Natriumoxyd
0,00%	SO ₃

Die Umrechnung auf Mineralkomponenten nach BOLLMANN ergab folgende Zusammensetzung:

15,05%	Feldspat
22,32%	Tonsubstanz
47,16%	Quarz
5,24%	Limonit
10,25%	Calzit
2,45%	Magnesit

2.26

Geschiebelehm Altenburg

Untersuchung unter dem Binokular

Der Altenburger Geschiebelehm zeigt etwa den gleichen Kornaufbau wie der Geschiebemergel. Nennenswerte Unterschiede waren nicht zu erkennen.

Ionenaustauschvermögen

Das Ionenaustauschvermögen wurde mit 20,1 mval/100 g festgestellt. (Einzelwerte der drei Bestimmungen sind 19,6; 20,0; 20,8 mval/100 g). Diese Werte liegen wiederum sehr hoch.

Differentialthermoanalyse

Aus den aufgenommenen Reaktionskurven ist zu erkennen, daß auch der Geschiebelehm hauptsächlich aus Quarz besteht. Die übrigen Bestandteile sind Kalkspat, Magnesit, organische Substanz und ein nicht näher definierbares Tonmineral.

Chemische Analyse

Die quantitative chemische Analyse brachte folgendes Ergebnis:

6,25%	Glühverlust
72,60%	Kieselsäure
10,12%	Tonerde + TO ₂
2,88%	Eisenoxyd
4,58%	Kalziumoxyd
0,90%	Magnesiumoxyd
1,75%	Kaliumoxyd
0,40%	Natriumoxyd
0,00%	SO ₃

Die Umrechnung nach BOLLMANN zeigte folgende mineralogische Zusammensetzung:

12,74%	Feldspat
19,68%	Tonsubstanz
55,18%	Quarz
3,84%	Limonit
8,18%	Calzit
1,88%	Magnesit

2.3 Die bodenphysikalischen Eigenschaften der untersuchten Lockergesteine

Die im Laboratorium festgestellten bodenphysikalischen Kennwerte werden im folgenden für die verschiedenen weichsel- und elstereiszeitlichen Lockergesteine zusammenfassend dargestellt. Dabei werden sowohl die ermittelten Minimal- und Maximalwerte als auch die durch Mittelung der Untersuchungsergebnisse errechneten Durchschnittswerte angegeben. Die Festlegung von Mittelwerten erscheint gerecht-

fertigt, wenn man berücksichtigt, daß die jeweils untersuchten Proben nur einen winzig kleinen Ausschnitt von der Mächtigkeit eines Sedimentes darstellen. Entsprechend den bekannten Schwankungen in der Zusammensetzung dieser glazigenen Lockergesteine auf engstem Raum, können nur Durchschnittswerte — sofern sie nicht aus zu stark voneinander abweichenden Ergebnissen errechnet wurden — ein repräsentatives Bild vom Verhalten der untersuchten Sedimente liefern. Eine tabellarische Übersicht der für jeden Lockergesteinstyp — Geschiebemergel, Geschiebelehm, Schluff und Sand — ermittelten bzw. errechneten Kennwerte vervollständigt diesen Abschnitt und gestattet, die für jede untersuchte Probe festgestellten Einzelwerte rasch zu überblicken.

2.31

Geschiebemergel Klütz

Kornverteilung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß die Schwankungen der Kornzusammensetzung unter den nach den Felduntersuchungen erwarteten Beträgen liegen. Die Ursache hierfür dürfte in erster Linie im unterschiedlichen Wassergehalt zu suchen sein, da stark durchfeuchtete Abschnitte einen wesentlich höheren Feinstkornanteil als Folge der Schmierigkeit des bindigen Materials vortäuschen. Die Kornverteilung des Geschiebemergels aus dem Gebiet des Klütz-Höved liegt vielmehr in relativ engen Grenzen. Sie schwankt zwischen 0 und 20% Ultraschluffkorn, 28 und 50% Schluffkorn, 36 und 58% Sandkorn, 0 und 15% Kieskorn (Bild 25a und b).

Die mittlere Zusammensetzung, die sich daraus errechnen läßt, liegt bei rund 11% Ultraschluffkorn, 39% Schluffkorn, 45% Sandkorn und 5% Kieskorn. Es zeigt sich, daß die Sand- und Schlufffraktion den Hauptanteil des Geschiebemergels ausmacht. Eine Betrachtung der einzelnen Kornverteilungskurven gestattet es, das Bild noch mehr zu spezifizieren. Danach ergibt sich folgende durchschnittliche Beteiligung der einzelnen Fraktionen: Feinsand (30%), Grobschluff (18%), Mittelschluff (12%), Ultraschluffkorn und Mittelsand (je 11%), Feinschluff (10%), Grobsand (4%), Feinkies und Mittel/Grobkies (je 2%).

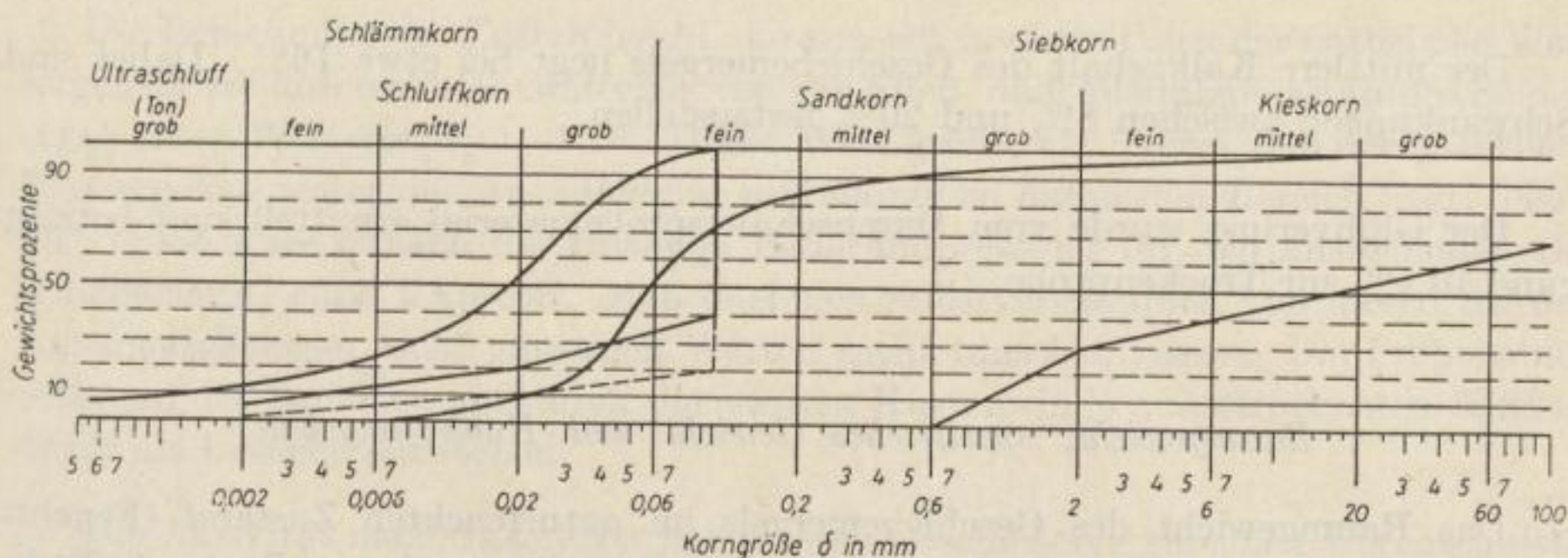


Bild 25a. Klütz-Höved, Geschiebemergel (T_{0-20} Su_{28-50} S_{36-58} K_{0-15})

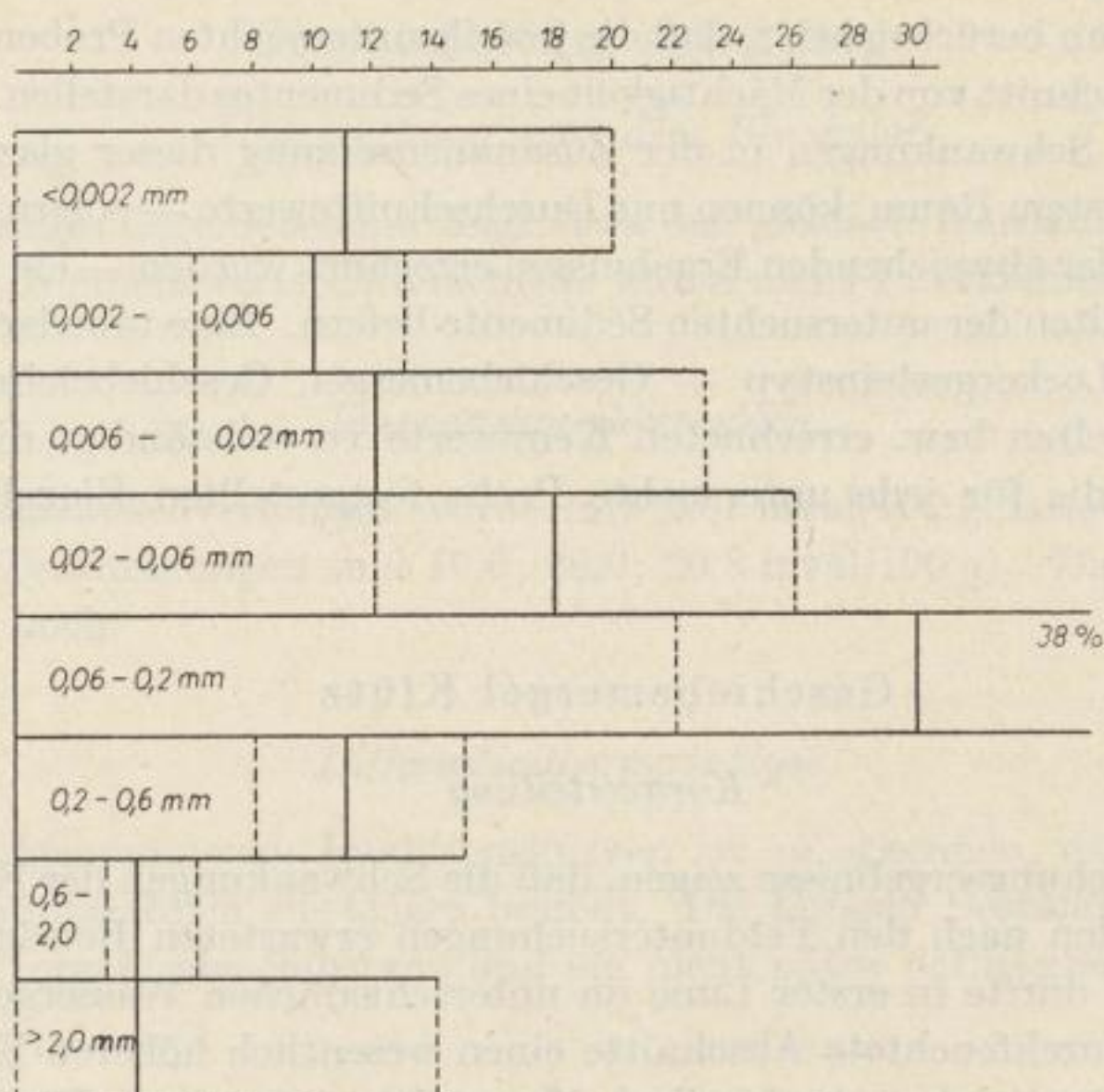


Bild 25b. Geschiebemergel Klütz, Schwankungen der Kornfraktionen und mittlere Zusammensetzung

Die der Vollständigkeit halber mit errechneten Kornkennwerte zeigen dagegen erhebliche Schwankungen. So wurde für den am Klütz-Höved anstehenden Geschiebemergel ein mittlerer Ungleichförmigkeitsgrad von $U = 48$ bei Schwankungen zwischen $U = 15$ und $U = 120$ festgestellt. Der Mittelwert für den Sortierungskoeffizienten liegt bei $S_0 = 4,26$ (Schwankungen zwischen 2,89 und 6,19). Die mittlere Schiefe hat eine Größe von 0,44 (bei 0,19 als Minimum und 0,86 als Maximum).

Kalkgehalt und Glühverlust

Der mittlere Kalkgehalt des Geschiebemergels liegt bei etwa 16%. Dabei sind Schwankungen zwischen 8% und 20% festzustellen.

Der Glühverlust wurde vom Durchschnittsprobematerial ermittelt und beträgt rund 10,1% zur Trockenprobe.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Das Raumgewicht des Geschiebemergels im naturfeuchten Zustand (Feuchtraumgewicht) beträgt im Mittel $\gamma = 2,14\text{ t/m}^3$, im völlig trockenen Zustand (Trockenraumgewicht) $\gamma_t = 1,94\text{ t/m}^3$. Das Porenvolumen wurde mit $n = 30\%$, die Poren-

ziffer mit $\varepsilon = 0,43$ bestimmt. Bei völliger Wassersättigung der Poren kann das Raumgewicht höchstens auf $2,18 \text{ t/m}^3$ ansteigen.

Das spezifische Gewicht wurde zwischen 2,66 und 2,70 festgestellt, der Mittelwert liegt bei $2,69 \text{ t/m}^3$.

Der Feuchtigkeitsgehalt liegt bei $f = 0,68$, das sind $18,6\%$ vom Gesamtvolumen. Daraus errechnet sich ein Luftgehalt von $11,4\%$.

Natürlicher Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit

Der für die Geschiebemergelproben ermittelte Entnahmewassergehalt liegt mit durchschnittlich 10% zur Trockensubstanz recht niedrig bei einem Minimalwert von 8% und einem Maximalwert von knapp 14% . Diese Werte befinden sich noch um einige Prozent unter der Ausrollgrenze, was die Festigkeit der anstehenden bindigen Lockergesteine während des Sommerhalbjahres unterstreicht. Allerdings dürfte die Einschränkung zu machen sein, daß eine gewisse Austrocknung der in verwachsenen Stützen aufbewahrten Proben im allgemeinen nicht zu verhindern ist. Die niedrigsten der festgestellten Werte dürften darauf zurückzuführen sein.

Die untersuchten Geschiebemergelproben gingen bei einem Wassergehalt zwischen 19 und 30% in den Fließzustand über. Als Mittelwert für den Wassergehalt an der Fließgrenze wurden 24% ermittelt. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze zeigt bei fast allen Proben recht einheitliche Werte. Er schwankt nur wenig um 12% (11 bis 14%). Entsprechend der Schwankungen der Fließgrenze, zeigt naturgemäß auch die Bildsamkeit keine gleichmäßige Höhe. Sie schwankt in den Grenzen von 5 bis 18% (Durchschnittswert 12%). Nach diesen Ergebnissen ist der Geschiebemergel des Klütz-Höved als schwachbindiges Lockergestein zu bezeichnen. Bei Eintragung dieser im Labor bestimmten Werte in die von CASAGRANDE entwickelte Plastizitätskarte (vgl. Bild 6 u. 39) ist der Geschiebemergel dem Bereich „sandige Tone, schwach plastische anorganische Schluffe, sehr feine schluffige Sande (CL)“ zuzuordnen. Die von SIEDECK [16] in dieser Plastizitätskarte festgelegten Bereiche für bestimmte typische Erdarten stimmen hinsichtlich des Geschiebemergels gut mit den in der vorliegenden Arbeit bestimmten Werten überein.

Die Berechnung der Zustandszahl, die anzeigt, inwieweit sich der natürliche Wassergehalt des untersuchten Materials von der Fließ- und Ausrollgrenze unterscheidet, ergab einen Wert von $k_w = 1,16$. Dieser Wert größer als 1 zeigt, daß der natürliche Wassergehalt unter der Ausrollgrenze und damit im halbfesten Bereich liegt. Nach DIN 1054 wäre danach die zulässige Baugrundpressung für den anstehenden Geschiebemergel rund 2 kp/cm^2 . Man darf sich selbstverständlich von diesen für den Ingenieurgeologen recht günstigen Werten nicht täuschen lassen. Die Probenahme während des Sommers am durch die starken Küstenwinde ausgetrockneten Kliff ist dafür als Ursache anzusehen.

Die Aktivität nach SKEMPTON hat für den Geschiebemergel einen Durchschnittswert von $A = 1,09$, was der Aktivität „normaler“ Tone entspräche.

Breiwasserzahl, Einheitswasserzahl

Die OHDESchen Wasserkennzahlen wurden für alle Geschiebemergelproben festgestellt und mit Hilfe des OHDESchen Diagramms ihre Beziehungen zum Reibungsbeiwert und Durchlässigkeitsbeiwert errechnet. Die ermittelten Breiwasserzahlen schwanken zwischen 0,30 und 0,52 und weisen einen Mittelwert von 0,42 auf. Die Einheitswasserzahl liegt im Durchschnitt bei 0,19, als Maximum wurde 0,27, als Minimum 0,14 bestimmt. Die mittlere OHDEZahl beträgt 0,23. Der aus w_0/w_1 im Mittel errechnete Durchlässigkeitskoeffizient liegt bei $k = 3 \cdot 10^{-8}$ cm/s, der Reibungsbeiwert $\text{tg } \varrho = \mu_0 = 0,550$. Der Reibungswinkel beträgt danach ungefähr 29° .

Maximale Wasseraufnahmefähigkeit (Enslinwert)

Der Enslinwert zeigt starke Schwankungen, die im wesentlichen auf die nicht unerheblichen Schwierigkeiten bei der labormäßigen Durchführung zurückzuführen sein dürften. Durch Bildung von Mittelwerten aus einer Reihe von Versuchen ergeben sich jedoch vergleichbare Werte. Für den Klützer Geschiebemergel wurde danach eine mittlere maximale Wasseraufnahmefähigkeit von etwa 77% ermittelt. Die Einzelwerte schwanken dabei zwischen 54 und 97%.

Zerfallsversuche

Die an gleichmäßig verdichteten aber unterschiedlichen Wassergehalt besitzenden Probewürfeln durchgeführten Zerfallsversuche im Wasser zeigen recht gute Abhängigkeiten. So ist die völlig trockene Geschiebemergelprobe bereits nach 75 bzw. 180 Minuten Wasserlagerung zerfallen. Die Proben mit 15 und 20% Wassergehalt zeigen übereinstimmendes Verhalten, ihre Zerfallszeit liegt zwischen 180 und 360 Minuten. Die mit 25% Wassergehalt eingebauten Proben waren nach 360 Minuten erst etwa zur Hälfte zerfallen und zeigten nach 1440 Minuten — also nach 24 Stunden — immer noch einen kleinen zusammenhaltenden Kegel, dessen Gewicht etwa 10% des Ausgangsprobewürfels betrug. Daraus ist zu erkennen, daß die mit einem Wassergehalt nahe der Fließgrenze eingebaute Probe gegenüber einer Wasserüberflutung am beständigsten ist. Die übliche Darstellung der Zerfallsziffer als Zahl nach acht Stunden Wasserlagerung läßt sich bei der hier angewandten Methode nicht durchführen. Die graphische Zusammenstellung, die im Abschnitt 3.11 zu finden ist, stellt die Zeit bei völligem Zerfall den jeweiligen Wassergehalten gegenüber (vgl. Bild 47).

Durchlässigkeitskoeffizient

Der im Druckdurchlässigkeitsgerät ermittelte Durchlässigkeitskoeffizient k von sieben untersuchten Proben liegt etwa in gleicher Höhe. Er schwankt zwischen 3,9 und $7,8 \cdot 10^{-8}$ cm/s. Dieser Wert stimmt größenordnungsmäßig mit dem aus w_0/w_1 errechneten Wert überein.

Zusammendrückbarkeit

Der an 9 ungestörten Proben durchgeführte Druckversuch mit verhinderter Seitenausdehnung zeigt im Durchschnitt folgendes Verhalten des Geschiebemergels. Eine lotrechte Belastung stufenweise bis 10 kp/cm^2 bringt eine Setzung des Probenmaterials zwischen $0,7$ und $1,7 \text{ mm}$, d. h. zwischen $3,6$ und $8,6\%$ zur Ausgangshöhe. Die aus den Drucksetzungskurven nach OHDE errechneten Steifezahlen nach der Gleichung $V = \bar{v} \cdot p^w$ liegen in den Grenzen zwischen $V = 73 \cdots 170 \cdot p^{0,18 \cdots 0,54}$ für den Wiederbelastungsbereich und $V = 9,5 \cdots 150 \cdot p^{0,71 \cdots 2,1}$ kp/cm^2 für den Erstbelastungsbereich. Der als geologische Vorbelastung p_v bezeichnete Grenzpunkt zwischen Wiederbelastungs- und Erstbelastungsast liegt bei den untersuchten Geschiebemergelproben zwischen 2 und 6 kp/cm^2 , im Mittel bei $3,5 \text{ kp/cm}^2$.

Scherfestigkeit

Die im Seitendruckgerät bei möglichem Porenwasserausgleich (offenes System) und langsamer Belastung im ungestörten Zustand auf ihre Scherfestigkeit untersuchten Geschiebemergelproben von Klütz-Höved zeigten Reibungswinkel zwischen $\varrho = 19,5^\circ$ und $30,9^\circ$ und Kohäsionswerte zwischen $0,21$ und $1,39 \text{ kp/cm}^2$ (Bild 26). Diese Schwankungen werden verständlich, wenn man bedenkt, daß auch der Tonmineralgehalt — wie z. B. Fließgrenze, Bildsamkeit und maximale Wasseraufnahmefähigkeit deutlich machen — in gewissen Grenzen sich ändert. Außerdem ist nicht zu über-

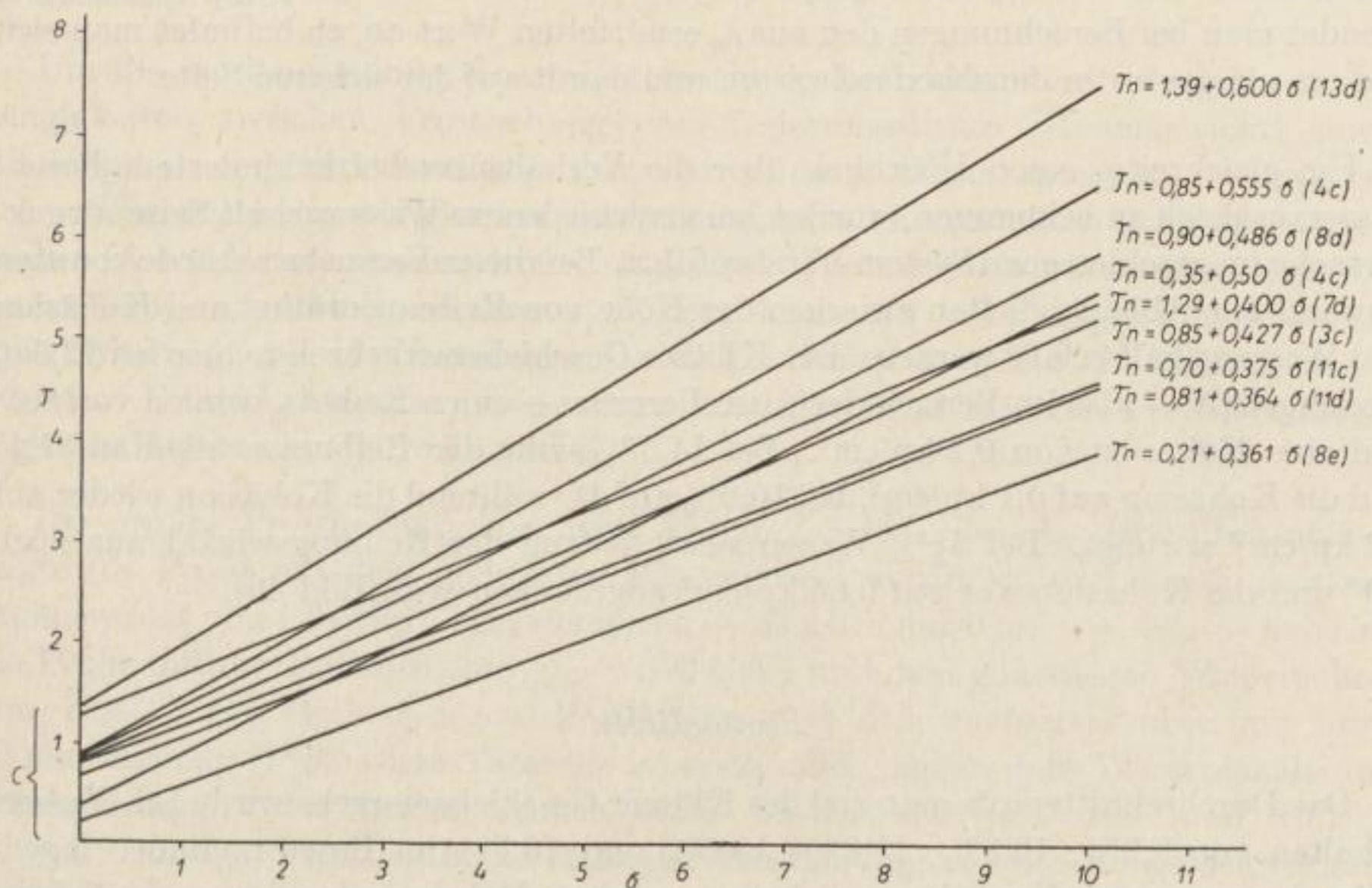


Bild 26. Geschiebemergel Klütz — Scherfestigkeit (ungestörte Proben)

sehen, daß die Ergebnisse der Seitendruckversuche viel stärker als die meisten anderen Versuche auf geringste Material- und Versuchsfehler reagieren. Die errechneten Durchschnittswerte des Reibungswinkels liegen für den Geschiebemergel bei $\varrho = 24,3^\circ$ die der Kohäsion bei $0,82 \text{ kp/cm}^2$.

Die vergleichsweise bei sehr unterschiedlichem Wassergehalt (13% bis 31%) in gestörtem Zustand in die Seitendruckgeräte eingebauten Proben zeigten hinsichtlich des Reibungswinkels kaum größere Abweichungen. Der errechnete Durchschnittswert liegt bei $\varrho = 25,4^\circ$. Diese Tatsache beruht darauf, daß im offenen System bei langsamer Lastaufbringung ein leichter Wasserausgleich möglich war, so daß die wirksame Auflast jedesmal etwa in gleicher Höhe vom Korngerüst getragen wurde. Infolge der Aufbereitung der Proben gingen selbstverständlich die für eiszeitlich abgelagerte Sedimente typischen hohen Kohäsionswerte verloren. Sie wurden zwischen 0 und $0,05 \text{ kp/cm}^2$ ermittelt. Diese Tatsache kennzeichnet treffend, wie stark die z. B. im Kreisringschergerät bestimmten Kohäsionswerte von der Wirklichkeit abweichen müssen.

Diese im Seitendruckgerät bei — in Abhängigkeit von der lotrechten Belastung — stetig steigendem Seitendruck ermittelten Reibungswerte liegen gegenüber dem Bruchwert, der bei konstantem senkrechtem Druck und abnehmendem Seitendruck bestimmt wird, etwas zu niedrig. Da die Feststellung des Bruchwertes an allen untersuchten Proben infolge des großen Zeitaufwandes nicht erfolgen konnte, wurden zwei Proben vom Durchschnittsprobematerial des Klützer Geschiebemergels bei $\sigma_v = 6 \text{ kp/cm}^2$ bis zum Bruch im Seitendruckgerät untersucht. Dieser Bruchwert liegt im Durchschnitt um $\sim 17\%$ höher ($24,5^\circ$ gegenüber $27,5^\circ$ und $22,5^\circ$ gegenüber $28,0^\circ$). Wendet man bei Berechnungen den aus λ_0 ermittelten Wert an, so befindet man sich also um einiges unter den Maximalwerten und damit auf der sicheren Seite.

Um gleichzeitig einen Überblick über die Verhältnisse bei behindertem Porenwasserausgleich zu bekommen, wurden bei verschiedenem Wassergehalt Seitendruckversuche im geschlossenen System durchgeführt. Bei dieser Versuchsmethode konnten einwandfreie Abhängigkeiten zwischen der Höhe von Reibungswinkel und Kohäsion und Wassergehalt erfaßt werden. Der Klützer Geschiebemergel zeigte hier bei 12,5% Wassergehalt — also im Bereich der Ausrollgrenze — einen Reibungswinkel von $8,2^\circ$ und eine Kohäsion von $0,2 \text{ kp/cm}^2$. Bei 14,3% sinkt der Reibungswinkel auf $7,4^\circ$ und die Kohäsion auf $0,1 \text{ kp/cm}^2$, bei 16,9% auf 4° , während die Kohäsion wieder auf $0,2 \text{ kp/cm}^2$ ansteigt. Bei 31% Wassergehalt betrug der Reibungswinkel nur noch $2,9^\circ$ und die Kohäsion war auf $0,05 \text{ kp/cm}^2$ abgesunken (vgl. Bild 46).

Proctordichte

Das Durchschnittsprobematerial des Klützer Geschiebemergels wurde bei Wassergehalten von 8,9%; 10,8%; 11,8%; 13,5% und 16,7% im Proctorzylinder lagenweise der genormten Verdichtungsarbeit ausgesetzt. Dabei wurden Lagerungsdichten erzielt, die einem Trockenraumgewicht von 1,81; 1,87; 1,90; 1,89 und $1,79 \text{ t/m}^3$ ent-

sprechen. Die graphische Auftragung dieser Werte ergab eine Proctorkurve, die ihr Maximum bei $\gamma_p = 1,902 \text{ t/m}^3$ hat. Der dazugehörige Proctorwassergehalt liegt bei 11,8% (vgl. Bild 52). Diesem als günstigsten Wassergehalt (w_p) bezeichneten Wert entspricht ein Luftporengehalt der Probe von ca. 12%.

Frosthebung

Vom Geschiebemergel Klütz-Höved wurden als erste Versuchsreihe je zwei ungestörte und gestörte Proben im Frostschrank auf ihre Frosthebung untersucht. Die ungestörten Proben hatten dabei eine Höhe von 17 bzw. 20 cm, die gestörten von 24 cm. Der Probendurchmesser war mit 7,8 cm — bedingt durch die Versuchsanordnung (Ringe!) — gleich. Dabei wurden bei den ungestörten Proben die Temperaturen innerhalb von acht Tagen auf etwa -14°C abgesenkt. Bei freiem Wassernachschub konnten Hebungen bis zu 8% zur Ausgangsprobenhöhe ermittelt werden. Die in der gesamten Probe entstandenen Eislinsen erhöhten den Wassergehalt von etwa 13% beim Einbau auf rund 18% beim Ausbau. Durch die bei Frostzutritt wirksamen Kräfte war also schon bei einer kurzen Gefrierperiode der Wassergehalt des Geschiebemergels von der Ausrollgrenze bis in den plastischen Bereich erhöht worden.

Die Versuche mit den gestörten Proben brachten Hebungen bis zu 9% zur Ausgangsprobenhöhe. Der hohe Ausgangswassergehalt von knapp 20% änderte sich trotz Frosteinflusses so gut wie nicht. Nur das Wasser erfuhr während des Gefrierens eine andere Verteilung. Im mittleren Teil der Probe ergab sich infolge Eislinnenbildung eine Erhöhung, während am unteren und oberen Ende der Probe eine Abnahme festzustellen war.

Um die bei Anwendung dieser Untersuchungsmethoden nicht erkennbaren Abhängigkeiten zwischen Frosthebung und Lagerungsdichte (Raumgewicht) sowie Wassergehalt eingehend zu überprüfen, wurden die im Proctorgerät bei unterschiedlichem Wassergehalt, aber gleicher Verdichtungsarbeit hergestellten Geschiebemergelproben in den Frostversuchsschrank eingebaut. Diese Proben wurden wiederum bei einem Temperaturabfall von etwa -2° pro 24 Std. auf -14° abgekühlt, wobei ein freier Wasserspiegel das Nachsaugen beliebiger Wassermengen in die Probe gewährleistete. Diese Untersuchungsverfahren brachten beim Klützer Geschiebemergel folgende Ergebnisse (Bild 27a und b).

Die größte Frosthebung von etwa 25 mm (= 18% zur Ausgangsprobenhöhe) zeigte die Probe mit dem geringsten Wassergehalt von 8,9% und einem Trockenraumgewicht von $1,81 \text{ t/m}^3$. Am wenigsten — nämlich nur 6 mm (= 4%) — hob sich die Probe mit der Proctordichte ($\gamma_t = 1,90 \text{ t/m}^3$) und dem günstigsten Wassergehalt von 11,8%. Dazwischen liegen die übrigen zwei untersuchten Proben mit etwa 10 mm Hebung (7%). Diese Tatsache ist erstaunlich, gehen doch Wassergehalt und Trockenraumgewicht beider Proben stark auseinander ($w = 10,8$ und $16,7\%$; $\gamma_t = 1,87$ und $1,79 \text{ t/m}^3$). Da die Höhe der Frosthebung von der Menge des vorhandenen Wassers abhängig ist, hat auch die Probe mit der größten Hebung den höchsten Ausbauwassergehalt (22,3%). Die Probe mit der Proctordichte weist entsprechend

den geringsten Ausbauwassergehalt auf (13,2%). Wiederum zwischen diesen Werten liegen die Ausbauwassergehalte der beiden anderen Proben (15,0 und 20,8%).

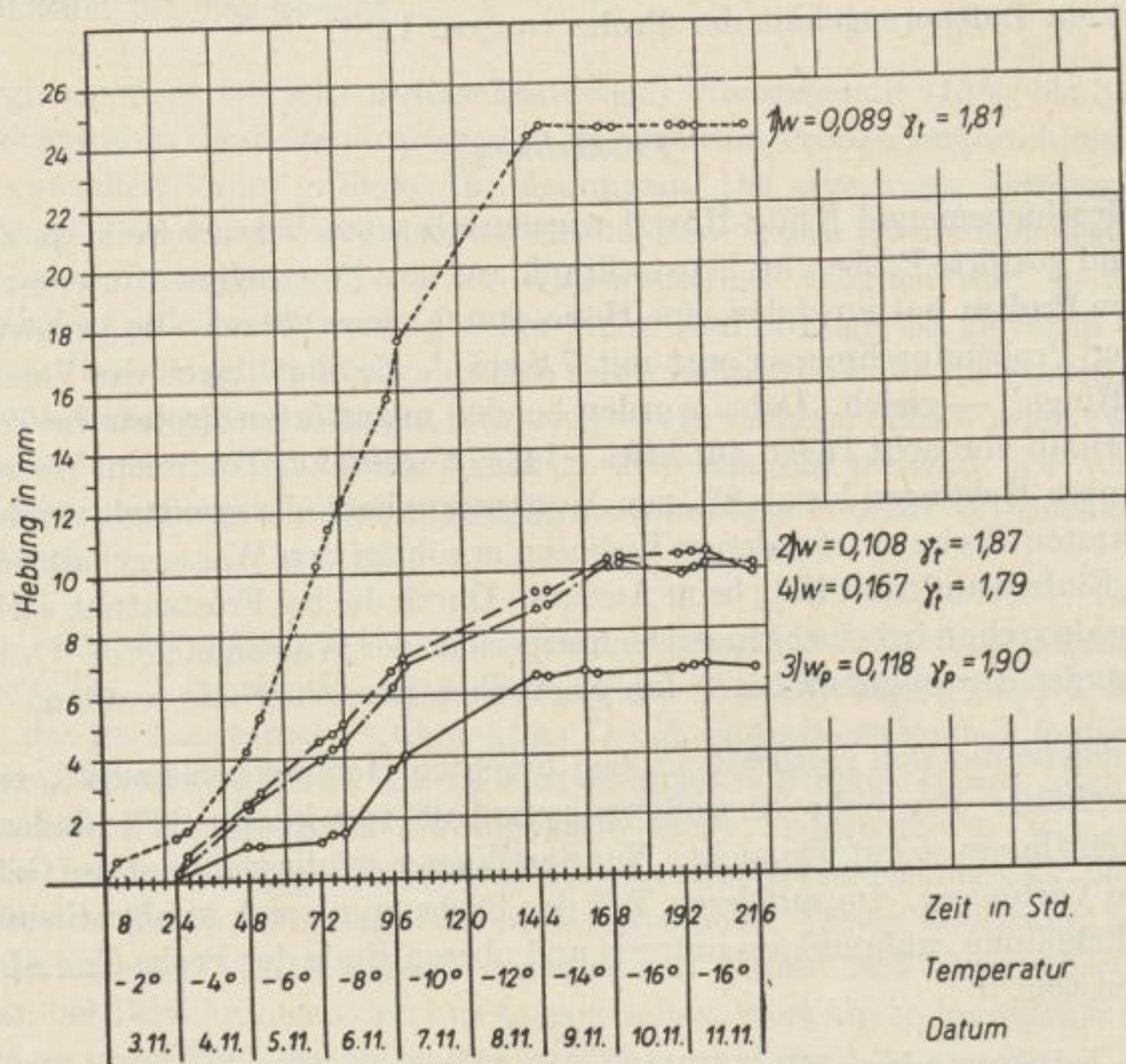


Bild 27 a. Geschiebemergel Klütz — Ergebnis der Frosthebungsversuche



Bild 27 b. Geschiebemergel Klütz — Ergebnis der Frosthebungsversuche

Tabelle I. Bodenphysikalische Kennwerte. Geschiebemergel — Klütz-Höved

Probe Nr.	Kornanteile				U	s ₀	s ₂	γ _z	γ	V _l	CaO	w _n	w _l	w _s	w _{ja}	w _{max}	v ₁	v ₂	v ₃	λ	μ ₀	μ ₀ / μ _n	μ ₀ / μ _n } tg δ	α _n	φ _b	c	w _R	z	V = z · p ^{0,5}	F ₀
	< 0,002 (%)	— 0,05 (%)	— 2,0 (%)	> 2,0 (%)																										
1c	7	45	44	4	25	2,89	0,81	2,09	—	—	0,075	0,138	0,185	0,138	0,047	0,543	0,298	0,157	0,141	8 · 10 ⁻⁸	0,63	0,652	33,0°	—	—	0,167	—	—	—	—
3c	15	35	48	2	80	4,95	0,19	2,09	—	—	0,169	0,076	0,276	0,115	0,161	0,890	0,519	0,193	0,326	2 · 10 ⁻⁸	0,48	0,355	19,5°	—	—	0,188	5,83 · 10 ⁻⁸	$\frac{170 \cdot p^{0,5}}{150 \cdot p^{0,77}}$	2	
3e	—	50	45	5	15	3,69	0,46	2,68	2,070	1,86	0,175	0,118	0,276	0,128	0,148	0,873	0,492	0,192	0,300	2 · 10 ⁻⁸	0,49	0,410 0,427	22,3° 22,8°	—	0,85	0,307 0,118	—	$\frac{73 \cdot p^{0,19}}{30 \cdot p^{1,2}}$	2	
4c	14	29	47	10	86	5,35	0,28	2,09	2,055	1,90	0,198	0,080	0,231	0,111	0,120	0,893	0,414	0,171	0,243	3 · 10 ⁻⁸	0,55	0,555	29,0°	—	0,85	0,080	5,5 · 10 ⁻⁸	$\frac{100 \cdot p^{0,33}}{76 \cdot p^{0,8}}$	2	
5d	10	39	42	9	43	4,84	0,47	2,09	2,142	—	0,183	—	0,186	0,115	0,071	0,813	0,328	0,142	0,186	4 · 10 ⁻⁸	0,59	0,468	24,5°	—	—	0,125	—	—	—	
6c	12	36	49	3	58	3,34	0,41	2,09	2,055	1,84	0,154	0,113	0,255	0,143	0,112	0,653	0,460	0,192	0,268	3 · 10 ⁻⁸	0,52	—	—	—	—	—	—	$\frac{100 \cdot p^{0,37}}{53 \cdot p^{0,71}}$	6	
7d	12	36	44	8	72	4,96	0,21	2,09	2,108	1,95	0,178	0,085	0,273	0,111	0,162	0,636	0,473	0,177	0,296	2 · 10 ⁻⁸	0,50	0,400	21,8°	—	1,29	0,085	6,66 · 10 ⁻⁸	$\frac{118 \cdot p^{0,51}}{62 \cdot p^{0,96}}$	4	
8d	8	41	51	—	27	4,32	0,37	2,09	2,100	1,94	0,154	0,081	0,278	0,112	0,160	0,966	0,415	0,164	0,251	2 · 10 ⁻⁸	0,53	0,486	25,8°	—	0,90	0,081	3,9 · 10 ⁻⁸	$\frac{78 \cdot p^{0,37}}{13 \cdot p^{1,7}}$	4	
8e	8	30	47	15	41	4,03	0,86	2,09	2,102	1,91	0,155	0,103	0,218	0,114	0,104	0,743	0,455	0,180	0,275	2 · 10 ⁻⁸	0,51	0,361	19,5°	—	0,21	0,103	7,1 · 10 ⁻⁸	$\frac{115 \cdot p^{0,18}}{9,5 \cdot p^{2,1}}$	4	
10b	16	40	36	8	77	5,01	0,48	2,70	2,220	2,04	0,201	0,086	0,298	0,119	0,179	0,730	0,449	0,200	0,249	3 · 10 ⁻⁸	0,54	0,480	25,5°	—	—	0,216	—	$\frac{103 \cdot p^{0,54}}{50 \cdot p^{1,65}}$	3	
11c	20	40	37	3	121	6,19	0,36	2,70	2,176	1,97	0,169	0,105	0,365	0,125	0,180	0,873	0,510	0,203	0,307	2 · 10 ⁻⁸	0,49	0,375	20,5°	—	0,70	0,105	7,25 · 10 ⁻⁸	—	—	
11d	10	45	43	2	34	3,85	0,39	2,09	2,122	1,94	0,147	0,095	0,222	0,131	0,091	0,740	0,369	0,171	0,198	4 · 10 ⁻⁸	0,57	0,367	20,0°	—	0,81	0,095	7,8 · 10 ⁻⁸	—	—	
12c	12	28	28	2	86	3,58	0,34	2,69	—	—	0,126	—	0,242	0,123	0,119	0,793	0,393	0,211	0,182	7 · 10 ⁻⁸	0,59	0,490	26,1°	—	—	0,172	—	—	—	
13d	8	48	40	4	24	3,61	0,59	2,69	2,235	—	0,196	—	0,189	0,144	0,045	0,633	0,319	0,166	0,153	7 · 10 ⁻⁸	0,62	0,600	30,9°	—	1,39	—	—	—	—	
14c	10	46	44	—	33	3,16	0,52	2,69	2,237	1,90	0,177	0,123	0,218	0,109	0,109	0,825	0,403	0,289	0,134	9 · 10 ⁻⁷	0,62	0,500	26,5°	29,9°	0,35	0,123	—	$\frac{112 \cdot p^{0,24}}{30 \cdot p^{1,3}}$	4	

2.32

Geschiebelehm Klütz

Kornverteilung

Die durchschnittliche Kornverteilung des Geschiebelehmes liegt bei knapp 9% Ultraschluffkorn, 39% Schluffkorn, 47% Sandkorn und 5% Kieskorn. Die festgestellten Schwankungen liegen dabei zwischen 0 und 17% Ultraschluffkorn, 33 und 47% Schluffkorn, 37 und 56% Sandkorn sowie zwischen 0 und 9% Kieskorn. Die

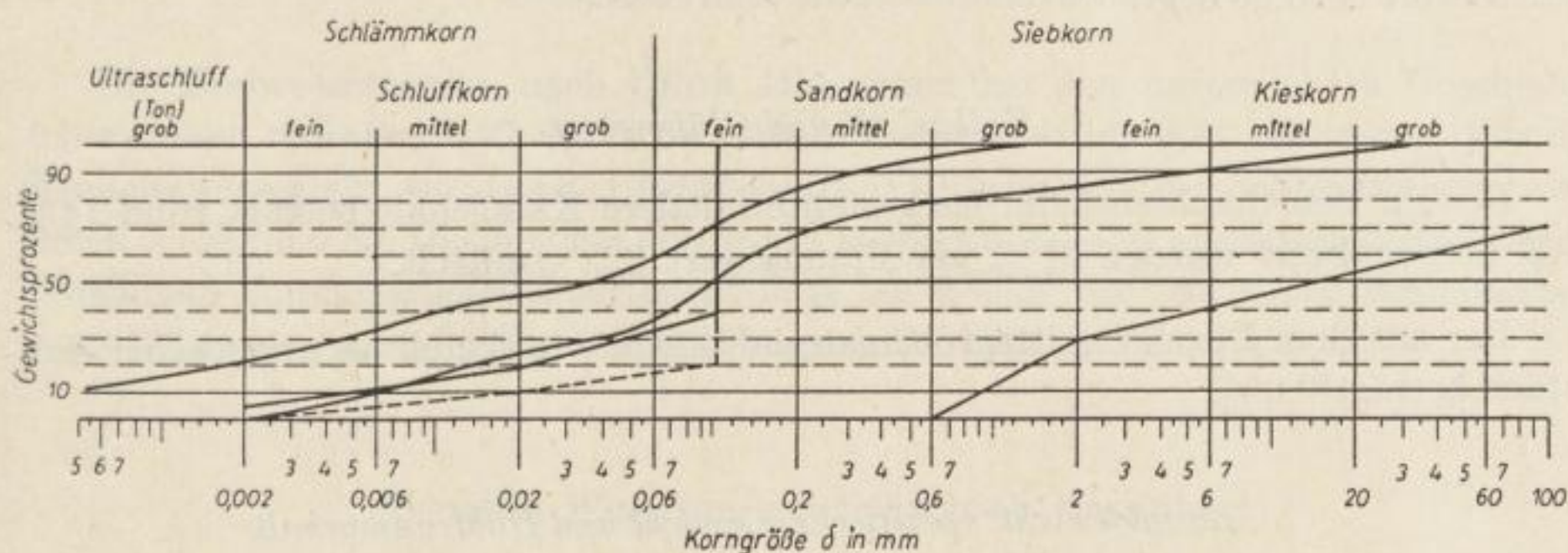


Bild 28a. Klütz-Höved. Geschiebelehme (T_{0-17} Su_{33-47} S_{37-56} K_{0-9})

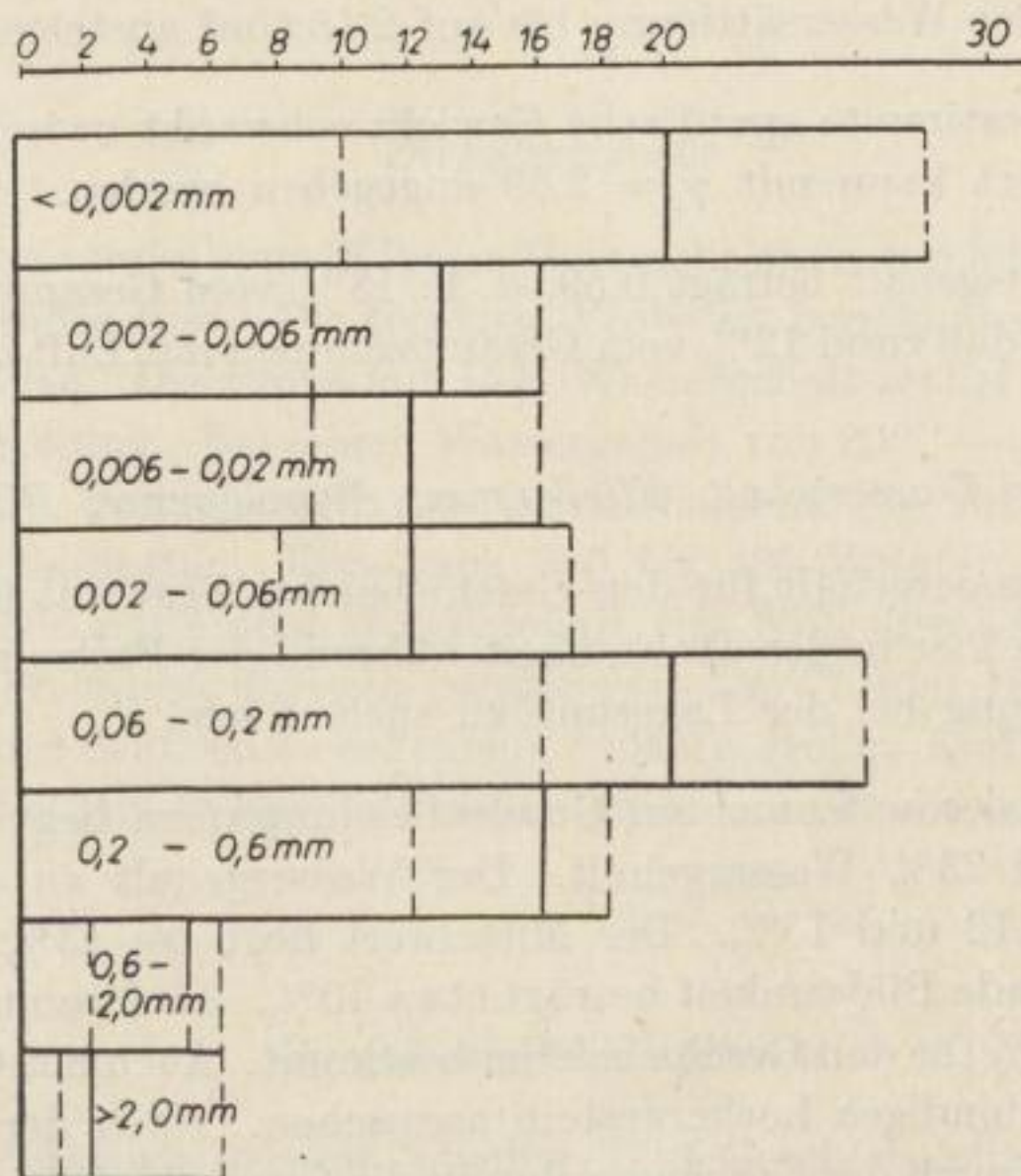


Bild 28b. Geschiebelehm Klütz. Schwankungen der Kornfraktionen und mittlere Zusammensetzung

einzelnen Fraktionen sind in folgender Stärke vertreten: Feinsand (30%), Grobschluff (17%), Mittelsand und Mittelschluff (je 12%), Feinschluff (10%) Ultraschluffkorn (9%), Grobsand und Fein/Mittelkies (je 5%). Eine wesentliche Änderung gegenüber dem Geschiebemergel ist also nicht zu erkennen (Bild 28a und b).

Der mittlere Ungleichförmigkeitsgrad des Geschiebelehmes liegt — bei Schwankungen zwischen $U = 20$ und $U = 72$ — bei $U = 42$. Der Sortierungskoeffizient beträgt $S_0 = 4,31$, das festgestellte Minimum ist 2,37, das Maximum 7,07. Die Schiefe hat einen Minimalwert von 0,23, einen Maximalwert von 1,07, während der Mittelwert bei 0,55 liegt.

Kalkgehalt und Glühverlust

Der für den Geschiebelehm festgestellte mittlere Kalkgehalt beträgt rund 14%. Als Maximalwert wurden 21%, als Minimalwert 3% ermittelt.

Der aus dem Durchschnittsprobematerial bestimmte Anteil an organischer Substanz beträgt 9,0%.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Das Feuchtraumgewicht des Geschiebelehmes von Klütz-Höved beträgt im Mittel $\gamma = 2,03 \text{ t/m}^3$, das Trockenraumgewicht $1,88 \text{ t/m}^3$. Als mittleres Porenvolumen wurde $n = 30\%$, als mittlere Porenziffer $\varepsilon = 0,43$ ermittelt. Das Raumgewicht kann bei voller Wassersättigung bis auf $2,18 \text{ t/m}^3$ ansteigen.

Das im Labor bestimmte spezifische Gewicht schwankt zwischen 2,65 und 2,72 t/m^3 . Der Mittelwert kann mit $\gamma_s = 2,69$ angegeben werden.

Der Feuchtigkeitsgehalt beträgt 0,59, d. h. 18% vom Gesamtvolumen. Daraus läßt sich errechnen, daß rund 12% vom Gesamtvolumen mit Luft gefüllt sind.

Natürlicher Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit

Der Entnahmewassergehalt für den Geschiebelehm liegt mit 9,4% niedrig. Die Ursache dürfte auch hier in der Trockenheit während der Probenahme und in einer gewissen Austrocknung bei der Lagerung zu suchen sein.

Die Fließgrenze der untersuchten Geschiebelehmproben liegt zwischen 18 und 29%, im Mittel bei 23% Wassergehalt. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze schwankt zwischen 12 und 15%. Der Mittelwert liegt bei 13%. Die aus beiden Werten zu berechnende Bildsamkeit beträgt etwa 10%. Als Minimalwert wurde 4%, als Maximalwert 14% für den Geschiebelehm bestimmt. Auch der Geschiebelehm ist danach als schwachbindiges Lockergestein anzusehen. Nach der Plastizitätskarte von CASAGRANDE ist auch der Geschiebelehm in die Gruppe „sandige Tone, schwachplastische anorganische Schluffe, sehr feine schluffige Sande (CL)“ einzuordnen (vgl. Bild 6 u. 39).

Die Zustandszahl wurde für den Geschiebelehm mit $k_w = 1,39$ ermittelt und spricht für die Festigkeit des anstehenden Materials. Die zulässige Bodenpressung beträgt nach DIN 1054 unter Berücksichtigung des errechneten Wertes 2 kp/cm^2 .

Die Aktivität nach SKEMPTON liegt für den Geschiebelehm im Durchschnitt bei $A = 1,1$.

Breiwasserzahl, Einheitswasserzahl

Die Breiwasserzahlen nach OHDE schwanken bei den untersuchten Geschiebelehmproben zwischen 0,27 und 0,52. Als Mittelwert wurde 0,41 bestimmt. Für die Einheitswasserzahl wurde im Durchschnitt 0,19 ermittelt bei Schwankungen zwischen 0,15 und 0,30. Die mittlere OHDEZahl beträgt 0,22. Der aus diesen Mittelwerten errechnete Durchlässigkeitskoeffizient liegt bei $k = 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$, der Reibungsbeiwert bei $\text{tg } \varrho = \mu_0 = 0,560$. Der Reibungswinkel beträgt danach $\varrho = 29^\circ$.

Maximale Wasseraufnahmefähigkeit (Enslinwert)

Der Enslinwert für den Geschiebelehm schwankt im Gegensatz zum Geschiebemergel in relativ engen Grenzen. So liegt das Maximum bei 80% und das Minimum bei 55%. Der daraus berechnete Mittelwert beträgt 69%.

Zerfallsversuche

Die mit Probematerial vom Klützer Geschiebelehm durchgeführten Zerfallsversuche zeigen folgendes Bild. Die trockene Probe ist bereits zwischen 35 und 95 Minuten völlig zerfallen. Die Probe mit 15% Wassergehalt zerfiel nach 130 bis 150 Minuten Wasserbedeckung. Bei einem Wassergehalt von 20% — also etwas unterhalb der Fließgrenze — verhielt sich der Geschiebelehm gegenüber dem Angriff des Wassers am dauerhaftesten. Erst nach 350 bis 430 Minuten waren diese Proben völlig zerfallen. Die mit einem Wassergehalt von 25% etwas über der Fließgrenze eingebauten Proben waren dagegen bereits zwischen 75 und 150 Minuten zerfallen. Auch hier ist wieder deutlich zu erkennen, welchen großen Einfluß ein Wassergehalt im Bereich der Fließgrenze für die Beständigkeit einer Probe unter Wasser hat (vgl. Bild 47).

Durchlässigkeitskoeffizient

Im Druckdurchlässigkeitsgerät wurden fünf Geschiebelehmproben untersucht. Dabei wurde für diesen Lockergesteinstyp eine Durchlässigkeit k zwischen $1,3 \cdot 10^{-8}$ und $8,7 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ festgestellt. Der Durchschnitt liegt bei Werten um $1 \cdot 10^{-7}$ und damit um einiges über den aus w_0/w_1 bestimmten Werten.

Zusammendrückbarkeit

Druckversuche mit verhinderter Seitenausdehnung konnten an acht ungestörten Geschiebelehmproben ausgeführt werden. Die stufenweise lotrechte Belastung bis 10 kp/cm^2 ergaben bei diesen Proben Setzungen zwischen $0,6$ und $1,8 \text{ mm}$, das sind $3,2$ bis $8,5\%$ zur Ausgangsprobenhöhe. Die nach dem Prinzip OHDE berechneten Steifezahlen liegen für den Wiederbelastungsbereich in den Grenzen $V = 45 \dots 200$ mal $p^{0,19 \dots 0,6} \text{ kp/cm}^2$, für den Erstbelastungsbereich bei $V = 3,9 \dots 75 \cdot p^{0,89 \dots 2,6} \text{ kp/cm}^2$. Die Grenze zwischen Wiederbelastung und Erstbelastung wurde daraus zu 2 bis 6 kp/cm^2 abgegriffen. Der Mittelwert liegt bei $3,6 \text{ kp/cm}^2$.

Scherfestigkeit

Die ungestört im offenen System bei langsamer Belastung im Seitendruckgerät untersuchten Geschiebelehmproben ergaben Reibungswinkel zwischen $18,7^\circ$ und $31,9^\circ$, im Durchschnitt etwa von $24,6^\circ$ ($\text{tg } \varrho = 0,460$). Die Kohäsion wurde bei diesen Versuchen zwischen $c = 0,48$ und $0,95 \text{ kp/cm}^2$ bestimmt. Als Durchschnittswert ergibt sich $c = 0,67 \text{ kp/cm}^2$ (Bild 29).

Die bei Wassergehalten zwischen 13 und 19% im gestörten Zustand — aber auch im offenen System, also mit möglichem Porenwasserausgleich — in den Seitendruckgeräten untersuchten Proben zeigten ein völlig gleiches Verhalten hinsichtlich ihres

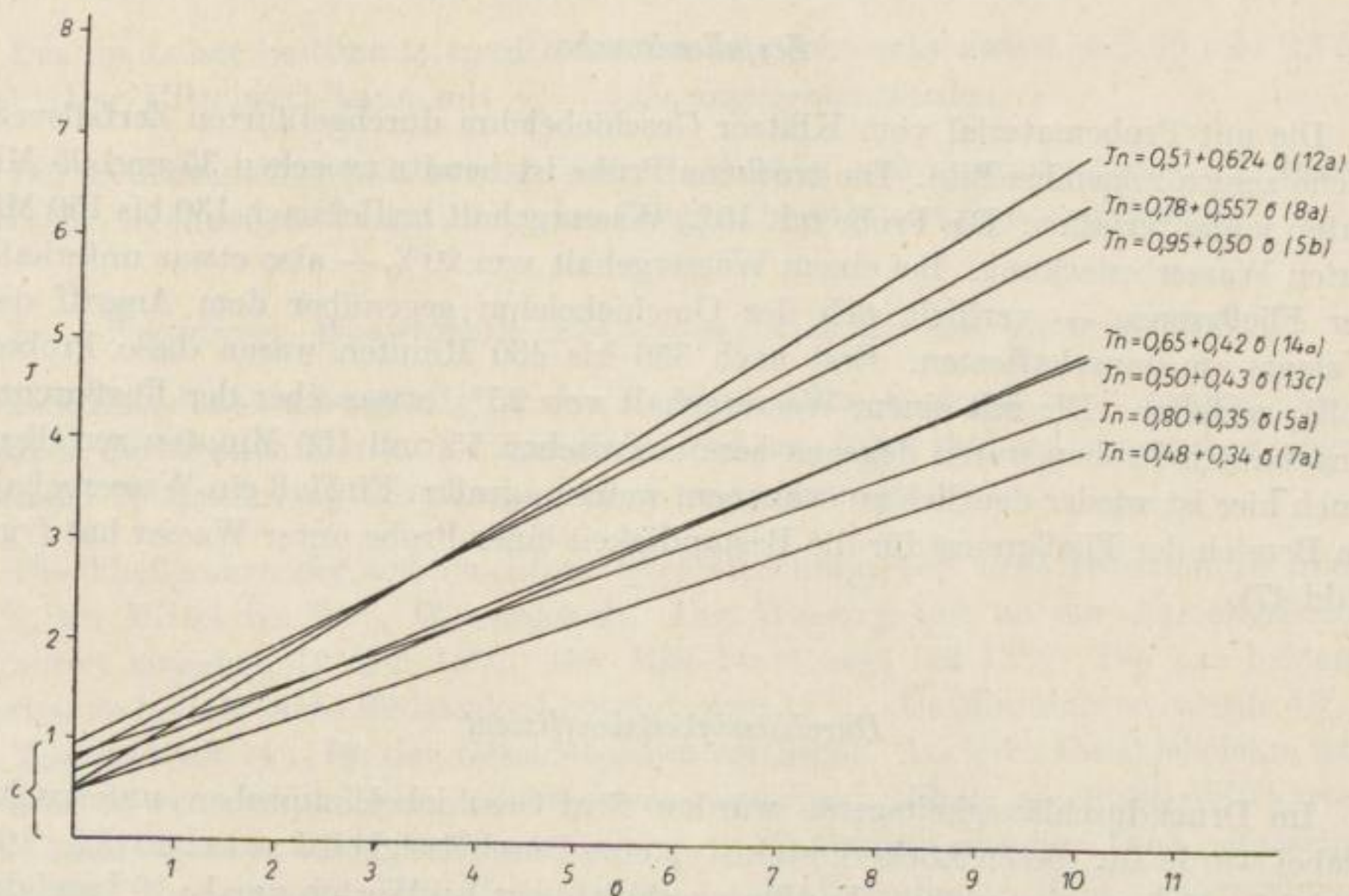


Bild 29. Geschiebelehm — Klütz-Höved — Scherfestigkeit (ungestörte Proben)

Tabelle 2. Bodenphysikalische Kennwerte. Geschiebelehm — Klütz-Höved

Probe Nr.	Kornanteile				U	S ₀	S ₂	v _s	γ	γ ₁	CoD	v _h	v _l	v ₀	v ₁₀	v _{max}	v _h	v _l	v ₀	k (Obde) (cm/s)	v _h (Obde)	v _h (Obde)	v _h (Obde)	v _h (Obde)	v _h (Obde)	c (kp/cm ²)	v _E	k (cm/s)	V = v̄ · p ⁿ	V ₁ (kp/cm ²)
	< 0,002 %	— 0,06 %	— 2,0 %	> 2,0 %																										
1b	5	35	50	4	20	2,37	0,90	2,083	1,960	1,73	0,089	0,133	0,176	0,135	0,041	0,596	0,265	0,156	0,109	1 · 10 ⁻⁷	0,66	0,451	24,3°	—	—	0,163	—	—	—	
2	10	39	43	7	55	4,71	0,43	2,092	2,107	1,98	0,179	0,068	0,198	0,125	0,073	0,553	0,390	0,177	0,213	4 · 10 ⁻⁸	0,57	0,520	27,4°	—	—	0,148	6,7 · 10 ⁻⁷	—	—	
3a	17	37	43	3	73	6,18	0,23	2,096	—	—	0,212	—	0,252	0,129	0,123	0,500	0,456	0,179	0,277	2 · 10 ⁻⁸	0,51	0,390	21,3°	—	—	0,134	—	—		
4a	10	42	46	2	36	3,49	0,33	2,706	1,925	—	0,178	—	0,261	0,144	0,117	0,762	0,497	0,193	0,304	2 · 10 ⁻⁸	0,49	0,391	21,3°	—	—	—	—	—		
5a	7	37	48	8	33	3,56	0,73	2,073	—	—	0,025	0,108	0,286	0,149	0,137	0,761	0,516	0,165	0,351	1 · 10 ⁻⁸	0,46	0,350	19,3°	—	0,80	0,108	1,3 · 10 ⁻⁸	$\frac{80 \cdot p^{0,19}}{8 \cdot p^{1,32}}$	5	
5b	11	33	49	7	59	4,45	0,42	2,702	1,905	1,84	0,167	0,088	0,230	0,128	0,102	0,761	0,411	0,175	0,236	3 · 10 ⁻⁸	0,55	0,500	26,5°	—	0,95	0,088	8,73 · 10 ⁻⁷	—	—	
6a	11	41	44	4	50	4,09	0,43	2,688	1,967	1,83	0,198	0,075	0,221	0,153	0,068	0,653	0,416	0,182	0,234	3 · 10 ⁻⁸	0,54	—	—	—	—	—	—	$\frac{53 \cdot p^{0,40}}{22 \cdot p^{1,58}}$	2	
7a	8	36	47	9	35	3,38	1,07	2,094	2,025	1,94	0,168	0,049	0,242	0,132	0,110	0,663	0,396	0,177	0,219	4 · 10 ⁻⁸	0,56	0,340	18,7°	—	0,48	0,049	2,1 · 10 ⁻⁷	$\frac{130 \cdot p^{0,21}}{75 \cdot p^{0,89}}$	2	
8a	10	37	45	8	55	4,59	0,42	2,693	2,010	1,87	0,168	0,078	0,221	0,127	0,094	0,750	0,387	0,299	0,088	5 · 10 ⁻⁸	0,64	0,557	29,1°	—	0,78	0,078	—	$\frac{130 \cdot p^{0,46}}{45 \cdot p^{1,34}}$	4	
9a	14	47	37	2	36	5,85	0,41	2,684	—	—	0,199	—	0,258	0,123	0,135	0,713	0,459	0,161	0,288	2 · 10 ⁻⁸	0,49	0,465	24,9°	—	—	—	—	—	—	
10a	9	39	52	—	30	2,81	0,67	2,682	2,003	1,85	0,101	0,085	0,242	0,149	0,093	0,666	0,396	0,181	0,215	4 · 10 ⁻⁸	0,56	0,455	24,4°	—	—	0,188	—	$\frac{130 \cdot p^{0,27}}{56 \cdot p^{1,2}}$	3	
12a	14	44	38	4	51	4,03	0,39	2,685	2,220	2,03	0,222	0,097	0,214	0,121	0,093	0,707	0,396	0,274	0,122	9 · 10 ⁻⁸	0,62	0,535	28,1°	—	0,51	0,097	2,3 · 10 ⁻⁷	$\frac{200 \cdot p^{0,11}}{3,9 \cdot p^{2,8}}$	5	
13c	8	38	49	5	38	3,65	0,39	2,680	2,115	1,92	0,114	0,104	0,189	0,126	0,063	0,796	0,358	0,147	0,211	3 · 10 ⁻⁸	0,56	0,430	23,2°	29,2°	0,50	0,104	—	$\frac{91 \cdot p^{0,66}}{48 \cdot p^{1,08}}$	6	
14a	—	44	54	2	24	2,24	0,82	2,647	—	—	0,040	0,091	0,239	0,115	0,124	0,750	0,373	0,236	0,137	4 · 10 ⁻⁸	0,62	0,420	22,7°	28,9°	0,65	0,091	—	$\frac{45 \cdot p^{0,24}}{29 \cdot p^{0,91}}$	2	



SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



Reibungswinkels. Selbstverständlich lagen die abgelesenen Kohäsionswerte wesentlich unter den an ungestörten Proben festgestellten, nämlich zwischen 0 und 0,05 kp/cm². Der Tangens des Reibungswinkels wurde für die gestörten Proben mit $\operatorname{tg} \varrho = 0,458$, d. h. $\varrho = 24,5^\circ$, festgestellt. Die Schwankungen lagen dabei zwischen 21,3 und 28,1°.

Im Gegensatz zu den bisher angegebenen Werten für den Reibungswinkel liegen die bei abnehmendem Seitendruck und gleichbleibender lotrechter Belastung gefundenen Werte (Bruchzustand) wesentlich höher. Sie erhöhen sich für die Probe 13c von $\varrho = 23,2^\circ$ auf 29° und für die Probe 14a von $22,7^\circ$ auf $28,9^\circ$ im ungestörten Zustand. Die diesbezüglichen Untersuchungen mit Durchschnittsprobenmaterial im gestörten Zustand ergab eine Erhöhung von $\varrho = 24,5^\circ$ bzw. von $23,5^\circ$ auf $28,0^\circ$. Im Durchschnitt ist also eine Erhöhung des Reibungswinkels bei Untersuchungen bis zum Bruchzustand um ca. 22% festzustellen, was bei Standsicherheits-Berechnungen zu berücksichtigen ist.

Die Vergleichsuntersuchungen im geschlossenen System und bei schneller Belastung mit gestörten Proben und verschiedenen Wassergehalten zeigten für den Geschiebelehm folgendes Bild. Die mit einem Wassergehalt im Bereich der Ausrollgrenze (12 bis 13%) eingebauten Proben besaßen einen Reibungswinkel zwischen 11 und 12°, die Kohäsion lag bei 0,15 bzw. 0,20 kp/cm². Bei einem Wassergehalt im plastischen Bereich, nämlich bei 18,4%, beträgt der Reibungswinkel nur noch 6,5°, nach Überschreiten der Fließgrenze (Wassergehalt 24,6%) sank der Reibungswinkel auf 3,8°. Eine Kohäsion war bei den beiden letztgenannten Wassergehalten in der Probe nicht mehr vorhanden (vgl. Bild 46).

Proctordichte

Die mit dem Durchschnittsprobenmaterial vom Geschiebelehm Klütz-Höved durchgeführten Proctorversuche zeigen folgendes Ergebnis. Es wurden vier Proben mit einem Wassergehalt von 8,3%; 10,3%; 12,2%; und 15,7% unter der jeweils genormten Verdichtungsarbeit lagenweise in den Proctorzylinder eingebaut. Dabei wurden für die Proben Raumgewichte von 1,85; 1,88; 1,90 und 1,83 t/m³ erzielt. Die graphische Auswertung ergab eine Proctordichte von 1,90 t/m³ bei einem günstigsten Wassergehalt von $w_p = 12,2\%$. Die Probe hat dabei einen Luftporengehalt von rund 15% (vgl. Bild 52).

Frosthebung

Die Probe vom Geschiebelehm wurde bei einem Wassergehalt von 19% gestört in den Frostversuchsschrank eingebaut. Nach einem stufenweisen Kälteabfall bis auf -14° innerhalb von acht Tagen konnte eine Hebung um etwa 10% festgestellt werden. Trotz des freien Wassernachschubes war die Wasserzunahme in der Probe gering. Sie stieg durchschnittlich um 2 bis 4% in den Eisanreicherungs-zonen und nahm in den Zwischen-zonen etwas ab.

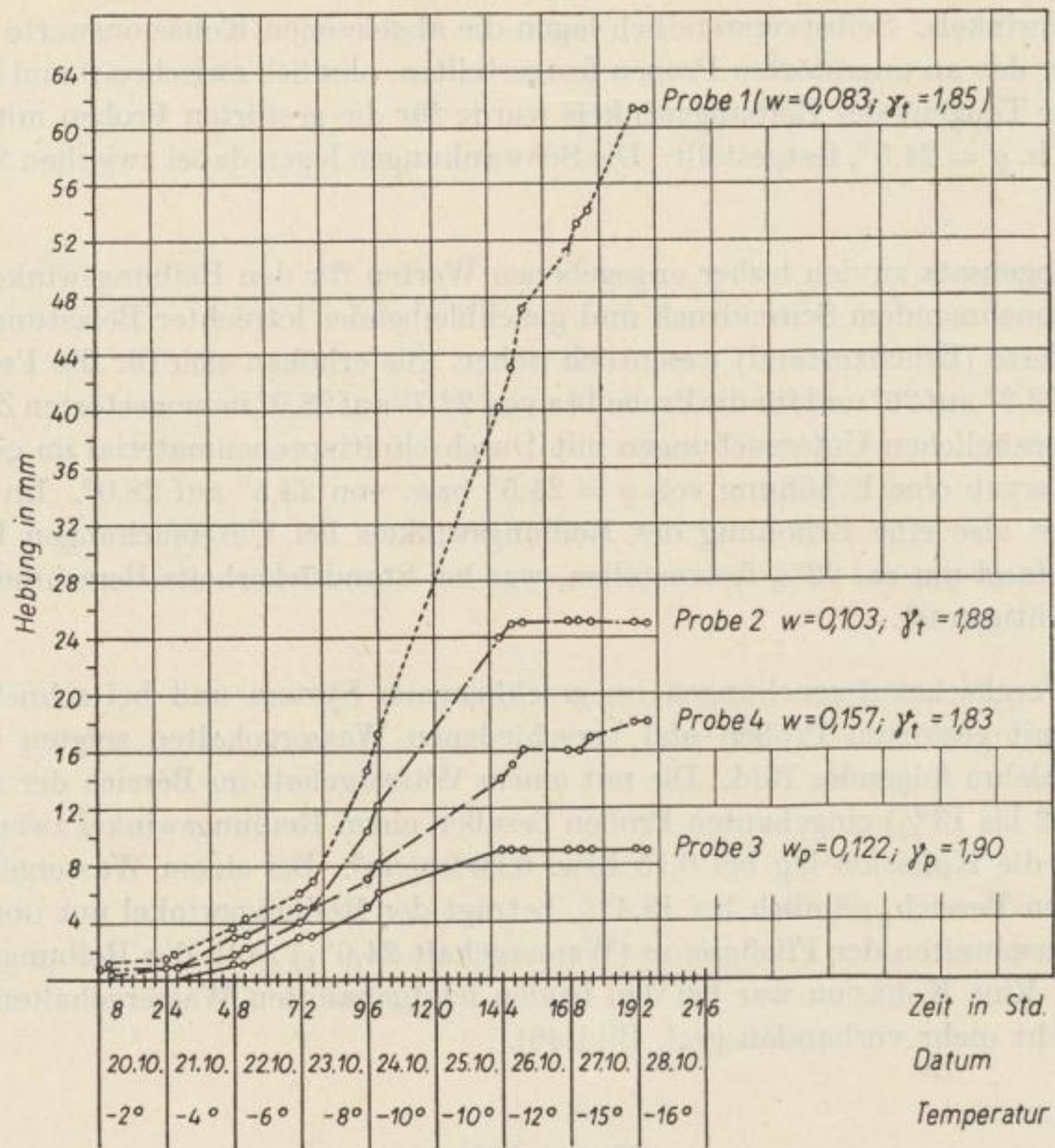


Bild 30 a. Geschiebelehm Klütz — Ergebnis der Frosthebungsversuche



Bild 30 b. Geschiebelehm Klütz — Ergebnis der Frosthebungsversuche

Die Frosthebungsversuche bei einer vergleichbaren Verdichtung und bei verschiedenem Wassergehalt, die im Proctortopf hergestellt wurden, zeigten für den Geschiebelehm bei gleichem Kälteabfall folgendes Bild (Bild 30a und b).

Die Probe mit dem geringsten Wassergehalt (8,3%) und einem Raumgewicht von 1,85 t/m³ zeigte die größte Hebung von ca. 61 mm (43%) zur Ausgangsprobenhöhe). Der Wassergehalt in der Probe stieg dabei auf 37%. Den geringsten Frosthebungseffekt zeigte die Probe mit der Proctordichte ($\gamma_p = 1,90 \text{ t/m}^3$). Der Wassergehalt stieg dabei von $w_p = 12,2\%$ auf nur 17,5%. Gegenüber dieser geringen Hebung von knapp 9 mm (6% zur Ausgangsprobenhöhe) zeigt die Probe mit 15,7% Wassergehalt und einem Trockenraumgewicht von 1,83 t/m³ eine Hebung von 18 mm (13%) bei einer Erhöhung des Wassergehaltes auf 18,8%. Die Probe mit 10,3% Wassergehalt und 1,88 t/m³ Raumgewicht hob sich um ca. 25mm (18%) bei einer Wassergehaltszunahme auf 24,1%.

2.33

Schluffe Klütz

Kornverteilung

Die Kornverteilung der im Gebiet des Klütz-Höved aufgeschlossenen schluffigen Lockergesteine schwankt im Bereich 0 bis 11% Ultraschluffkorn, 43 bis 87% Schluffkorn, 5 bis 46% Sandkorn und 0 bis 3% Kieskorn. Die daraus abzuleitende mittlere Zusammensetzung liegt bei 6% Ultraschluffkorn, 64% Schluffkorn und 30% Sandkorn (Bild 31a und b).

Interessant ist das Bild über die Verteilung der Einzelfractionen. An erster Stelle steht die Grobschlufffraktion mit 44%, es folgen Feinsand mit 27%, Mittelschluff mit 14%, Feinschluff und Ultraschluffkorn mit je 6%, Mittelsand mit 2%, Grobsand mit 0,6% und Feinkies mit 0,4%. Die schluffigen Sedimente zeigen bei Vergleich mit Geschiebemergel und -lehm ein starkes Überwiegen der Fraktionen kleiner als 0,06 mm Korngröße. Besonders stark tritt die Grobschlufffraktion in den Vordergrund. Auch

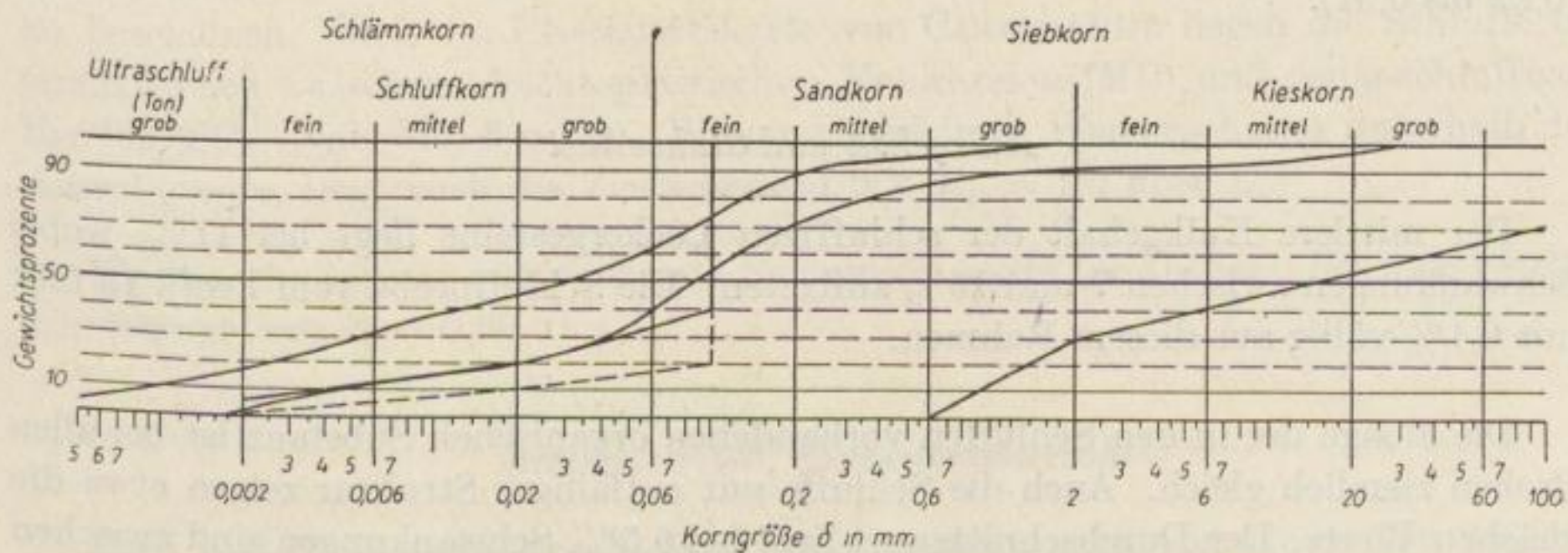


Bild 31a. Klütz-Höved. Schluffe (T_{4-12} Su_{39-87} S_{5-46} K_{0-3})

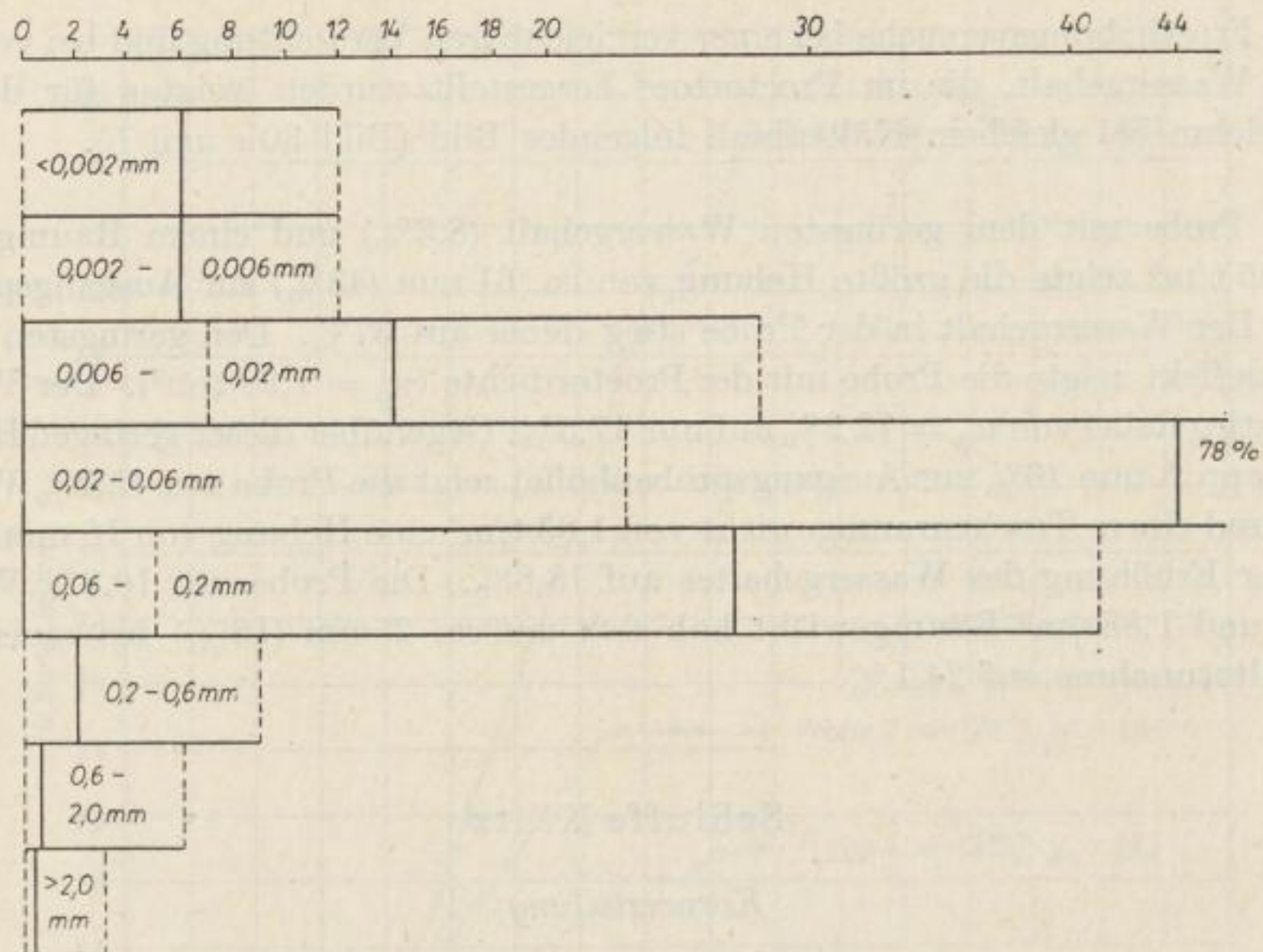


Bild 31 b. Schluffe Klütz. Schwankungen der Kornfraktionen und mittlere Zusammensetzung

bei Vergleich der Kornverteilungen fallen die in den Profilen 5 und 12 sowie 13 anstehenden Schluffe mit ihrem auffälligen Gefüge heraus. Die ersten beiden zeigen eine sehr starke Beteiligung der Grobschlufffraktion. Die letzte fällt durch geringen Feinsandgehalt und herausragende Anteile in der Mittel- und Feinschlufffraktion auf.

Der Ungleichförmigkeitsgrad der untersuchten Schluffe schwankt zwischen 2,3 und 37,2. Der errechnete Mittelwert liegt bei etwa 13. Auch hier markieren sich vor allem die Schluffe von Profil 5 und 12 mit den niedrigsten Werten. Der Sortierungskoeffizient liegt im Durchschnitt bei 1,98 (1,18 bis 3,13), die Schiefe bei 0,65 (0,22 bis 0,91).

Kalkgehalt und Glühverlust

Der mittlere Kalkgehalt der schluffigen Lockergesteine liegt bei 11%, wobei Schwankungen zwischen 7 und 16% auftreten. Die Schluffprobe vom Profil 13 fällt mit 0,1% völlig aus diesem Rahmen.

Die Menge der in den Schluffen vorhandenen organischen Substanz ist bei allen Proben ziemlich gleich. Auch die Schluffe mit auffälliger Struktur zeigen etwa die gleichen Werte. Der Durchschnittswert liegt bei 6,5%. Schwankungen sind zwischen 4 und 8% festzustellen.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Das für den Schluff festgestellte mittlere Feuchtraumgewicht liegt bei $1,82 \text{ t/m}^3$, das Trockenraumgewicht bei $1,61 \text{ t/m}^3$. Das Porenvolumen wurde im Durchschnitt mit 40% bestimmt, die Porenziffer hat danach eine Größe von 0,66. Eine völlige Wassersättigung der Poren erhöht das Raumgewicht auf $2,01 \text{ t/m}^3$.

Das mittlere spezifische Gewicht beträgt $2,68 \text{ t/m}^3$.

Der Feuchtigkeitsgehalt wurde mit $f = 0,57$ festgestellt. Rechnet man diesen Wert auf das Gesamtvolumen um, so ergeben sich 23%. Der Luftgehalt des Schluffes beträgt danach etwa 17% des Gesamtvolumens.

Natürlicher Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit

Der mittlere natürliche Wassergehalt der Schluffproben beträgt knapp 14%. Er liegt bei allen Proben um etwa 2% niedriger als die Ausrollgrenze. Auffällig ist auch hier der bei 25% liegende natürliche Wassergehalt des Schluffes aus Profil 13. Der hohe Entnahmewassergehalt der Schluffe dürfte im wesentlichen darauf zurückzuführen sein, daß diese Erdarten im allgemeinen im Bereich grundwasserführender Sande im Kliff anstehen, die auch im Sommer eine gewisse Menge Wasser führen. Hinzu kommen die außerordentlich dicht schließenden Messingprobenbüchsen, die keinerlei Verluste durch Verdunstung zulassen.

Die Fließgrenze der untersuchten schluffigen Lockergesteine liegt in engen Grenzen zwischen 19 und 27% Wassergehalt, wenn man von dem Fließgrenzenwassergehalt der Probe 13 mit 42% absieht. Der ermittelte Durchschnitt liegt bei 24%. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze schwankt zwischen 12 und 25% und liegt im Durchschnitt bei 18%. Daraus errechnet sich eine Bildsamkeit von 6%. Dieser hohe Wert wird durch das Eingehen des Wertes von Probe 13 ($w_{fa} = 17\%$!) erreicht, da die Bildsamkeit der übrigen Schluffproben nur zwischen 2 und 8% schwankt, was einem Mittel von 4% entspricht. Nach diesen Ergebnissen ist der im Gebiet des Klütz-Höved anstehende Schluff als außerordentlich schwachbindiges Lockergestein anzusprechen. Die im Profil 13 anstehenden Schluffe sind dagegen als starkbindig zu bezeichnen. Nach der Plastizitätskarte von CASAGRANDE liegen die Schluffe im Grenzbereich zwischen „leicht plastischen Mehlsanden (ML) und tonig-schluffigen Sanden (SC)“ (vgl. Bild 6 u. 39). Entsprechend ihres Wassergehaltes unterhalb der Ausrollgrenze, liegt auch die Zustandszahl mit $K_w = 1,5$ über 1.

Die Berechnung der Aktivität nach SKEMPTON ergibt für die Schluffe einen Durchschnittswert von $A = 0,66$.

Breiwasserzahl, Einheitswasserzahl

Brei- und Einheitswasserzahl nach OHDE wurden auch von sämtlichen Schluffproben ermittelt. Dabei ergab sich folgendes Bild. Die Breiwasserzahl hat einen

Durchschnittswert von 0,36 bei Schwankungen zwischen 0,30 und 0,41. Auch hier fällt Probe 13 mit 0,67 aus dem Rahmen. Die Einheitswasserzahl schwankt zwischen 0,17 und 0,28, der Mittelwert beträgt 0,21. Die OHDEZahl hat danach eine Größe von 0,15.

Der aus w_0/w_1 zu berechnende Durchlässigkeitskoeffizient k liegt im Durchschnitt bei $3 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Probe 13 erreicht einen Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ cm/s. Ebenfalls Probe 5 fällt mit $3 \cdot 10^{-5}$ cm/s aus dem Rahmen. Der Reibungsbeiwert $\operatorname{tg} \varrho = \mu_0$ liegt mit 0,62 — was einem Reibungswinkel von $31,5^\circ$ entspricht — recht hoch. Auch hier weichen Probe 13 mit $\mu_0 = 0,46$, d. h. $\varrho = 24,5^\circ$, und Probe 5 mit etwa $\mu_0 = 0,70$, d. h. $\varrho = 35^\circ$, von den anderen Proben ab.

Maximale Wasseraufnahmefähigkeit

Der Enslinwert schwankt zwischen 47 und 77%, im Mittel liegt er bei 61%. Die bereits bei den übrigen Versuchen festgestellte Abweichung der Schluffe aus Profil 13 und 5 markieren sich auch hier gut, indem sie die beiden Extremwerte bilden, was ihrem Aufbau voll entspricht.

Zerfallsversuche

Die Versuche zeigten, entsprechend der hohen Wasseraffinität aber geringen Kohäsion der Schluffe, beim Eintauchen in Wasser einen sofortigen Zerfall der Probekörper.

Durchlässigkeitskoeffizient

Die Bestimmung der Durchlässigkeit im DD-Gerät konnte nur an einer Probe erfolgen. Dieser Versuch zeigte Übereinstimmung mit dem Wert aus w_0/w_1 ($9,95$ mal 10^{-8} cm/s).

Scherfestigkeit

Es wurden fünf ungestörte Schluffproben im Seitendruckgerät im offenen System bei langsamer Belastung untersucht. Dabei wurde ein mittlerer Reibungswinkel von 25° festgestellt. Die mittlere Kohäsion betrug $0,36$ kp/cm². Die Schwankungen liegen zwischen 21 und 32° bzw. zwischen $0,21$ und $0,60$ kp/cm². Der niedrigste Wert für den Reibungswinkel und der höchste für die Kohäsion wurden erwartungsgemäß für Probe 13 bestimmt (Bild 32).

Die gestörten Proben wurden bei einem Wassergehalt zwischen 11 und 23% in die Geräte eingebaut. Der Reibungswinkel lag auch bei dieser Versuchsart etwa in der gleichen Höhe wie bei der Verwendung ungestörter Proben ($\varrho = 23,5^\circ$). Die Schwankungen lagen zwischen 21 und 27° . Werte für die Kohäsion wurden nicht ermittelt.

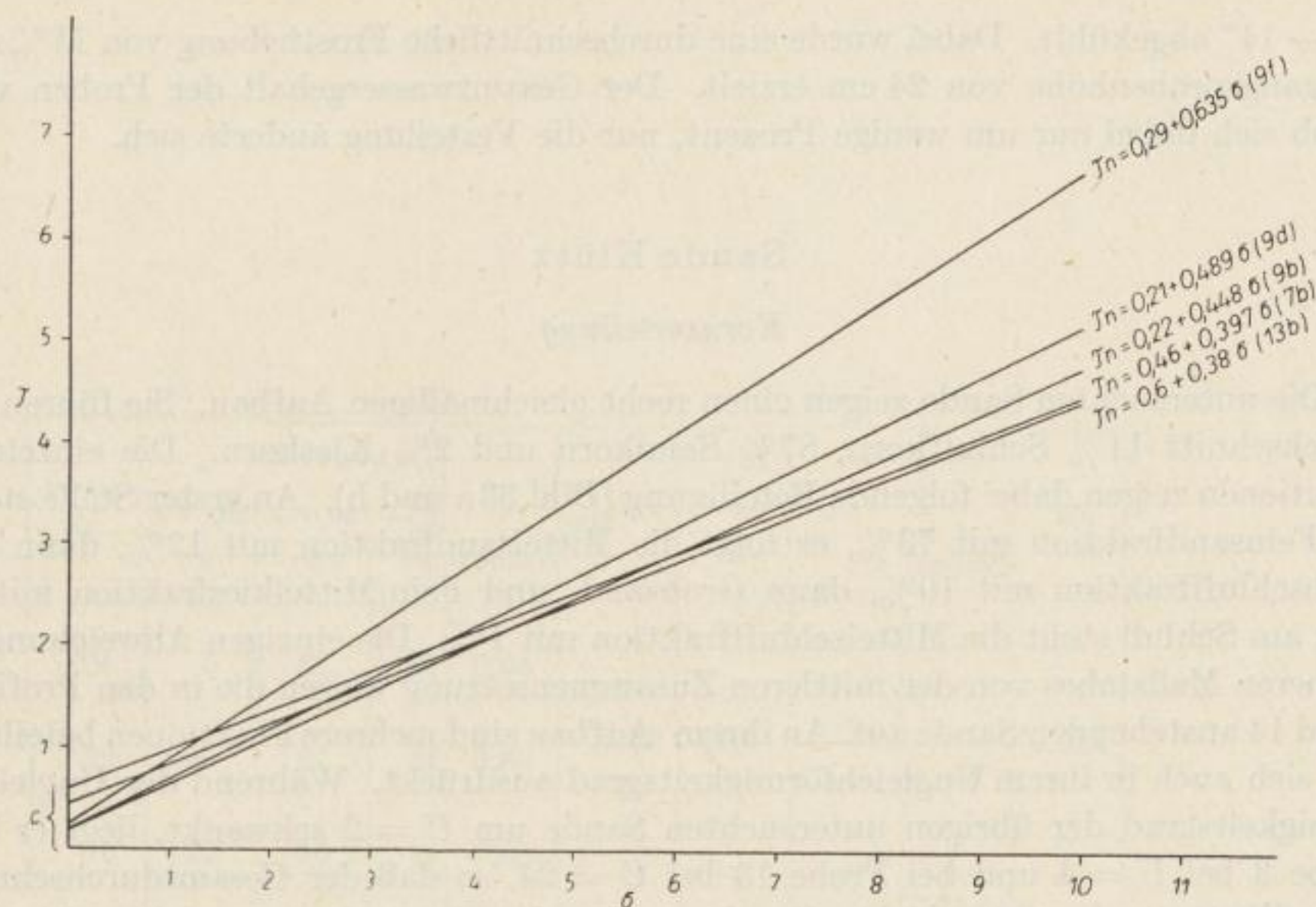


Bild 32. Schluffe Klütz — Scherfestigkeit (ungestörte Proben)

Der Bruchwert wurde an einer ungestörten Probe und zusätzlich an zwei gestört eingebauten Proben vom Durchschnittsprobematerial bestimmt. Dabei wurde eine Erhöhung des Reibungswinkels von 21 auf 24°, von 28,7 auf 34,5° und von 32,5 auf 34° festgestellt. Das entspricht einer Steigerung um ca. 15%. Auch hier liegen die bei gleichmäßig mitansteigendem Seitendruck ermittelten Werte unter dem Bruchwert.

Die Versuche bei verhiertem Porenwasserausgleich (im geschlossenen System bei schneller Lastaufbringung) zeigten mit verschiedenem Wassergehalt folgendes Bild. Bei 8,9% Wassergehalt wurde ein Reibungswinkel von 27,3°, bei 10,3 ein Reibungswinkel von 26,1°, bei 16,9% ein Reibungswinkel von 24,2° und bei 25,2% ein Reibungswinkel von 6,8° festgestellt. Die hohen Reibungswinkel zeigen deutlich, daß die untersuchten Lockergesteine sich besonders im für die Reibung ausschlaggebenden Tonmineralanteil stark von den Geschiebemergel- und -lehmproben unterscheiden. Hier wurde die aufgebrachte Last infolge der höheren Durchlässigkeit auch im geschlossenen System sofort vom Korngerüst getragen. Erst bei Überschreiten des Fließgrenzenwassergehaltes fällt die Reibung stark ab. Hier wird die Belastung dann vom Porenwasser getragen, wodurch die Reibungskräfte fast aufgehoben werden (vgl. Bild 46).

Frosthebung

Zwei im gestörten Zustand mit etwa 18% Wassergehalt in den Frostversuchsschrank eingebaute Schluffproben wurden innerhalb von acht Tagen allmählich auf

ca. — 14° abgekühlt. Dabei wurde eine durchschnittliche Frosthebung von 11% zur Ausgangshöhe von 24 cm erzielt. Der Gesamtwassergehalt der Proben verschob sich dabei nur um wenige Prozent, nur die Verteilung änderte sich.

2.34

Sande Klütz

Kornverteilung

Die untersuchten Sande zeigen einen recht gleichmäßigen Aufbau. Sie führen im Durchschnitt 11% Schluffkorn, 87% Sandkorn und 2% Kieskorn. Die einzelnen Fraktionen zeigen dabei folgende Beteiligung (Bild 33a und b). An erster Stelle steht die Feinsandfraktion mit 73%, es folgt die Mittelsandfraktion mit 12%, dann die Grobschlufffraktion mit 10%, dann Grobsand- und Fein/Mittelkiesfraktion mit je 2%; am Schluß steht die Mittelschlufffraktion mit 1%. Die einzigen Abweichungen kleineren Maßstabes von der mittleren Zusammensetzung weisen die in den Profilen 3 und 14 anstehenden Sande auf. An ihrem Aufbau sind mehrere Fraktionen beteiligt, was sich auch in ihrem Ungleichförmigkeitsgrad ausdrückt. Während der Ungleichförmigkeitsgrad der übrigen untersuchten Sande um $U = 2$ schwankt, liegt er bei Probe 3 bei $U = 4$ und bei Probe 13 bei $U = 24$, so daß der Gesamtdurchschnitt einen Wert von $U = 5$ erreicht. Der Sortierungskoeffizient liegt bei Schwankungen zwischen 1,25 und 2,36, im Mittel bei 1,52. Die Schiefe schwankt zwischen 0,73 und 1,15 und hat einen Durchschnittswert von 0,98.

Kalkgehalt und Glühverlust

Der Kalkgehalt der untersuchten Feinsande liegt wesentlich unter den für die übrigen Sedimente festgestellten Werten. Als Durchschnittswert wurden 5% ermittelt. Dabei sind Schwankungen zwischen 0 und 8% und — wieder stark abweichend — bis zu 13% bei Probe 14 vorhanden.

Der Anteil an organischer Substanz schwankt in den Sanden zwischen 0,5 und 6%. Der Mittelwert liegt bei 3,5%. Auffallend ist die Tatsache, daß Proben, in

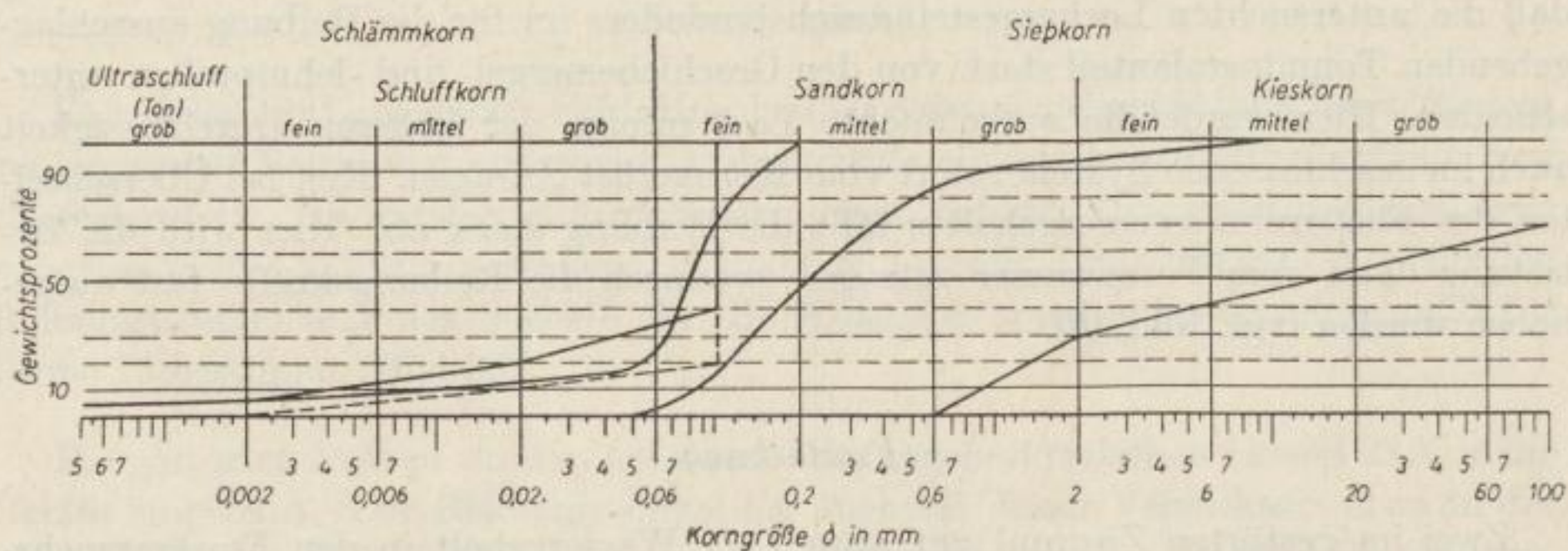


Bild 33a. Kornverteilung der Sande Klütz (T_{0-5} Su_{4-18} S_{75-95} K_{0-9})

Tabelle 3. Bodenphysikalische Kennwerte. Schluffe — Klütz-Höved

Probe Nr.	Kornanteile				U	s_0	s_k	γ_s	γ	γ_l	CaO	β	w_n	w_j	w_a	w_{1n}	w_{max}	w_s	w	w_{11}	k (Obde)	k (cm/s)	ρ_0 (Obde)	ρ_s (kg v)	ρ_u (kg v)	ρ_n	ρ_A	ρ (kg/cm ³)	ρ_{Em-bau}
	< 0,002 (%)	— 0,06 (%)	— 2,0 (%)	> 2,0 (%)																									
3b	5	58	37	—	10	1,91	0,80	2,67	1,910	1,71	0,085	—	0,122	0,199	0,167	0,032	0,730	0,308	0,183	0,125	1 · 10 ⁻⁷	0,64	—	—	—	—	—	—	
5c	—	87	13	—	2	1,18	0,91	2,67	1,588	1,48	0,068	6,0	0,077	—	—	0,470	0,339	0,277	0,062	9 · 10 ⁻⁸	0,96	0,520	27,4°	—	—	—	0,214		
6b	12	46	42	—	36	3,12	0,22	2,69	1,870	1,64	0,074	8,0	0,143	0,197	0,159	0,038	0,703	0,316	0,170	0,146	5 · 10 ⁻⁸	0,62	—	—	—	—	—	—	
7b	4	59	37	—	5	1,38	0,80	2,68	1,868	1,64	0,113	—	0,139	0,224	0,198	0,026	0,557	0,351	0,218	0,133	3 · 10 ⁻⁷	0,63	0,397	21,6°	—	0,46	0,143		
7c	4	62	34	—	8	1,65	0,65	2,68	1,615	1,46	0,136	6,9	0,105	0,210	0,187	0,023	0,542	0,236	0,199	0,127	2 · 10 ⁻⁷	0,63	—	—	—	—	—		
8b	9	73	18	—	17	2,58	0,60	2,70	1,914	1,68	0,156	—	0,139	0,243	0,166	0,077	0,500	0,358	0,198	0,160	9 · 10 ⁻⁸	0,61	0,380	20,7°	—	—	0,109		
8c	4	55	41	—	9	1,81	0,73	2,68	1,990	1,82	0,121	6,2	0,093	0,198	0,174	0,024	0,500	0,309	0,180	0,129	2 · 10 ⁻⁷	0,63	0,400	21,8°	—	—	0,166		
9b	5	75	20	—	8	1,70	0,66	2,69	1,772	1,51	0,112	6,6	0,178	0,264	0,225	0,039	0,674	0,381	0,234	0,147	2 · 10 ⁻⁷	0,62	0,448	24,1°	—	0,22	0,178		
9c	6	71	23	—	14	2,05	0,47	2,68	1,889	1,58	0,119	—	0,196	0,268	0,228	0,040	0,744	0,412	0,234	0,178	9 · 10 ⁻⁸	0,59	0,420	22,7°	—	—	0,210		
9d	4	49	45	2	9	1,39	0,72	2,68	1,811	1,65	0,110	—	0,097	0,192	0,173	0,019	0,592	0,309	0,196	0,113	3 · 10 ⁻⁷	0,65	0,489	26,0°	—	0,21	0,097		
9f	4	54	39	3	7	1,71	0,78	2,67	1,995	—	—	—	0,186	0,124	0,062	0,527	0,302	0,184	0,118	2 · 10 ⁻⁷	0,64	0,635	32,4°	—	0,29	—			
11b	11	43	46	—	37	3,13	0,46	2,67	1,967	1,72	0,124	—	0,144	0,219	0,155	0,061	0,756	0,345	0,185	0,160	8 · 10 ⁻⁸	0,61	—	—	—	—	—		
12d	5	80	15	—	6	1,40	0,68	2,67	1,605	1,44	0,127	7,6	0,119	—	—	0,529	—	—	—	—	—	—	0,455	24,4°	—	—	0,234		
13b	11	84	5	—	13	2,15	0,63	2,69	1,885	1,51	—	4,0	0,247	0,420	0,251	0,169	0,770	0,673	0,297	0,376	2 · 10 ⁻⁸	0,46	0,380	20,7°	24,2°	0,60	0,247		



SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



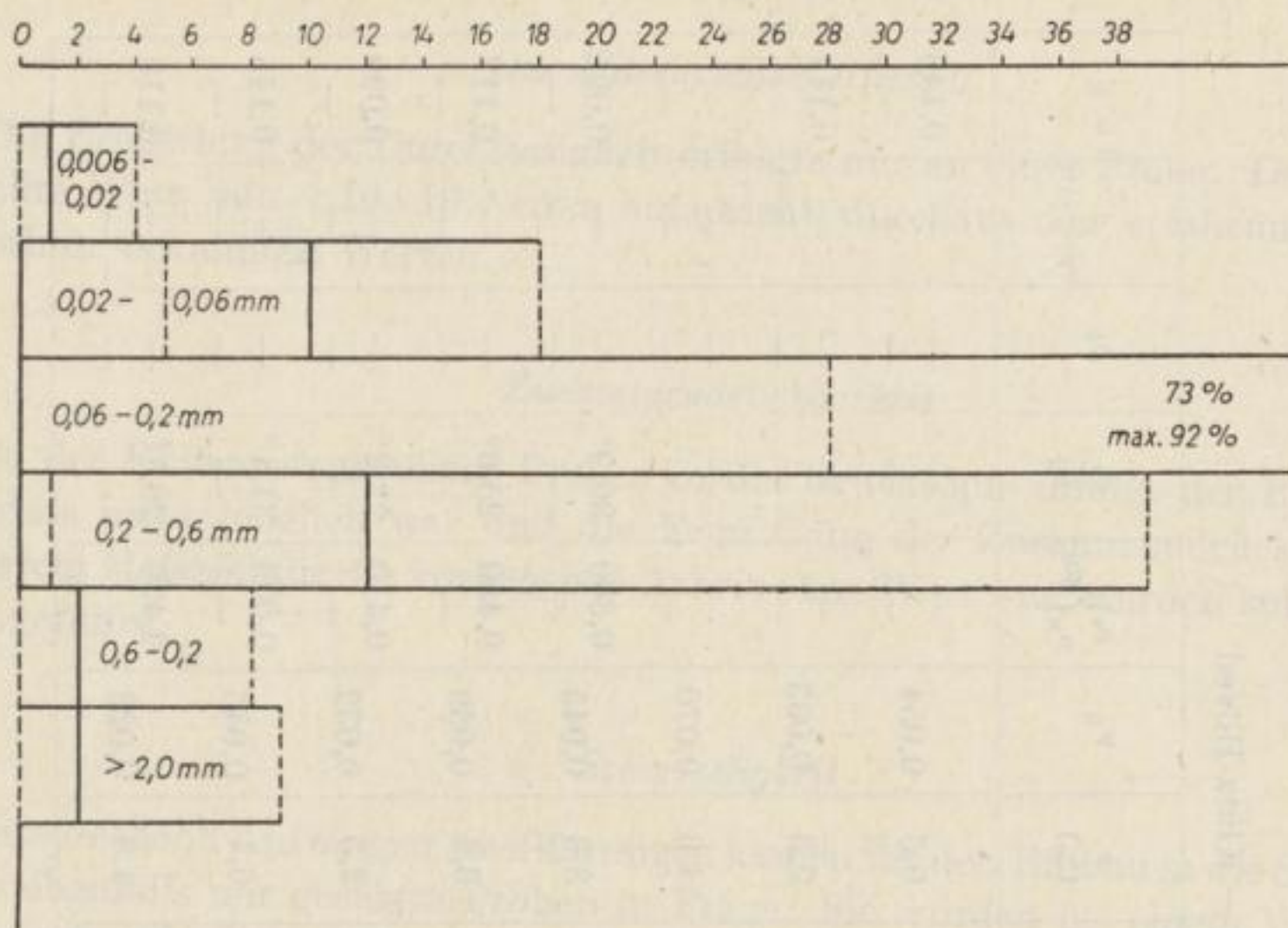


Bild 33b. Sande Klütz. Schwankungen der Kornfraktionen und mittlere Zusammensetzung

denen makroskopisch dünne organische Lagen festgestellt wurden, keinen höheren Glühverlust aufweisen als die übrigen. Auch die Sande führen also einen gleichmäßigen Anteil an organischer Substanz.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Das mittlere Feuchtraumgewicht der untersuchten Feinsande des Klütz-Höved liegt bei $1,64 \text{ t/m}^3$. Das daraus zu errechnende Trockenraumgewicht hat einen Mittelwert von $1,57 \text{ t/m}^3$. Das Porenvolumen konnte bei den Sanden mit rund 40% die Porenziffer entsprechend mit 0,66 bestimmt werden. Bei völliger Wassersättigung der Poren würde das Raumgewicht $1,99 \text{ t/m}^3$ betragen. Wie Versuche zeigten, liegt die im Labor ermittelte dichteste Lagerung nicht viel höher als die natürliche. Die außerordentliche geringen Unterschiede zwischen γ_d und γ_t weisen auf eine beachtliche natürliche Verdichtung der Sande hin.

Das spezifische Gewicht wurde bei sehr geringen Schwankungen mit $2,66 \text{ t/m}^3$ bestimmt.

Als Feuchtigkeitsgehalt wurde $f = 0,18$, das sind 7% des Gesamtvolumens, errechnet. Der mittlere Luftgehalt der Sande beträgt danach etwa 33%.

Natürlicher Wassergehalt

Der natürliche Wassergehalt der Sande ist mit 4,5% im Mittel sehr niedrig. Die Extremwerte liegen zwischen 2 und 7%.

Tabelle 4. Bodenphysikalische Kennwerte. Sande — Klütz-Höved

Probe Nr.	Kornanteile				U	S _o	S _k	γ _s (t/m ³)	γ (t/m ³)	γ _t (t/m ³)	CaO	g (%)	w _n	μ _n } μ _n } tge	e _s e _n	e _b	c (kp/cm ²)	w E
	< 0,002 (%)	— 0,06 (%)	— 2,0 (%)	> 2,0 (%)														
1a	—	4	96	—	2	1,25	0,82	2,65	1,580	1,50	—	0,5	0,054	—	—	—	—	0,148
3d	—	15	76	9	4	1,93	1,08	2,66	1,848	1,79	0,032	2,3	0,033	—	—	—	—	0,114
4b	—	12	88	—	2	1,31	0,99	2,67	1,613	1,50	0,077	4,6	0,070	—	—	—	—	—
9e	—	18	82	—	2	1,29	1,12	2,67	1,567	1,47	0,064	3,3	0,045	0,600	30,9°	—	—	0,091
11a	—	12	88	—	2	1,36	1,15	2,67	1,520	1,44	0,059	3,5	0,059	0,480	25,6°	—	—	0,117
12b	—	6	94	—	2	1,28	0,94	2,66	1,612	1,54	0,049	2,5	0,032	0,410	22,2°	—	—	0,099
13a	—	5	95	—	2	1,35	0,98	2,65	1,599	1,53	—	6,1	0,045	0,606	31,1°	—	—	0,145
14b	5	16	75	4	24	2,36	0,73	2,67	1,760	1,72	0,128	4,8	0,023	0,490	26,1°	—	—	0,116

Durchlässigkeitskoeffizient

Die Ermittlung der Durchlässigkeit erfolgte nur an einer Probe. Der dabei festgestellte Wert von $1,19 \cdot 10^{-4}$ cm/s entspricht durchaus den erfahrungsgemäß für Feinsande bekannten Werten.

Zusammendrückbarkeit

Da der Einbau ungestörter Proben in die Drucktöpfe infolge der Rolligkeit des Materials nicht möglich war und die Ermittlung der Zusammendrückbarkeit von gestörtem Material für die vorliegende Arbeit ohne Wert war, wurden keine Versuche durchgeführt.

Scherfestigkeit

Entsprechend den obigen Ausführungen kamen für den Einbau in die Seitendruckgeräte ebenfalls nur gestörte Proben in Frage. Sie wurden bei einem Wassergehalt zwischen 9 und 15% im offenen System auf ihre Scherfestigkeit untersucht. Die dabei für den Reibungswinkel ermittelten Werte liegen zwischen 22° und 31° . Als Mittelwert ist danach ein Reibungswinkel von $\varrho = 27^\circ$ für die Feinsande anzugeben.

Frosthebung

Vom Sand der Steilküste des Klütz-Höved wurden zwei gestörte Proben im Eisschrank auf ihre Frosthebung untersucht. Der allmähliche Kälteabfall auf -14° innerhalb von acht Tagen ergab gewisse Hebungseffekte, die auf den Schluffgehalt und den hohen Feinsandanteil zurückzuführen sind. Sie liegen durchschnittlich bei 3% zur Ausgangsprobenhöhe und beweisen damit, daß auch nichtbindige Lockergesteine, deren Kornanteile im wesentlichen über 0,06 mm Korngröße liegen, bei Frost zur Eislinsenbildung neigen. Die schon lange bekannte kritische Korngröße für Eislinsenbildung liegt bei 0,125 mm und durchschnittlich 50% der Korngrößen der Feinsande liegen noch unter diesem Durchmesser. Der Wassergehalt der Proben stieg dabei vom Einbauwassergehalt $w_e = 20\%$ um durchschnittlich 3 bis 4% an.

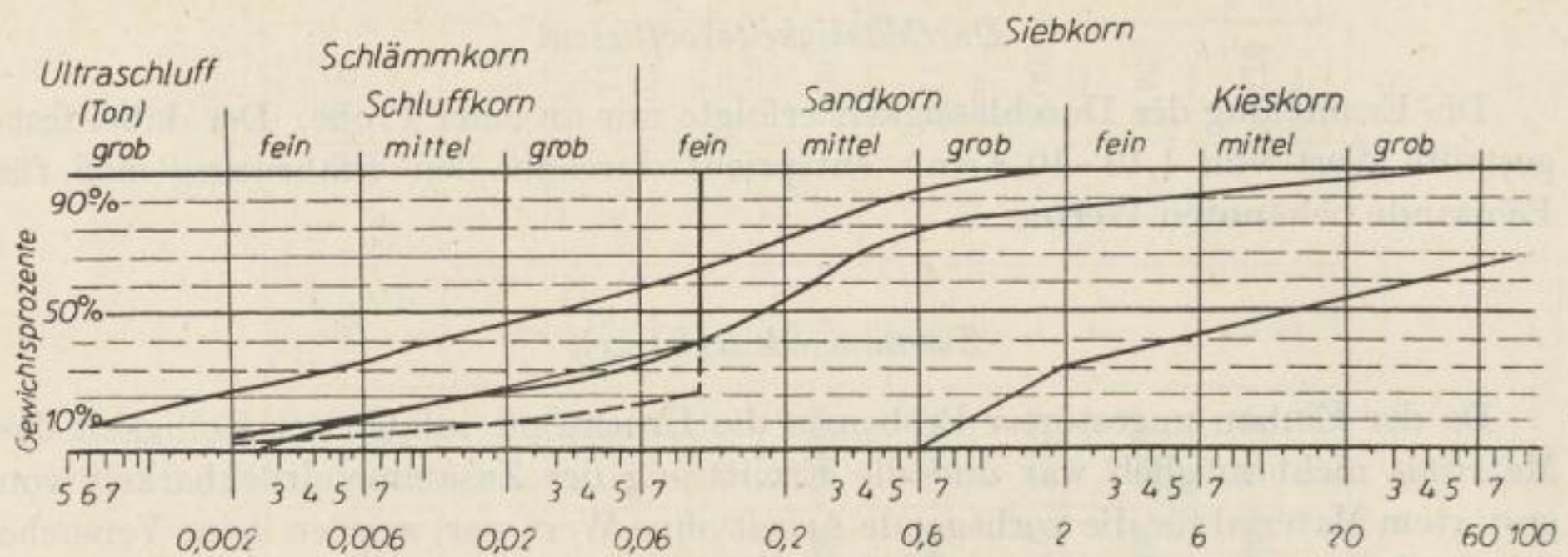
2.35

Geschiebemergel Altenburg

Kornverteilung

Die Kornverteilung des Altenburger Geschiebemergels schwankt zwischen 0 und 21% Ultraschluffkorn, 30 und 52% Schluffkorn, 34 und 56% Sandkorn sowie 1 und 14% Kieskorn (Bild 34a und b).

Daraus läßt sich eine mittlere Zusammensetzung von 10% Ultraschluffkorn, 40% Schluffkorn, 45% Sandkorn und 5% Kieskorn errechnen. Eine Aufgliederung in Einzelfractionen zeigt folgende Beteiligung der Reihe nach: Feinsand (19%), Mittelsand (19%), Grobschluff (14%), Mittelschluff (13%), Feinschluff (13%), Ul-

Bild 34a. Altenburg. Geschiebemergel (T_{0-21} Su_{30-52} S_{34-56} K_{1-14})

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

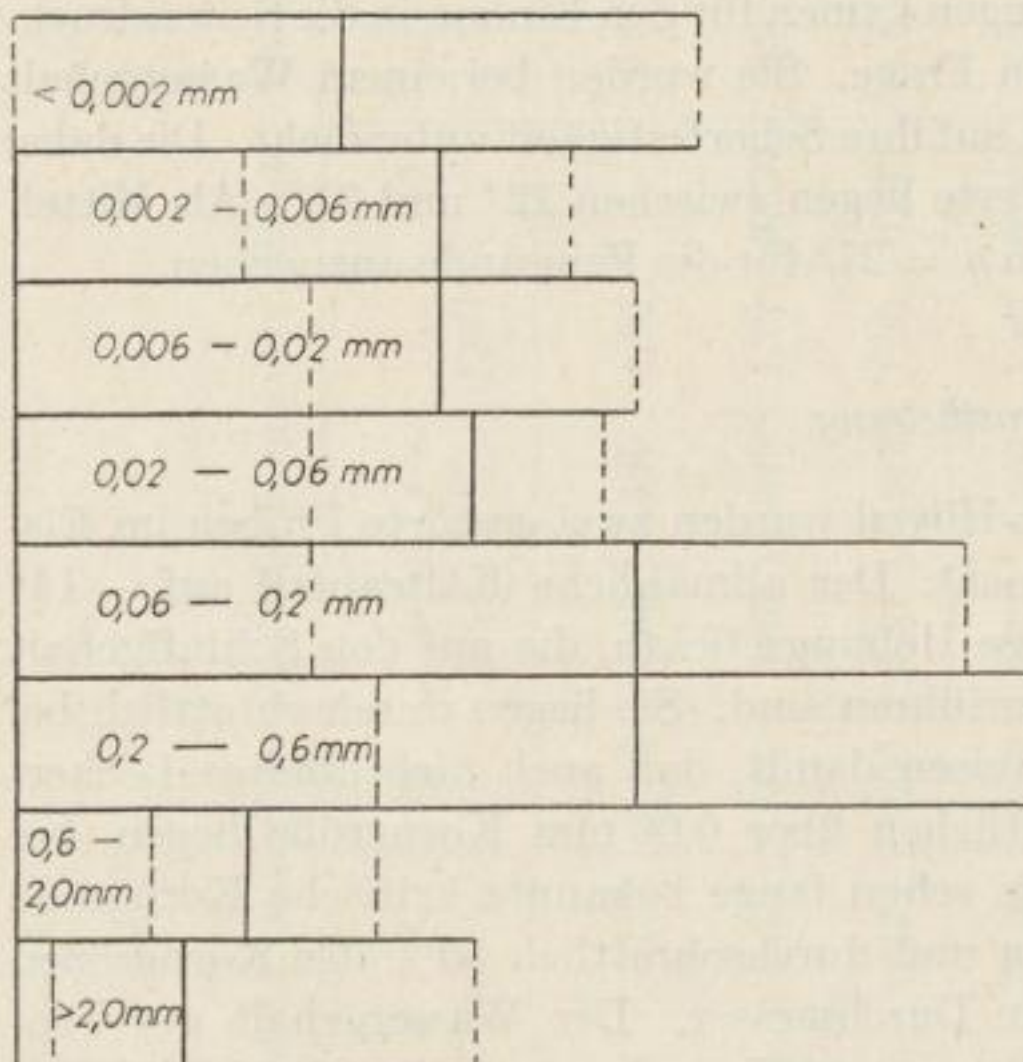


Bild 34b. Geschiebemergel Altenburg. Schwankungen der Kornfraktionen und mittlere Zusammensetzung

traschluffkorn (10%), Grobsand (7%), Fein- und Mittelkies (5%). Die Hälfte der Kornanteile des Altenburger Geschiebemergels liegt demnach im Bereich Grobschluff bis Mittelsand.

Der Ungleichförmigkeitsgrad zeigt gleichmäßige Werte, wenn man von zwei aus dem Rahmen fallenden Werten, die zur Probe IIb ($U = 187$) und VIb ($U = 118$) gehören, absieht. Der Mittelwert liegt dann ohne die genannten Proben bei $U = 52$. Unter Berücksichtigung aller ermittelten Werte ergibt sich bei Schwankungen zwischen 25 und 187 ein Mittel von $U = 63$. Die übrigen Kornkennwerte zeigen folgendes Bild: Der Sortierkoeffizient schwankt zwischen 3,22 und 9,34 und hat einen Mittelwert von $S_o = 5,72$, die Schiefe schwankt zwischen 0,35 und 1,06 und hat einen Mittelwert von $S_k = 0,62$.

Kalkgehalt und Glühverlust

Der mittlere Kalkgehalt wurde mit rund 11% ermittelt. Dabei treten Schwankungen zwischen 9 und 14% in Erscheinung.

Der vom Durchschnittsprobematerial bestimmte Glühverlust ergab die Werte 7,2%, 7,8% und 6,9%. Der daraus errechnete Mittelwert liegt bei 7,4% der Trockenprobe.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Das Feuchtraumgewicht liegt im Mittel bei $\gamma = 2,16 \text{ t/m}^3$. Daraus läßt sich ein mittleres Trockenraumgewicht von $\gamma_t = 1,91 \text{ t/m}^3$ errechnen. Das Porenvolumen des Mergels hat im Durchschnitt einen Wert von $n = 30$, daraus ergibt sich eine Porenziffer von $\varepsilon = 0,43$. Das Raumgewicht des Geschiebemergels kann bei völliger Wassersättigung höchstens bis auf $2,17 \text{ t/m}^3$ ansteigen.

Als spezifisches Gewicht des Mergels wurde $\gamma_s = 2,67 \text{ t/m}^3$ gefunden.

Die Berechnung des Feuchtigkeitsgehaltes ergab für den Mergel einen Wert von $f = 0,82$, prozentual vom Gesamtvolumen sind das rund 25%. Der Luftgehalt beträgt danach 5%.

Natürlicher Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit

Der natürliche Wassergehalt bei der Entnahme wurde für den Altenburger Geschiebemergel mit etwa 13% bestimmt. Die Schwankungen liegen zwischen 9 und 18%.

Die Fließgrenze der untersuchten Geschiebemergelproben liegt im Mittel bei einem Wassergehalt von 33%. Als Maximum wurde ein Wert von 46% ermittelt, als Minimum ein solcher von 17% Wassergehalt. Die Ausrollgrenze schwankt zwischen 13 und 19% Wassergehalt, was einem Durchschnitt von $w_a = 15\%$ entspricht. Die Bildsamkeit errechnet sich daraus zu etwa 18% bei Schwankungen zwischen $w_{fa} = 4$ und 30%. Nach diesen Werten liegt der Altenburger Geschiebemergel an der Grenze zu den starkbindigen Lockergesteinen. Nach der Plastizitätskarte gehört er zur Gruppe „Anorganische Tone mittlerer Plastizität (CI)“ (vgl. Bild 6 u. 39).

Die Berechnung der Zustandszahl k_v ergab für die untersuchten Proben einen Durchschnittswert von 1,09. Dieser Wert besagt, daß der Wassergehalt nahe der Ausrollgrenze und damit im halbfesten Bereich liegt. Nach DIN 1054 wäre danach eine zulässige Baugrundpressung von 2 kp/cm^2 festzulegen.

Die Aktivität nach SKEMPTON ergibt einen Wert, der mit $A = 1,8$ sehr hoch liegt und der Aktivität eines sog. ‚aktiven‘ Tones entspräche.

Breiwasserzahl, Einheitswasserzahl

Infolge Materialmangels war eine Bestimmung der OHDESchen Kennwerte nur an Durchschnittsprobematerial möglich. Dabei wurde w_0 mit 0,38 und w_1 mit 0,19 bestimmt. Die OHDEZahl hat danach eine Größe von 0,19. Die daraus errechnete Durchlässigkeit liegt bei $k = 5 \cdot 10^{-8}$ cm/s, der Reibungsbeiwert μ_0 bei 0,590 ($\varrho = 30,5^\circ$).

Maximale Wasseraufnahmefähigkeit

Die für die Altenburger Geschiebemergelproben ermittelten Enslinwerte liegen zwischen 52 und 112%. Als Durchschnittswert wurde $w_{max} = 91\%$ bestimmt. Dieser Wert charakterisiert den Mergel recht gut, da der überwiegende Teil aller festgestellten Werte in dieser Größenordnung liegt. Dieser Wert kommt nahe an das reine Tonmineral Kaolinit heran.

Zerfallsversuche

Die mit Probematerial von Geschiebemergel durchgeführten Zerfallsversuche zeigten folgendes Bild. Am schnellsten waren die Proben mit einem Wassergehalt von 15% — also nahe der Ausrollgrenze — zerfallen (40 bzw. 35 min.). Dann folgt die völlig trockene Probe mit einer Zerfallszeit von 105 Minuten. Die einen Wassergehalt von 20% enthaltende Probe benötigte bis zum völligen Zerfall eine Zeit zwischen 165 und 180 Minuten. Die Proben mit 25% Wassergehalt — also noch immer unter der Fließgrenze dieses Materials — zerfielen nach 255 bzw. 405 Minuten. Die nahe der Fließgrenze eingebaute Probe (30%) war auch nach 48 Stunden Wasserlagerung noch nicht völlig zerfallen. Auch hier zeigt sich wieder, daß das Material im Bereich der Fließgrenze bei Wasserüberflutung sich am stabilsten verhält (vgl. Bild 47).

Durchlässigkeitskoeffizient

An mehreren Proben vom Geschiebemergel Altenburg, die in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht erfaßt sind, wurden Durchlässigkeitsversuche im DD-Gerät durchgeführt. Bei 6 kp/cm² senkrechter Belastung wurden dabei Werte zwischen 3,4 und $8,5 \cdot 10^{-8}$ cm/s für den Durchlässigkeitskoeffizienten k ermittelt. Diese Werte sind auch für die im Untersuchungsprogramm erfaßten Proben als noch repräsentativ anzusehen.

Zusammendrückbarkeit

Ungestörtes Probematerial zum Einbau in die DD-Geräte stand nicht zur Verfügung.

Scherfestigkeit

Von elf der in der Arbeit untersuchten Geschiebemergelproben wurde im Seitendruckgerät im offenen System bei langsamer Lastaufbringung — also bei möglichem

Porenwasserausgleich — an ungestörtem Material die Scherfestigkeit bestimmt. Dabei wurden Reibungsbeiwerte zwischen $u = 0,365$ und $0,465$ — das entspricht Reibungswinkeln von $\varrho = 20$ bis 25° — festgestellt. Die Kohäsion liegt zwischen $c = 0,15$ und $1,05$ kp/cm^2 . Daraus lassen sich Mittelwerte für den Reibungswinkel von $\varrho = 22,4^\circ$ und für die Kohäsion von $c = 0,58$ kp/cm^2 errechnen (Bild 35). Die mit

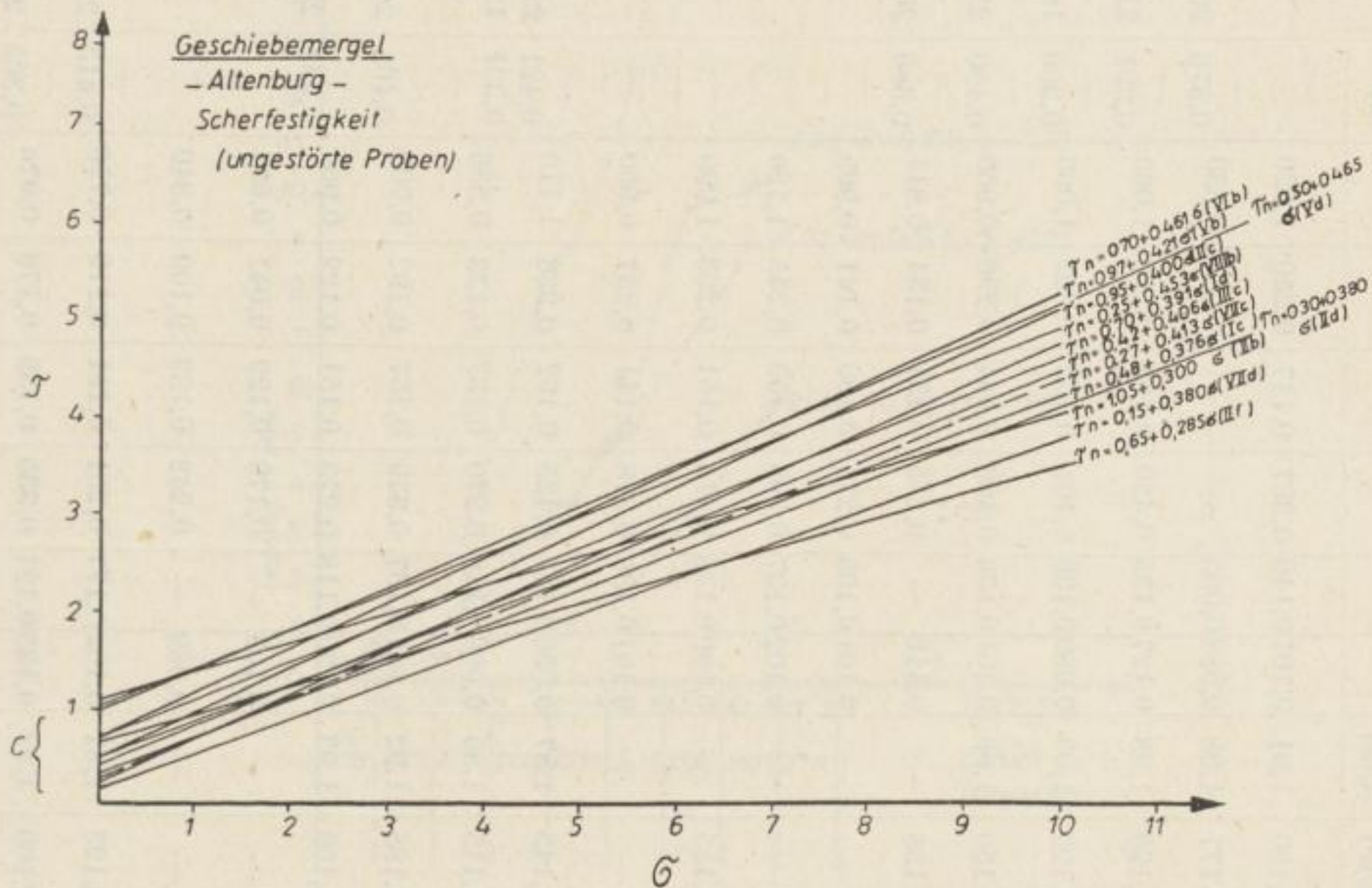


Bild 35. Geschiebemergel Altenburg — Scherfestigkeit (ungestörte Proben)

Durchschnittsprobematerial im gestörten Zustand durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Reibungswinkels im Bruchzustand ergaben übereinstimmende Werte. Als Reibungswinkel bei in Abhängigkeit vom lotrechten Druck und den Materialeigenschaften ansteigendem Seitendruck — also aus dem Verhältnis $\frac{\delta_v}{\delta_h}$ — wurden $21,3$ bzw. $22,5^\circ$ ermittelt. Die gleichen Proben bei abnehmendem Seitendruck bis zum Bruch belastet, ergaben Reibungswinkel von $\varrho = 25,6^\circ$ und $26,5^\circ$. Das bedeutet eine Steigerung von ca. 19% .

Schnellversuche bei verhindertem Porenwasserausgleich ergaben Resultate, die den Einfluß des unterschiedlichen Wassergehaltes gut zum Ausdruck bringen. Die Geschiebemergelprobe mit $14,6\%$ Wassergehalt zeigte einen Reibungswinkel von $\varrho = 9,5^\circ$ und eine Kohäsion von $c = 0,3$ kp/cm^2 . Bei $15,6\%$ Wassergehalt liegt der Reibungswinkel bei $6,5^\circ$, die Kohäsion bei $0,2$ kp/cm^2 , bei $19,5\%$ Wassergehalt bei $6,8^\circ$, die Kohäsion bei 0 . Die Probe im Bereich der Fließgrenze ($34,9\%$ Wassergehalt) hatte nur noch einen Reibungswinkel von $3,6^\circ$, die Kohäsion zeigte einen geringen Wert von $0,05$ kp/cm^2 (vgl. Bild 46).

Tabelle 5. Bodenphysikalische Kennwerte. Geschiebemergel Altenburg

Probe Nr.	Kornanteile				U	S ₀	S _k	γ _s (t/m ³)	γ (t/m ³)	γ _t (t/m ³)	CaO	w _n	w _f	w _a	w _{/a}	w _{max}	μ _e } tg ρ		e ₀ e _n	e _b	c (kp/cm ²)	w _E
	< 0,002 (%)	— 0,06 (%)	— 2,0 (%)	> 2,0 (%)													μ _n	μ _n				
Ib	11	46	41	2	42	5,64	0,65	2,70	2,180	1,91	0,101	0,140	0,397	0,147	0,250	1,026	—	—	—	—	—	—
Ic	—	33	55	12	50	3,58	0,62	2,69	2,177	1,98	0,088	0,093	—	—	—	0,830	0,376	20,6°	—	—	0,48	—
Id	8	52	34	6	25	5,48	0,88	2,68	2,190	1,93	0,127	0,135	0,420	0,162	0,258	1,060	0,391	21,3°	—	—	0,70	—
IIb	21	32	44	3	187	9,34	0,54	2,67	2,195	1,93	0,089	0,139	0,404	0,152	0,252	1,060	0,300	16,6°	—	—	1,05	—
IIc	16	43	37	4	59	6,36	0,52	2,65	2,150	1,86	0,101	0,156	0,460	0,164	0,296	0,960	0,400	21,8°	—	—	0,95	—
IId	8	32	46	14	88	6,45	0,35	2,67	2,135	—	0,116	—	0,285	0,151	0,134	0,811	0,380	20,8°	—	—	0,30	—
IIe	7	30	51	12	69	4,57	0,51	2,68	—	—	0,101	0,105	0,271	0,130	0,141	0,909	—	—	—	—	—	—
IIIb	14	44	40	2	61	6,47	0,57	2,69	—	—	0,102	0,137	0,398	0,153	0,245	1,120	—	—	—	—	—	—
IVc	14	45	40	1	51	5,84	0,59	2,66	2,155	—	0,090	0,138	0,414	0,161	0,253	1,090	—	—	—	—	—	—
IVd	12	46	40	2	41	6,00	0,74	2,68	—	—	0,101	0,135	0,378	0,141	0,237	0,950	—	—	—	—	—	—
Vb	10	49	38	3	33	6,26	1,06	2,68	2,145	1,87	0,096	0,143	0,425	0,192	0,233	1,110	0,421	22,8°	—	—	0,97	—
Vc	10	40	48	2	50	5,17	0,58	2,67	2,115	1,85	0,096	0,146	0,270	0,137	0,133	0,530	0,331	18,3°	—	—	—	—
Vd	12	39	45	4	69	6,75	0,49	2,70	2,185	1,92	0,127	0,137	0,349	0,157	0,192	0,900	0,465	24,9°	—	—	0,50	—
VIb	15	33	48	4	118	6,84	0,36	2,66	2,160	1,93	0,130	0,118	0,273	0,151	0,122	0,966	0,461	24,6°	—	—	0,70	—
VIc	6	33	56	5	41	3,22	0,58	2,68	—	—	0,102	—	0,170	0,129	0,041	0,697	—	—	—	—	—	—
VId	8	36	49	7	40	4,68	0,87	2,66	—	—	0,089	—	0,242	0,133	0,109	0,840	—	—	—	—	—	—
VIIc	8	40	47	5	42	4,66	0,53	2,68	2,125	1,81	0,102	0,177	0,251	0,141	0,110	0,776	0,413	22,4°	—	—	0,27	—
VIIId	12	43	39	6	65	6,21	0,85	2,69	2,160	1,92	0,133	0,121	0,335	0,159	0,176	0,926	0,365	20,0°	—	—	0,15	—
VIIIb	—	39	52	9	54	5,19	0,41	2,65	2,155	1,95	0,138	0,104	0,237	0,125	0,112	0,953	0,453	24,3°	—	—	0,25	—

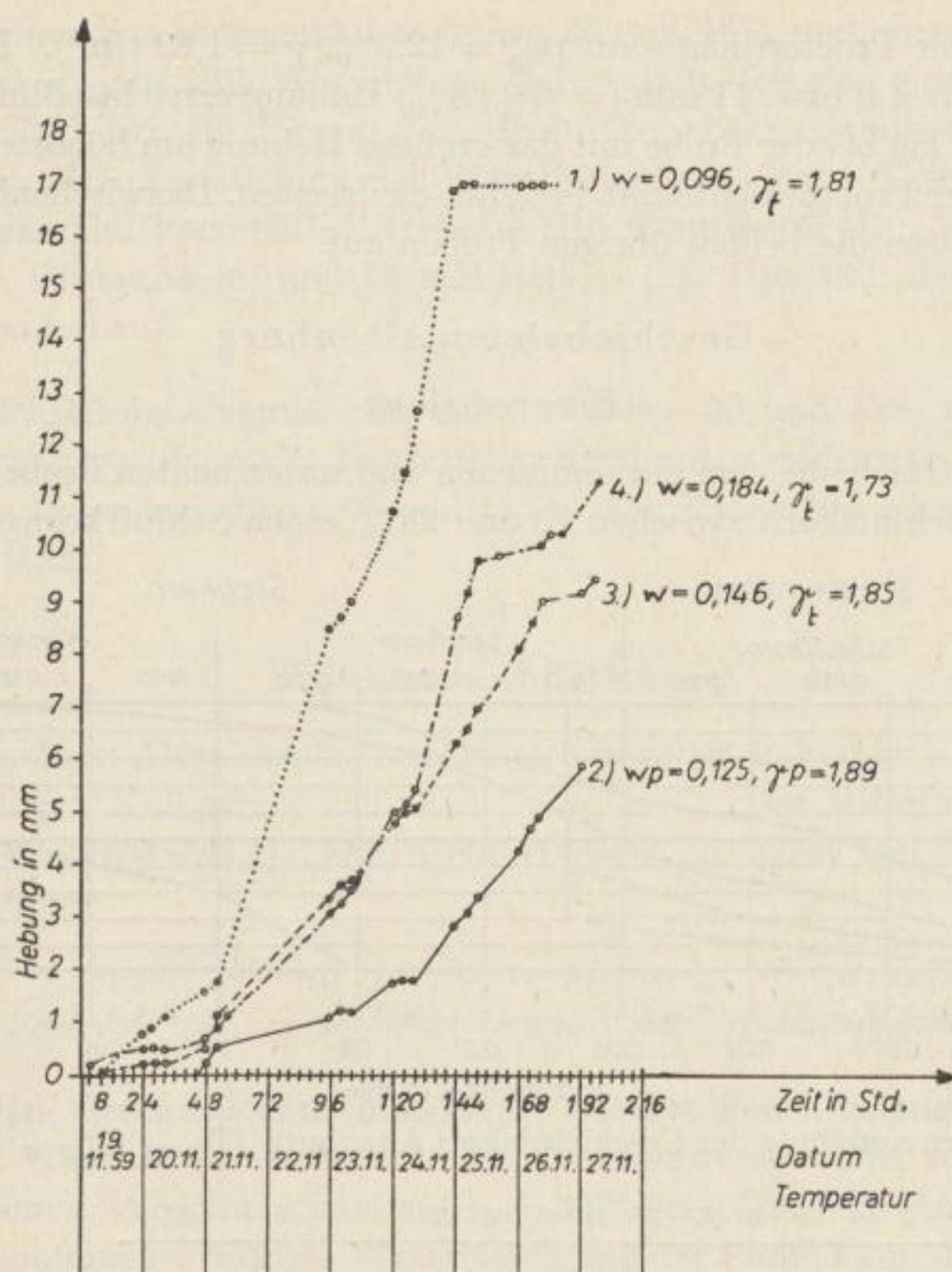


Bild 36. Geschiebemergel Altenburg — Ergebnis der Frosthebungsversuche

Proctordichte

Die Durchführung der Proctorversuche zur Ermittlung der optimalen Verdichtbarkeit des Altenburger Geschiebemergels erfolgte mit Wassergehalten von 9,6; 12,5; 14,6 und 18,4%. Dabei wurden Trockenraumgewichte von 1,81; 1,89; 1,85 und 1,73 t/m³ festgestellt. Die graphische Auftragung dieser Ergebnisse ergab als günstigsten Wassergehalt bei γ_p den Wert von $w_p = 12,5\%$ (vgl. Bild 52).

Frosthebung

Die zur Ermittlung der Proctordichte bei gleicher Verdichtungsarbeit und unterschiedlichem Wassergehalt hergestellten zylinderförmigen Proben vom Altenburger Geschiebemergel wurden im Frostschränk im offenen System innerhalb von acht Tagen stufenweise auf ca. -14°C abgekühlt. Dabei zeigte die Probe mit dem niedrigsten Wassergehalt von 9,6% ($\gamma = 1,81\text{ t/m}^3$) die größte Hebung von 17 mm (= 12% zur Ausgangsprobenhöhe), die geringste Hebung von 6 mm (= 4%) wies

die Probe mit der Proctordichte auf ($w_p = 12,5\%$, $\gamma = 1,89 \text{ t/m}^3$). Die beiden anderen Proben haben 9 bzw. 11 mm (= 6%, 8%) Hebung erreicht (Bild 36). Der Ausbauwassergehalt lag bei der Probe mit der größten Hebung am höchsten (20,2%), bei der Probe mit der Proctordichte mit 14% am niedrigsten. Dazwischenliegende Werte von ca. 18% weisen die beiden übrigen Proben auf.

2.36

Geschiebelehm Altenburg

Kornverteilung

Die aus dem Geschiebelehm entnommenen und untersuchten Proben weisen einen Gehalt an Ultraschluffkorn zwischen 10 und 28%, einen Schluffkorngehalt zwischen

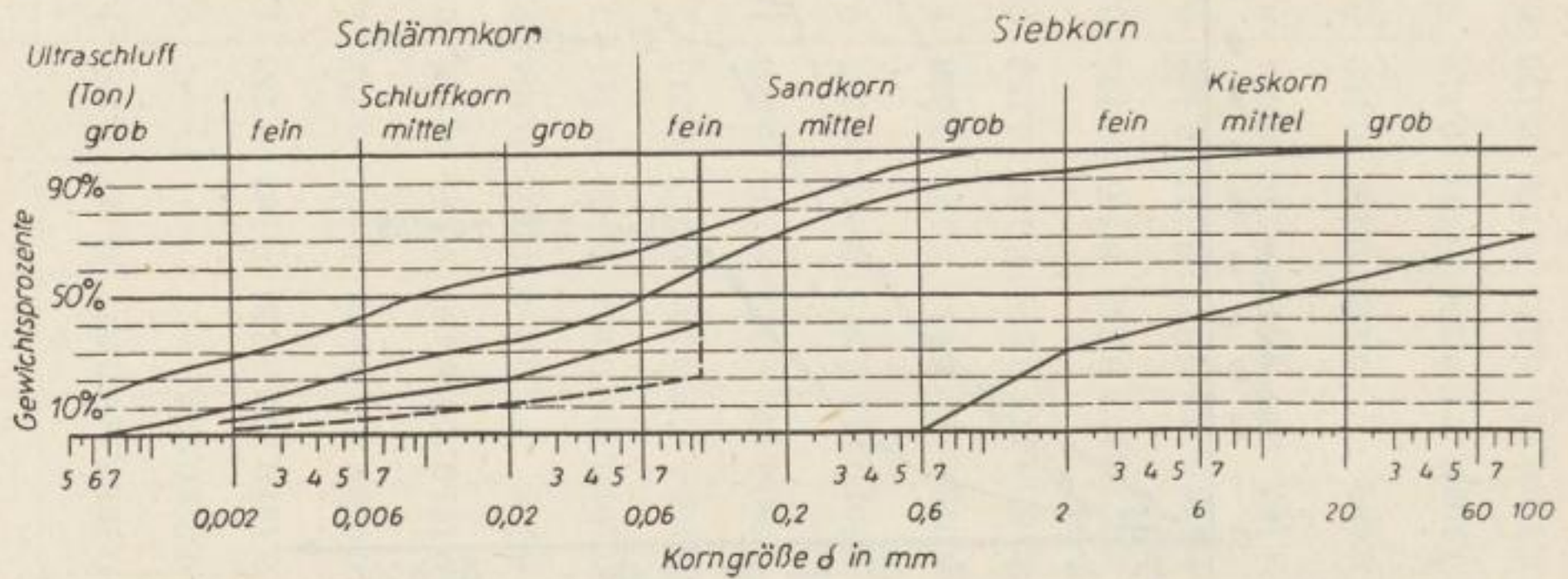


Bild 37a. Kornverteilung des Geschiebelehms Altenburg (T₁₀₋₂₈ Su₂₈₋₄₀ S₃₃₋₄₈ K₁₋₆)

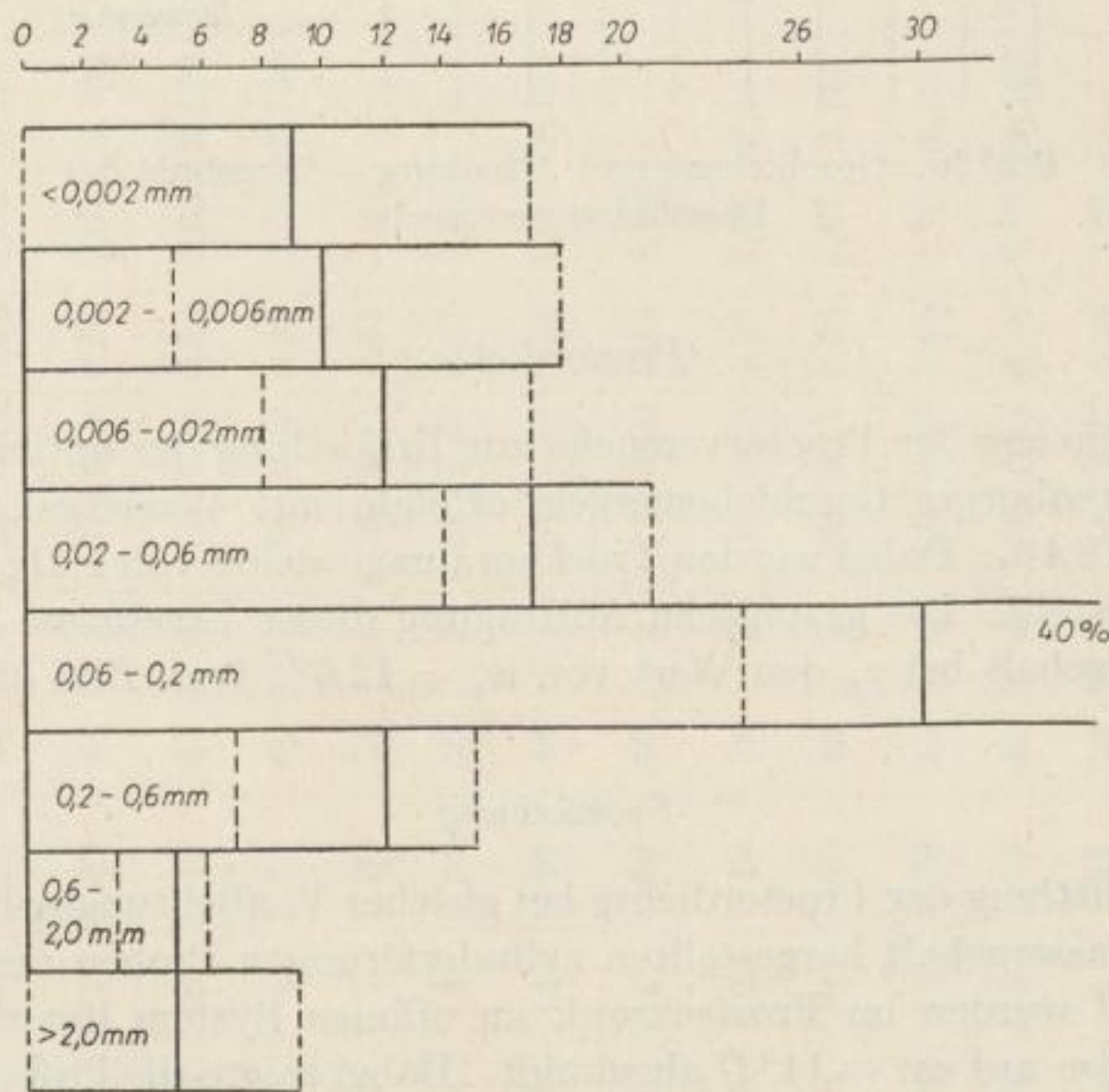


Bild 37b. Geschiebelehm Altenburg. Schwankungen der Kornfraktionen und mittlere Zusammensetzung

28 und 40%, einen Sandkorngehalt zwischen 33 und 48% und einen Kieskorngehalt zwischen 1 und 6% auf (Bild 37 a und b). Daraus läßt sich eine mittlere Zusammensetzung von 20% Ultraschluffkorn, 37% Schluffkorn, 41% Sandkorn und 2% Kieskorn errechnen. Die Feststellung der Einzelfraktionen ergibt folgendes Bild: Feinsand (20), Ultraschluffkorn (20), Mittelsand (16), Feinschluff (13), Mittel- und Grobschluff (je 12), Grobsand (5) und Fein/Mittelkies (2). Hier fällt der bemerkenswert hohe Tonkornanteil auf.

Der Ungleichförmigkeitsgrad schwankt zwischen 39 und 138; daraus errechnet sich ein Mittelwert von $U = 87$. Der mittlere Sortierungskoeffizient beträgt 7,69. Die Schwankungen liegen zwischen 6,05 und 11,99. Die Schiefe hat einen Mittelwert von 0,39 (0,23 bis 0,52).

Kalkgehalt und Glühverlust

Die untersuchten Altenburger Geschiebelehmproben haben im allgemeinen einen sehr gleichmäßigen Kalkgehalt zwischen 7 und 10%. Der Mittelwert beträgt 8%. Als Glühverlust wurde aus der Durchschnittsprobe ein Wert von 7,1% organischer Substanz bestimmt.

Raumgewicht, spezifisches Gewicht und Hohlraumgehalt

Das für den Geschiebelehm bestimmte mittlere Feuchtraumgewicht liegt bei $\gamma = 2,16 \text{ t/m}^3$. Daraus errechnet sich das Trockenraumgewicht zu $\gamma_t = 1,88 \text{ t/m}^3$. Das Porenvolumen wurde im Mittel mit $n = 30\%$ errechnet, die Porenziffer mit $\varepsilon = 0,43$. Bei angenommener völliger Wassersättigung der Poren kann das Raumgewicht des Geschiebelehmes im Durchschnitt auf maximal $2,18 \text{ t/m}^3$ ansteigen.

Als mittleres spezifisches Gewicht wurde $\gamma_s = 2,68 \text{ t/m}^3$ bestimmt.

Die Berechnung des Feuchtigkeitsgehaltes ergab für den Geschiebelehm einen Wert von $f = 0,90$, umgerechnet auf das Gesamtvolumen ergibt sich ein Wert von 27%. Der Luftgehalt hat danach eine Höhe von 3%.

Natürlicher Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit

Der mittlere Entnahmewassergehalt (natürlicher Wassergehalt) betrug beim Geschiebelehm 14%. Die Schwankungen liegen dabei in engen Grenzen zwischen 13 und 15%.

Als Wassergehalt an der Fließgrenze wurden für den Altenburger Geschiebelehm 40% bestimmt, dabei wurde als Minimalwert 32% und als Maximalwert 54% festgestellt. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze wurde niedrig bestimmt, und zwar zwischen 13 und 18% — im Mittel bei 15%. Daraus errechnet sich eine Bildsamkeit von $w_{fa} = 25\%$. Die Schwankungen liegen hier zwischen 19 und 35%. Damit steht auch der Geschiebelehm an der Grenze zwischen schwach- und starkbindigen Locker-

gesteinen. Bei Eintragung in die CASAGRANDESche Plastizitätskarte fällt er mitten in den Bereich „Anorganische Tone mittlerer Plastizität (CI)“ (vgl. Bild 6 u. 39).

Die Zustandszahl beträgt für dieses Lockergestein etwa 1, d. h., der natürliche Wassergehalt stimmt etwa mit der Ausrollgrenze überein. Entsprechend hoch liegt die zulässige Baugrundpressung mit 2 kp/cm^2 .

Die Aktivität nach SKEMPTON beträgt im Durchschnitt $A = 1,28$. Dieser Wert läge bei Ton im Grenzbereich zwischen ‚normal‘ und ‚aktiv‘.

Breiwasserzahl, Einheitswasserzahl

Die am Durchschnittsprobematerial vorgenommene Bestimmung der OHDESchen Wasserzahlen ergaben für w_0 einen Wert von 0,55 und für w_1 einen von 0,23. Die OHDEZahl $w_0 - w_1$ hat eine Größe von 0,32. Die errechnete Durchlässigkeit liegt bei $k = 2 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$, der Reibungsbeiwert μ_0 bei 0,490 ($\varrho = 26,2^\circ$).

Maximale Wasseraufnahmefähigkeit

Der Enslinwert schwankt zwischen 56 und 113%. Der daraus abgeleitete Mittelwert beträgt 96%. Dieser Wert charakterisiert nicht vollkommen den Geschiebelehm, da allein sechs von den untersuchten zehn Proben Werte über 100% erreichten. Der niedrigste Wert von 56% ist bei Vergleich mit den übrigen bodenphysikalischen Kennziffern jedenfalls als Versuchsfehler zu bezeichnen. Bei Wegfall dieses Wertes erhöht sich der Mittelwert auch auf 101%, was als Repräsentativwert anzusehen ist.

Zerfallsversuche

Mit dem Durchschnittsprobematerial vom Altenburger Geschiebelehm wurden bei 0, 15, 20, 25, 30 und 35% Wassergehalt Zerfallsversuche durchgeführt, die folgende Ergebnisse zeigten. Die trockenen Proben waren bereits nach 30 bzw. 35 Minuten zerfallen. Nach rund 190 Minuten folgten die Proben mit 16% Wassergehalt. Die Proben mit 30% Wassergehalt zerfielen nach 260 bzw. 285 Minuten. Die bei 25% Wassergehalt eingebauten Proben zeigten eine rückläufige Bewegung, indem sie schon nach 195 bzw. 230 Minuten zerfallen waren. Sowohl die Probe mit 30% als auch die mit 35% zeigten infolge ihres Wassergehaltes nahe der Fließgrenze einen außerordentlich langsamen Zerfall. Noch nach 48 Stunden war ein beträchtlicher Teil der Probe nicht zerfallen (vgl. Bild 47).

Durchlässigkeitskoeffizient

Die Versuche mit Geschiebelehm im DD-Gerät zeigten Werte zwischen $2,5 \cdot 10^{-7}$ und $1,9 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$. Diese Ergebnisse erscheinen im Hinblick auf die stark plastischen Eigenschaften des Materials recht niedrig. Die Berechnung nach OHDE ergab einen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k = 2 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$.

Zusammendrückbarkeit

Vom Geschiebelehm standen keine ungestörten Proben zur Durchführung von Versuchen im Druckgerät zur Verfügung.

Scherfestigkeit

An fünf der im Untersuchungsprogramm erfaßten Geschiebelehmproben waren Versuche im Seitendruckgerät zur Ermittlung der Scherfestigkeit durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Versuche an ungestörten Proben im offenen System und bei langsamer Belastung zeigten folgendes Bild. Es wurde ein Reibungsbeiwert zwischen $\mu = 0,215$ und $0,360$ — was einem Reibungswinkel von 12 bzw. 20° entspricht — festgestellt. Der Mittelwert beträgt danach $\varrho = 17^\circ$. Die dazugehörigen Kohäsionswerte liegen zwischen $0,30$ und $0,85$ kp/cm^2 , im Mittel bei $0,68$ kp/cm^2 (Bild 38).

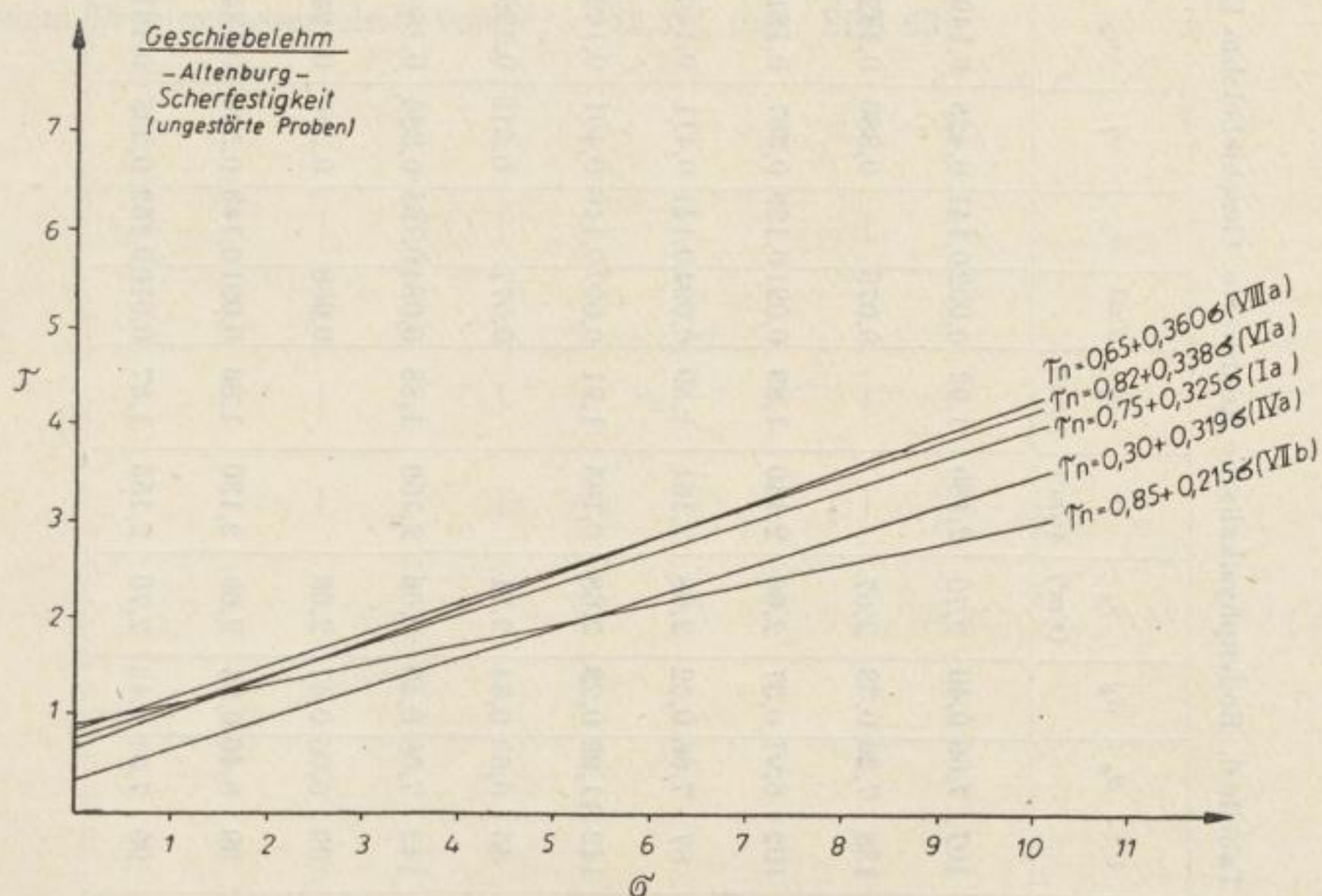


Bild 38. Geschiebelehm Altenburg. Scherfestigkeit (ungestörte Proben)

An gestörtem Durchschnittsprobematerial wurde der Reibungswinkel mit 15 bzw. 19° festgestellt. Die Fortführung dieser Versuche bis zum Bruch ergab Werte von 20 bzw. 22° . Das entspricht einer Steigerung um durchschnittlich 20% , was bei Standsicherheitsuntersuchungen mit zu berücksichtigen ist.

Schnellversuche im geschlossenen System zur Bestimmung der Scherfestigkeit bei Porenwasserüberdruck ergaben mit wechselnden Wassergehalten folgendes Bild. Die bei $14,5\%$ Wassergehalt eingebaute Probe ergab einen Reibungswinkel von 14°

Tabelle 6. Bodenphysikalische Kennwerte. Geschiebelehm (Altenburg)

Probe Nr.	Kornanteile				U	S_o	S_k	γ_s	γ	γ_t	CaO	w_n	w_f	w_a	w_{fa}	w_{max}	$\left. \begin{matrix} \mu_o \\ \mu_n \end{matrix} \right\} \text{tg } \varrho$	$\frac{e_o}{e_n}$	e_b	e	w_E
	< 0,002 (%)	— 0,06 (%)	— 2,0 (%)	> 2,0 (%)																	
Ia	19	38	40	3	107	7,66	0,40	2,70	2,180	1,92	0,092	0,141	0,423	0,149	0,274	1,036	—	—	—	—	—
IIa	20	34	40	6	138	7,26	0,38	2,67	—	—	0,079	—	0,386	0,142	0,244	1,127	—	—	—	—	—
IIIa	19	36	43	2	102	6,97	0,37	2,66	2,140	1,89	0,091	0,129	0,387	0,161	0,226	1,107	—	—	—	—	—
IVa	18	40	40	2	87	7,66	0,52	2,68	2,161	1,89	0,094	0,141	0,411	0,146	0,265	0,560	0,319	17,6°	—	0,30	—
IVb	28	27	44	1	142	11,99	0,23	2,68	2,185	1,91	0,097	0,146	0,401	0,166	0,235	1,006	—	—	—	—	—
Va	10	40	48	2	45	5,69	0,34	2,71	—	—	0,077	—	0,319	0,126	0,193	0,927	—	—	—	—	—
VIa	20	37	41	2	142	7,68	0,49	2,66	2,150	1,86	0,084	0,154	0,386	0,160	0,226	0,773	0,338	18,6°	—	0,82	—
VIIa	18	40	41	1	69	6,05	0,47	2,66	—	—	0,069	—	0,350	0,124	0,226	1,063	—	—	—	—	—
VIIb	28	38	33	1	39	8,40	0,25	2,69	2,130	1,86	0,091	0,149	0,536	0,184	0,352	1,126	0,215	21,1°	—	0,85	—
VIIIa	19	38	39	4	96	7,51	0,42	2,70	2,155	1,87	0,016	0,152	0,335	0,137	0,198	0,846	0,360	19,7°	—	0,65	—

und eine Kohäsion von $0,25 \text{ kp/cm}^2$, die Probe mit $18,4\%$ Wassergehalt einen Reibungswinkel von $8,8^\circ$ und eine Kohäsion von $0,1 \text{ kp/cm}^2$. Bei $20,8\%$ Wassergehalt sinkt der Reibungswinkel weiter auf $5,5^\circ$, während die Kohäsion einen kleinen Anstieg auf $0,2 \text{ kp/cm}^2$ zeigt. Der beträchtlich über der Fließgrenze liegende Wassergehalt von 25% ergab immer noch einen Reibungswinkel von $2,9^\circ$, die Kohäsion ist dabei auf 0 abgesunken (vgl. Bild 46).

Proctordichte

Durchschnittsprobematerial des Geschiebelehmes wurde bei $8,2$; $9,8$; $13,3$; $14,6$ und $17,6\%$ Wassergehalt in den Proctortopf eingebaut und der genormten Verdichtungsarbeit unterzogen. Diesen Wassergehalten entsprechen die folgenden Trockenraumgewichte: $1,62$; $1,80$; $1,88$; $1,81$ und $1,77 \text{ t/m}^3$. Die Auftragung der Proctorkurve und Feststellung des Maximums ergab für γ_p einen Wert von $1,88 \text{ t/m}^3$ bei einem Proctorwassergehalt von $w_p = 13,3\%$ (vgl. Bild 52).

3 ANWENDUNG DER BODENPHYSIKALISCHEN ERKENNTNISSE AUF DIE GEOLOGISCHE UND INGENIEURGEOLOGISCHE PRAXIS

Die im Kapitel 2 dargestellten Ergebnisse der petrographischen, mineralchemischen und bodenphysikalischen Untersuchungen der verschiedenen glazigenen und fluvioglazigen Lockergesteine bilden die Grundlage für die Bearbeitung einer Reihe praktischer Probleme der Geologie und Ingenieurgeologie in den folgenden Abschnitten.

3.1 Die bodenphysikalischen und mineralchemischen Zusammenhänge und Unterschiede der untersuchten Lockergesteine

In diesem Abschnitt werden die sich aus der graphischen Gegenüberstellung der Kennwerte untereinander ergebenden praktischen Folgerungen diskutiert und außerdem die bodenphysikalischen Eigenschaften der verschiedenen untersuchten Lockergesteine miteinander verglichen. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf den chemisch-mineralogischen Aufbau der Sedimente ziehen.

3.11 Abhängigkeit der Kennwerte untereinander

Die zu den verschiedenen Lockergesteinstypen gehörenden Einzelwerte werden in den Diagrammen durch folgende Zeichen kenntlich gemacht:

Geschiebemergel Klütz	×	Geschiebemergel Altenburg	+
Geschiebelehm Klütz	⊗	Geschiebelehm Altenburg	⊕
Schluffe Klütz	⊙		
Sande Klütz	·		

Grundsätzlich ist zu bemerken, daß der hohe Gehalt an Quarz, Feldspat und Kalkspat dieser Mischlockergesteine die im wesentlichen auf den Tonmineralanteil zurückzuführenden Zusammenhänge zwischen zwei Kennwerten stark beeinflußt, womit die z. T. erheblichen Streuungen erklärt werden können.

Bildsamkeit — Fließgrenze

Durch Gegenüberstellung der Werte der Bildsamkeit und Fließgrenze in Form der sogenannten „Plastizitätskarte“ — wie es erstmals von CASAGRANDE durchgeführt wurde — läßt sich eine Einordnung der verschiedenen bindigen Lockergesteine erreichen. Für die untersuchten Geschiebemergel, Geschiebelehme und Schluffe ergibt sich danach folgendes Bild (Bild 39).

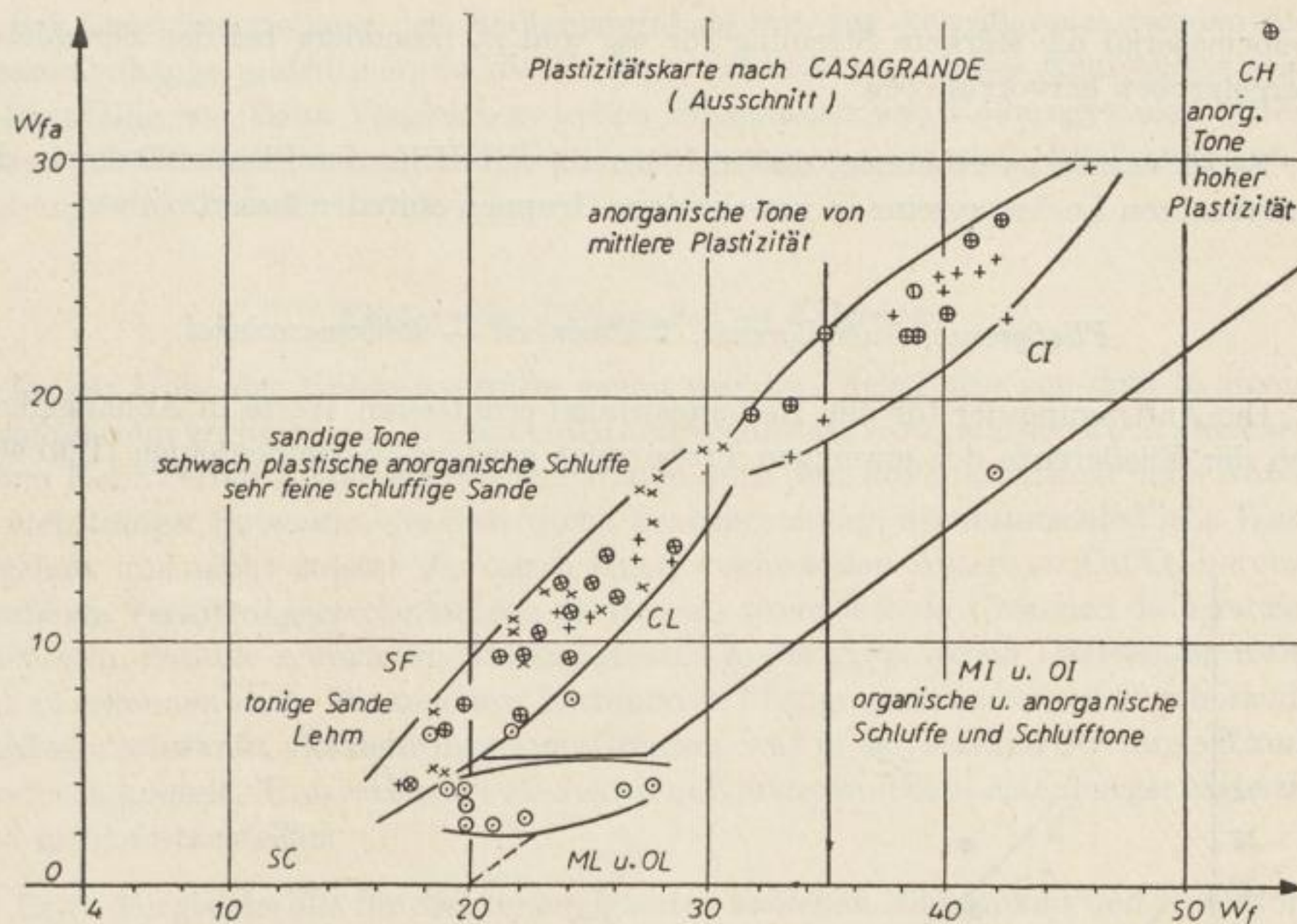


Bild 39. Plastizitätskarte (Ausschnitt) mit
eingetragenen Werten

Die Klützer Schluffe nehmen einen Bereich in der Grenzzone zwischen den Gruppen „leichtplastische Mehlsande (ML)“ und „tonig-schluffige Sande (SC)“ ein. Nur Probe 13b fällt völlig aus diesem Rahmen und ist in die Gruppe „Anorganische Tone mittlerer Plastizität (CI)“ einzuordnen.

Die Klützer Geschiebemergel und -lehme lassen sich in dieser Darstellung nicht voneinander trennen. Sie nehmen einen schmalen, langgestreckten Bereich zwischen den Gruppen „tonig-schluffige Sande (SC)“ und „sandige Tone, schwach plastische anorganische Schluffe, sehr feine schluffige Sande (CL)“ ein. Während die Geschiebelehmproben vor allem in den mittleren Teil dieses Bereiches einzuordnen sind, sind die Geschiebemergelproben besonders in den Randzonen vorhanden. Diese Tatsache beleuchtet die etwas größeren Unterschiede im Verhalten des aus verschiedenen Tiefen entnommenen Geschiebemergels. Auch die Altenburger Geschiebemergel und -lehme lassen sich nicht auf diese Weise auseinanderhalten. Sie treten in einem ebenfalls schmalen und langgestrecktem Bereich innerhalb der Gruppe „Anorganische Tone mittlerer Plastizität (CI)“ auf und lassen sich dadurch gut von dem gleichen Lockergesteinstyp von Klützer-Höved trennen. Nur einige Geschiebemergelproben fallen in die Gruppe SC und CL und entsprechen damit dem Klützer Material. Der Geschiebelehm VII b weicht von dem üblichen ab. Er ist zur Gruppe „Anorganische Tone hoher Plastizität (CH)“ zu rechnen. Zusammenfassend ist auch für dieses

Probematerial die stärkere Streuung für w_{fa} und w_f besonders bei den Geschiebemergelproben hervorzuheben.

Es ist daraus zu erkennen, daß sich bereits mit Hilfe der Plastizitätskarte die untersuchten Lockergesteine in verschiedene Gruppen einteilen lassen.

Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit — Reibungswinkel

Die Auftragung der für den Reibungswinkel ermittelten Werte in Abhängigkeit von der Fließgrenze der jeweiligen Probe zeigt gewisse Zusammenhänge (Bild 40).

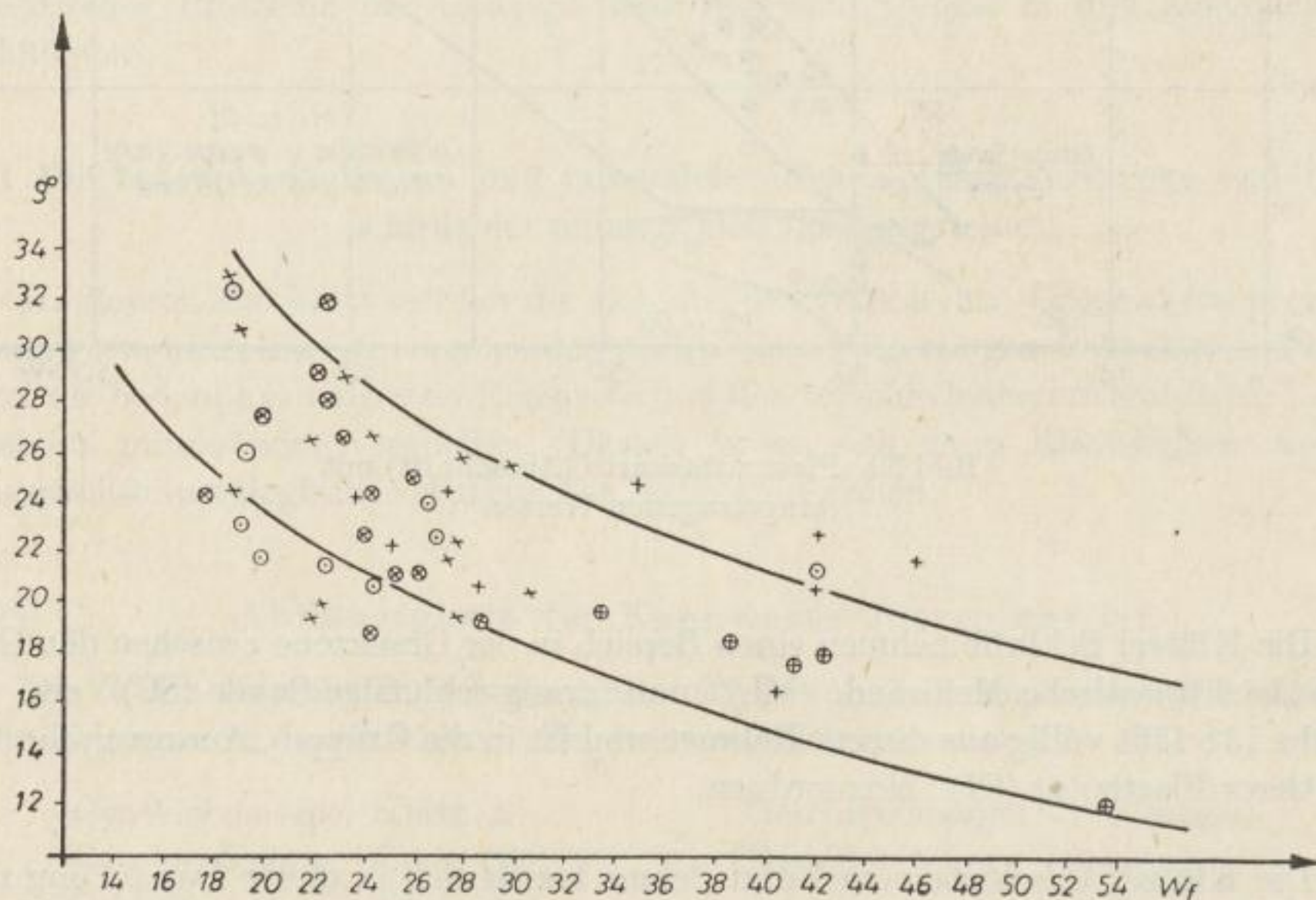


Bild 40. Beziehungen zwischen Fließgrenze und Reibungswinkel

Es läßt sich zweifellos die Tendenz des zunehmenden Reibungswinkels mit abnehmender Höhe der Fließgrenze feststellen. Diese Erkenntnis entspricht der Tatsache, daß der sich auf die Höhe der Fließgrenze auswirkende Tonmineralanteil auch die Reibungsfestigkeit herabsetzen muß.

Die bereits angedeuteten Unterschiede zwischen dem Klützer und Altenburger Material hinsichtlich der Wasserwerte gestatten es, im großen und ganzen zwei Bereiche abzugrenzen. In den einen sind im wesentlichen die Klützer Proben mit niedriger Fließgrenze und etwas höherem Reibungswinkel, in den anderen die Altenburger Proben mit höherer Fließgrenze und etwas abfallender Reibungsfestigkeit einzuordnen.

Bei Gegenüberstellung des Reibungswinkels mit der Ausrollgrenze werden die Zusammenhänge undeutlich, da die Versuchsdurchführung dieses Kennwertes sehr fehleranfällig ist. Beim Vergleich zwischen Bildsamkeit und Reibungswinkel treten jedoch die Zusammenhänge und Tendenzen genau wie zwischen Fließgrenze und Reibungswinkel wieder hervor.

Fließgrenze, Bildsamkeit — Kohäsion

Da die Höhe der Kohäsionskräfte genau wie die Fließgrenze von dem in einem Lockergestein vorhandenen Tonmineralanteil beeinflusst wird, müßten auch zwischen diesen Kennwerten Abhängigkeiten zu finden sein. Der außerordentlich hohe Anteil an nichttoniger Substanz, die eiszeitliche Beanspruchung, der unterschiedliche Wassergehalt und nicht zuletzt die durch einen wechselnden Anteil an CaCO_3 hervorgerufenen Verkittungserscheinungen dürften als wesentlichste Ursachen dafür anzusehen sein, daß die erwarteten Abhängigkeiten in der graphischen Darstellung nicht klar zu erkennen sind. Die zu einem bestimmten Fließgrenzenwassergehalt gehörende Kohäsion schwankt vielmehr in weiten Grenzen, was in den starken Streuungen zum Ausdruck kommt. Unterschiede zwischen dem Klützer und dem Altenburger Material sind nicht festzustellen.

Etwa das gleiche gilt für die Abhängigkeiten zwischen Bildsamkeit und Kohäsion, allerdings ist bei dieser Darstellung eine gewisse Tendenz zwischen ansteigender Kohäsion und gleichzeitig ansteigender Bildsamkeit für das Altenburger Material zu erkennen, während die Klützer Werte ebenfalls stark streuen.

Fließgrenze, Bildsamkeit — Kalkgehalt

Durch die Gegenüberstellung dieser wichtigen Wasserwerte mit dem Kalkgehalt werden die Proben beider Untersuchungsgebiete deutlich in zwei sich unterscheidende Bereiche eingeordnet. Der Bereich mit niedrigen Wasserwerten, aber hohen Kalkgehalten gilt für alle Lockergesteine vom Klütz-Höved, während der mit hohen Wasserwerten und niedrigen Kalkgehalten die Altenburger Lockergesteine umfaßt. Die Frage der Ionenbelegung, wie sie von BENDEL [17] angesprochen wird, dürfte davon jedoch nicht berührt werden, da der nach SCHEIBLER bestimmte Kalkgehalt reiner Karbonatkalkgehalt ist (CaCO_3). Die durch Sickerwässer in Lösung überführten Ca^{++} Ionen können sich zwar gegebenenfalls an den Oberflächen der vorhandenen Tonminerale anlagern, damit aber keine Änderung in der Wasserbindfähigkeit hervorrufen. Derartige Veränderungen ließen sich nur durch einen späteren Ionenaustausch der zweiwertigen Ionen gegen einwertige Ionen ermöglichen, was im vorliegenden Falle aber als nicht möglich erscheint.

Fließgrenze — Kornanteil $<0,002$ mm und $<0,06$ mm

Aus dieser Gegenüberstellung, die einen Schluß auf die Verteilung des die Wasseraffinität bestimmenden Tonmineralanteiles zuläßt, lassen sich interessante Zusam-

menhänge erkennen. Die Klützer Geschiebemergel und -lehmproben zeigen ein etwa gleichmäßiges Ansteigen der für die Fließgrenze ermittelten Wassergehalte mit Zunahme des Ultraschluffkornanteiles ($< 0,002$ mm). Diese Beziehung ist bei den Altenburger Proben nicht vorhanden (Bild 41).

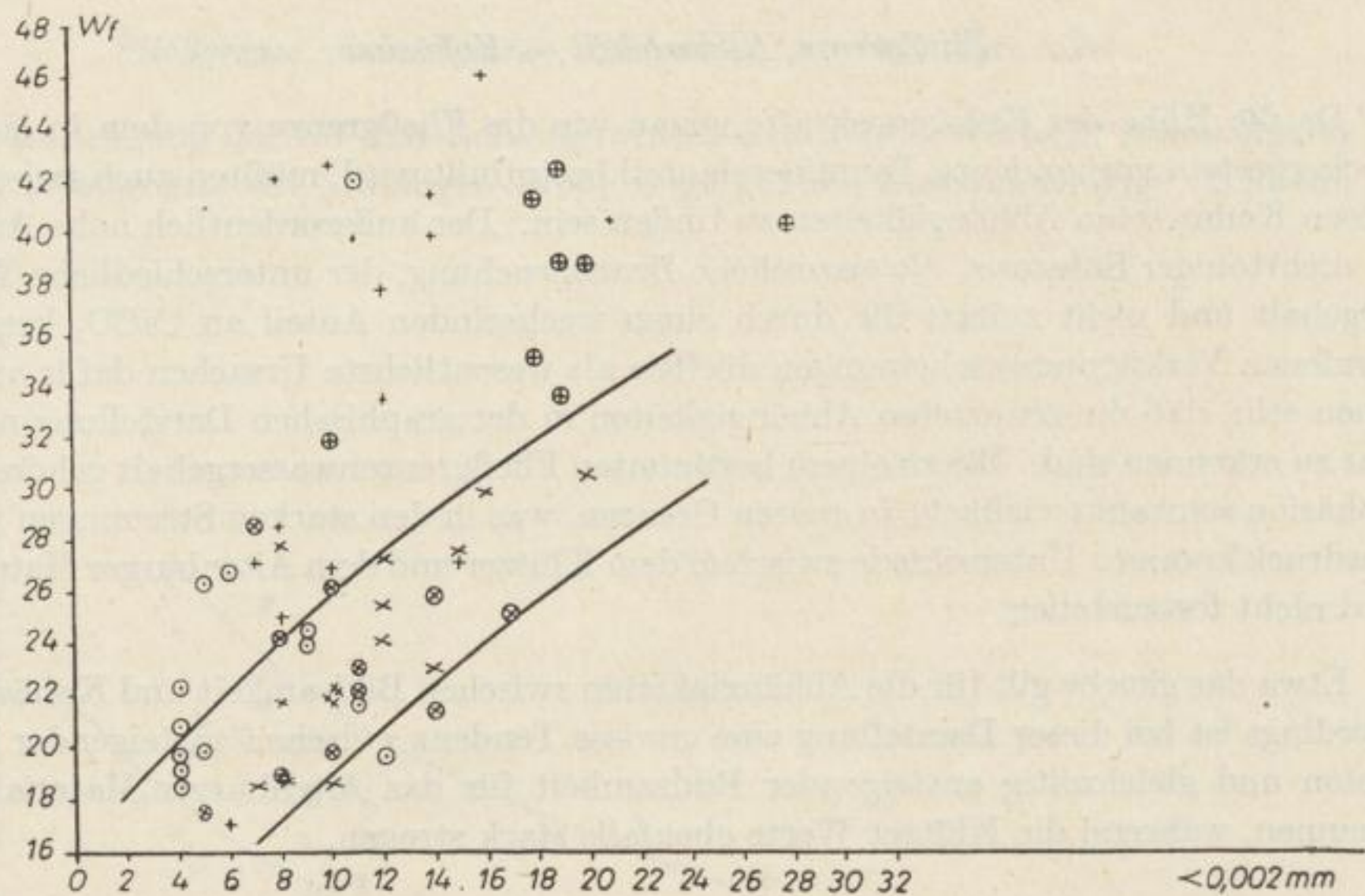


Bild 41. Beziehungen zwischen Fließgrenze und Kornanteil $< 0,002$ mm

Beim Vergleich zwischen Fließgrenze und Kornanteil der Proben $< 0,06$ mm zeigt sich dagegen eine befriedigende Abhängigkeit bei den Altenburger Lockergesteinen, während hier die Klützer Proben stark streuen (Bild 42).

Die vom Klütz-Höved entnommenen Schluffproben zeigen ebenfalls bei ansteigendem Gehalt an Körnungen $< 0,06$ mm eine gewisse Tendenz der Zunahme des Wassergehaltes an der Fließgrenze. Das deutet ebenfalls daraufhin, daß in diesem Lockergesteinstyp die Tonmineralen sowohl im Ultraschluff- als auch Schluffkornbereich gleichmäßig verteilt vorkommen. Entsprechend der relativ niedrigen Fließgrenze kann man indessen beim Schluff auf einen kleineren Anteil an Tonmineralen schließen als in den Geschiebemergel- und -lehmproben.

Bildsamkeit — Kornanteil $< 0,002$ mm und $< 0,06$ mm

Beim Vergleich zwischen diesen Werten lassen sich erwartungsgemäß die gleichen Tendenzen ablesen wie sie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben wurden.

Außerdem soll hier jedoch untersucht werden, inwieweit die von SKEMPTON für Tone gefundenen Abhängigkeiten zwischen der Bildsamkeit und dem Kornanteil $< 0,002$ mm (Aktivitätszahl) auch für die untersuchten pleistozänen Lockergesteine Geltung haben. Grundsätzlich ist dabei festzustellen, daß sich die Werte für Ge-

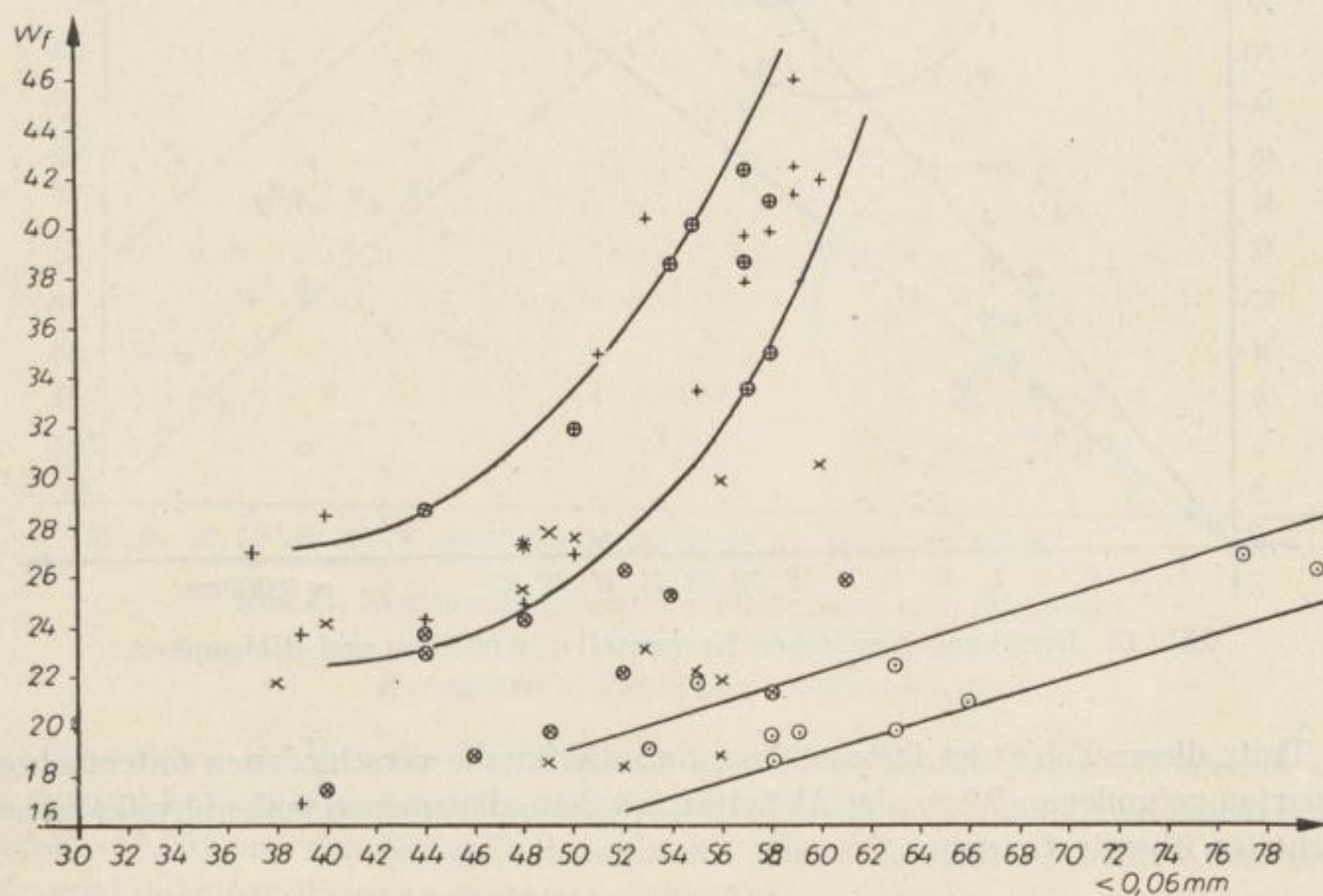


Bild 42. Beziehungen zwischen Fließgrenze und Kornanteil $< 0,06$ mm

schiebemergel usw. ebenso wie die für Tone in großen Zügen um die 45° -Linie, d. h. die Linie mit $A = 1$, gruppieren. Es ist also eine etwa geradlinige Abhängigkeit festzustellen. Dabei ordnen sich Geschiebemergel und -lehme ziemlich nahe am Ursprung des Achsenkreuzes, während Tone, entsprechend ihres höheren Anteiles von Feinstkorn und ihrer höheren Fließgrenze, weiter davon entfernt liegen. Interessant ist dabei, daß sich bei dieser Gegenüberstellung die untersuchten Lockergesteine wiederum in drei Gruppen aufteilen lassen. Die Klützer Schluffe liegen sehr nahe am Ursprung und haben eine Aktivität von $A < 0,75$. Daran schließen die Klützer Geschiebemergel und -lehme mit Werten für die Aktivität zwischen $A = 0,75$ bis $1,25$. Nur wenige Proben überschreiten diese angegebenen Grenzen. Die höchsten Werte der Aktivität erreichen die Altenburger Lockergesteine mit $A = 1,25$ bis $2,5$ und größtem Abstand vom Ursprung (Bild 43). Die Ursache dafür ist darin zu suchen, daß diese Erdarten auch im Kornanteil $> 0,002$ mm Durchmesser einen bemerkenswerten Tonmineralanteil führen, der bei der Feststellung der Aktivität nach SKEMPTON nicht mit berücksichtigt wird. Ähnlich verhält es sich bei den Schluffen Klütz, deren Aktivität ebenfalls niedriger liegen wird.

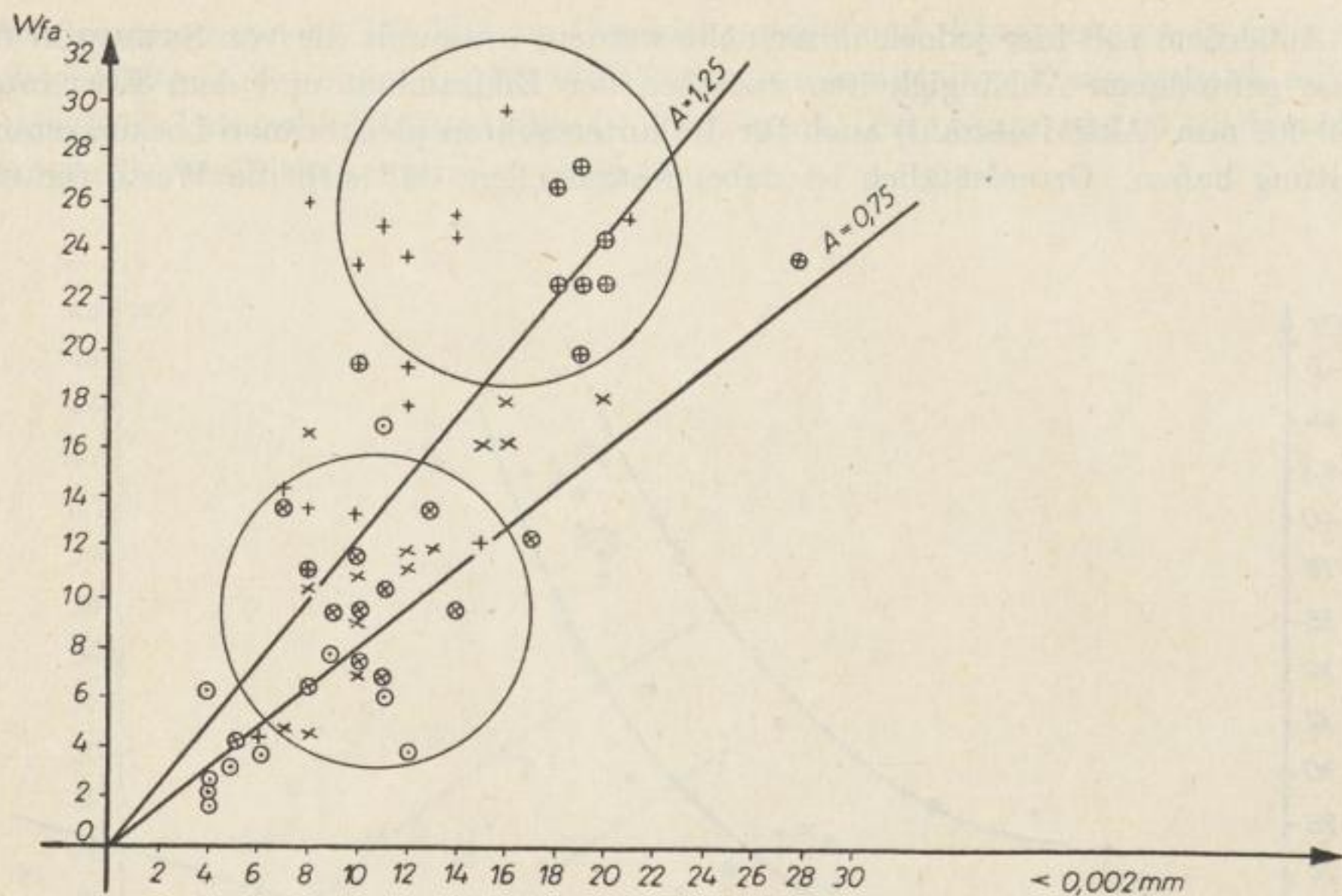


Bild 43. Beziehungen zwischen Kornanteil $< 0,002\text{ mm}$ und Bildsamkeit

Trotz dieser Fehler ist festzustellen, daß die für die verschiedenen untersuchten Erdarten gefundenen Werte der Aktivität mit dem allgemeinen bodenphysikalischen Verhalten übereinstimmen.

Fließgrenze, Bildsamkeit — Enslinwert

Da sowohl die maximale Wasseraufnahmefähigkeit als auch die Fließgrenze, Ausrollgrenze und Bildsamkeit vom Tonmineralgehalt beeinflusst werden, müssen zwischen diesen Kennwerten direkte Abhängigkeiten bestehen. Selbst wenn man berücksichtigt, daß die Ermittlung des Enslinwertes starken Fehlereinflüssen unterliegt, so ist die bei der Auftragung und Gegenüberstellung zu verzeichnende Tendenz der gleichmäßigen Zunahme von Fließgrenze und Bildsamkeit bei ansteigendem maximalem Wasseraufnahmevermögen gut zu erkennen (Bild 44).

Somit läßt sich auch hier die schon mehrfach erwähnte Dreigliederung in der Zunahme der Bindigkeit gut erkennen.

Fließgrenze, Bildsamkeit — OHDEzahl

Eine Gegenüberstellung von Fließgrenze und Bildsamkeit mit der hier als OHDEzahl bezeichneten Differenz $w_0 - w_1$ zeigt ebenfalls die zu erwartende Abhängigkeit. Beide Wasserwerte werden in gleicher Weise vom Tonmineralgehalt beeinflusst. Diese Tendenz ist trotz der versuchsmäßig bedingten Streuungen der Werte gut erkennbar.

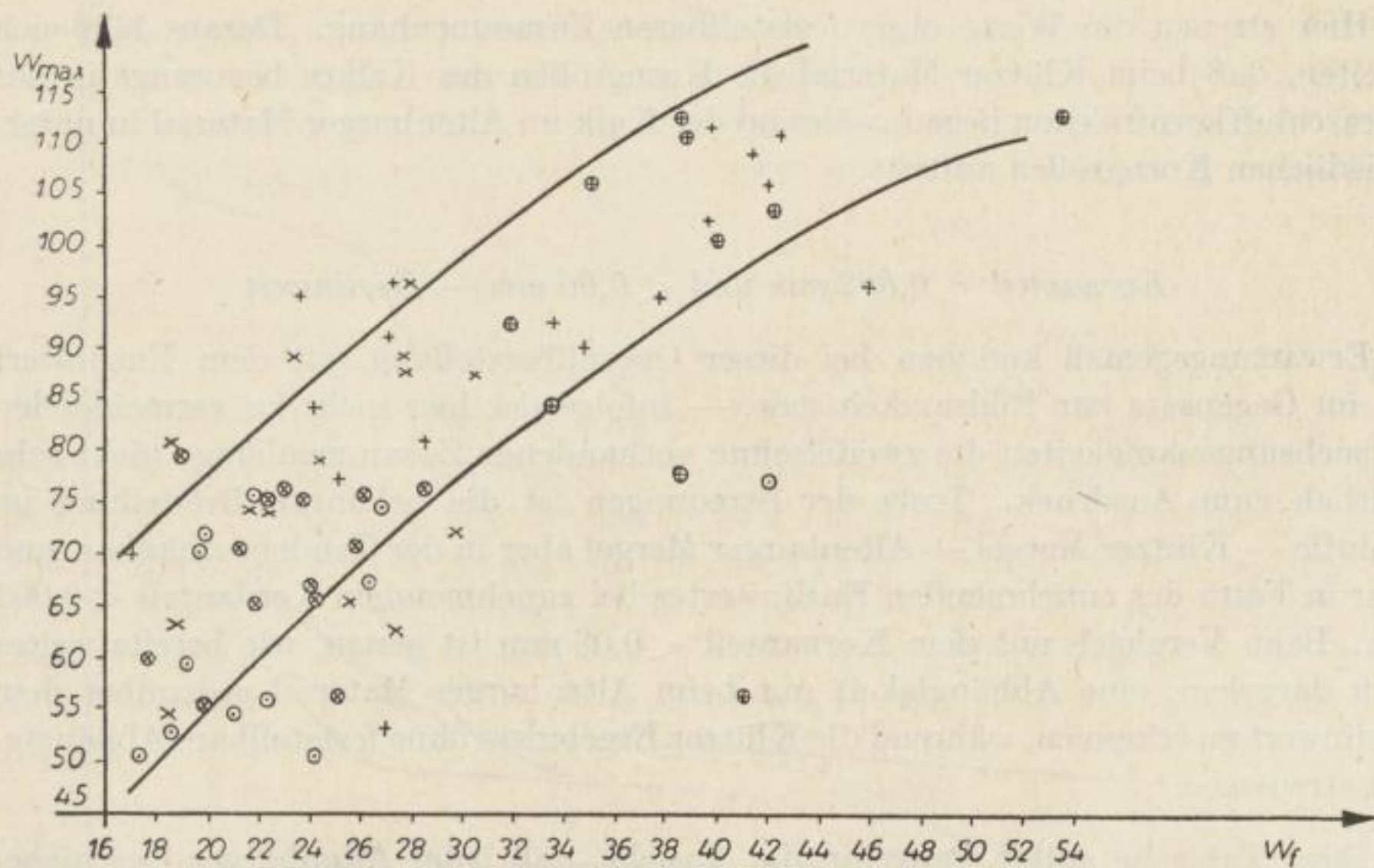


Bild 44. Beziehungen zwischen Fließgrenze und Enslinwert

Kornanteil <0,002 mm — Kalkgehalt

Interessant ist hier die Feststellung, daß beim Klützer Geschiebemergel und -lehm und bedingt auch bei den untersuchten Schluffproben mit zunehmendem Kornanteil <0,002 mm der Kalkgehalt zunimmt. Diese Tendenz ist beim Altenburger Material in keiner Weise zu erkennen (Bild 45).

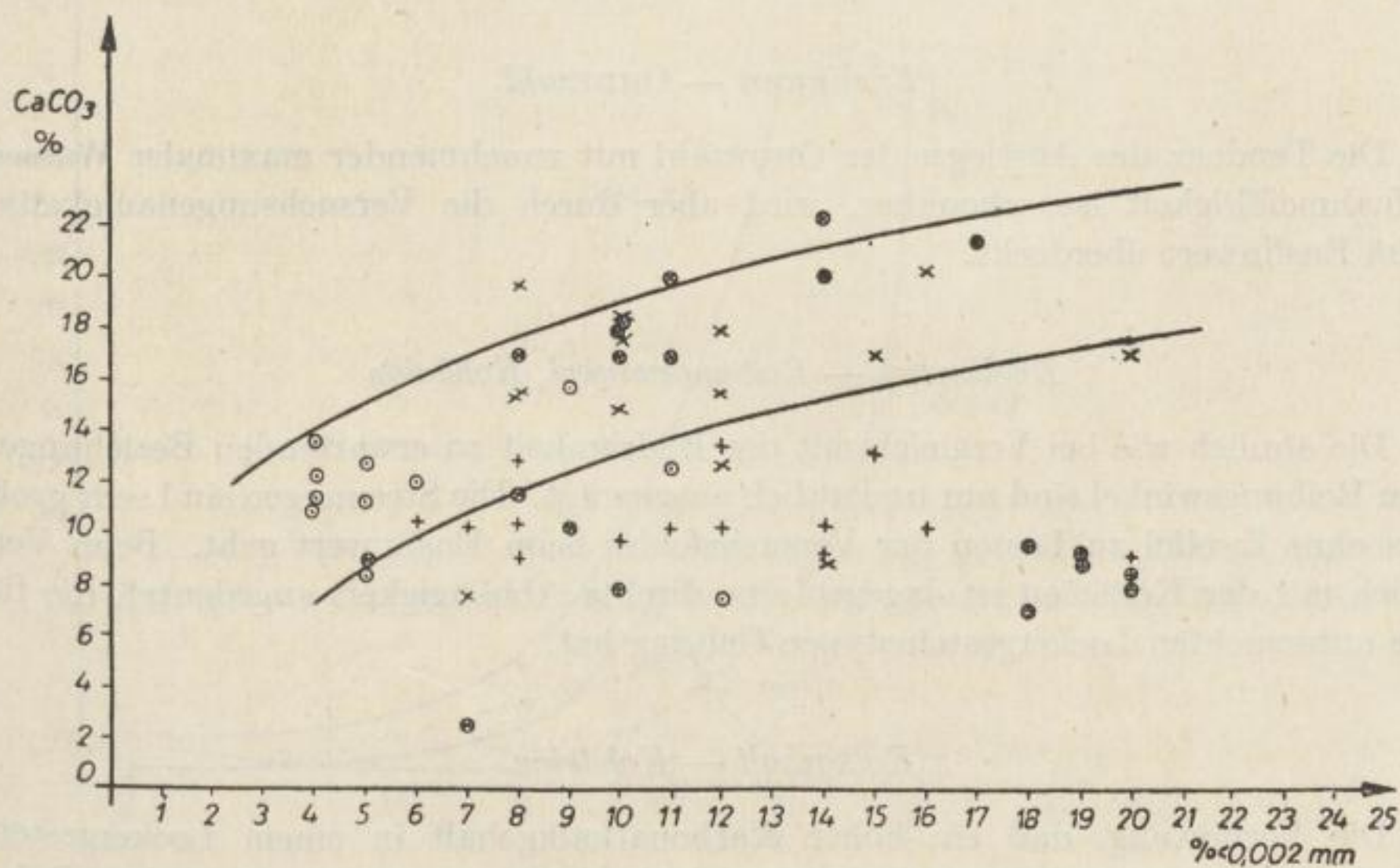


Bild 45. Beziehungen zwischen Kornanteil < 0,002 mm und Kalkgehalt

Hier streuen die Werte ohne feststellbaren Zusammenhang. Daraus läßt sich ableiten, daß beim Klützer Material die Korngrößen des Kalkes bevorzugt in der Ultraschluffkornfraktion liegen, während der Kalk im Altenburger Material in unterschiedlichen Korngrößen auftritt.

Kornanteil $< 0,002$ mm und $< 0,06$ mm — Enslinwert

Erwartungsgemäß kommen bei dieser Gegenüberstellung mit dem Enslinwert — im Gegensatz zur Bildsamkeit usw. — infolge der hier nicht zu vermeidenden Versuchungenauigkeiten die zweifelsohne vorhandenen Zusammenhänge nicht sehr deutlich zum Ausdruck. Trotz der Streuungen ist die bekannte Dreiteilung im Schluffe — Klützer Mergel — Altenburger Mergel aber in der Tendenz ablesbar, und zwar in Form des zunehmenden Enslinwertes bei zunehmendem Kornanteil $< 0,002$ mm. Beim Vergleich mit dem Kornanteil $< 0,06$ mm ist genau, wie bereits weiter oben dargelegt, eine Abhängigkeit nur beim Altenburger Material gegenüber dem Enslinwert zu erkennen, während die Klützer Ergebnisse ohne feststellbare Abhängigkeit streuen.

Diese Tatsache stützt weiterhin die Ansicht, daß beim Altenburger Geschiebemergel und -lehm die Tonminerale sehr stark auch im Schluffkornanteil vertreten sind.

Kornanteil $< 0,002$ mm und $< 0,06$ mm — OHDEzahl

Die Untersuchung zeigt, daß auch die OHDEzahl mit zunehmendem Anteil an Körnungen $< 0,002$ mm ansteigt. Erwartungsgemäß ist diese Beziehung bei Vergleich mit dem Kornanteil $< 0,06$ mm nicht festzustellen.

Enslinwert — OHDEzahl

Die Tendenz des Anstieges der OHDEzahl mit zunehmender maximaler Wasseraufnahmefähigkeit ist erkennbar, wird aber durch die Versuchungenauigkeiten beim Enslinwert überdeckt.

Enslinwert — Reibungswinkel, Kohäsion

Die ähnlich wie bei Vergleich mit der Bildsamkeit zu erwartenden Beziehungen zum Reibungswinkel sind nur undeutlich ausgeprägt. Die Streuungen sind sehr groß, was ohne Zweifel zu Lasten der Versuchsfehler beim Enslinwert geht. Beim Vergleich mit der Kohäsion ist dagegen eine direkte Abhängigkeit angedeutet, die für alle untersuchten Lockergesteinstypen Geltung hat.

Kalkgehalt — Kohäsion

Die Vermutung, daß ein hoher Karbonatkalkgehalt in einem Lockergestein dessen Verkittung und damit Gefügefestigkeit erhöht, bestätigte sich nicht. Dabei

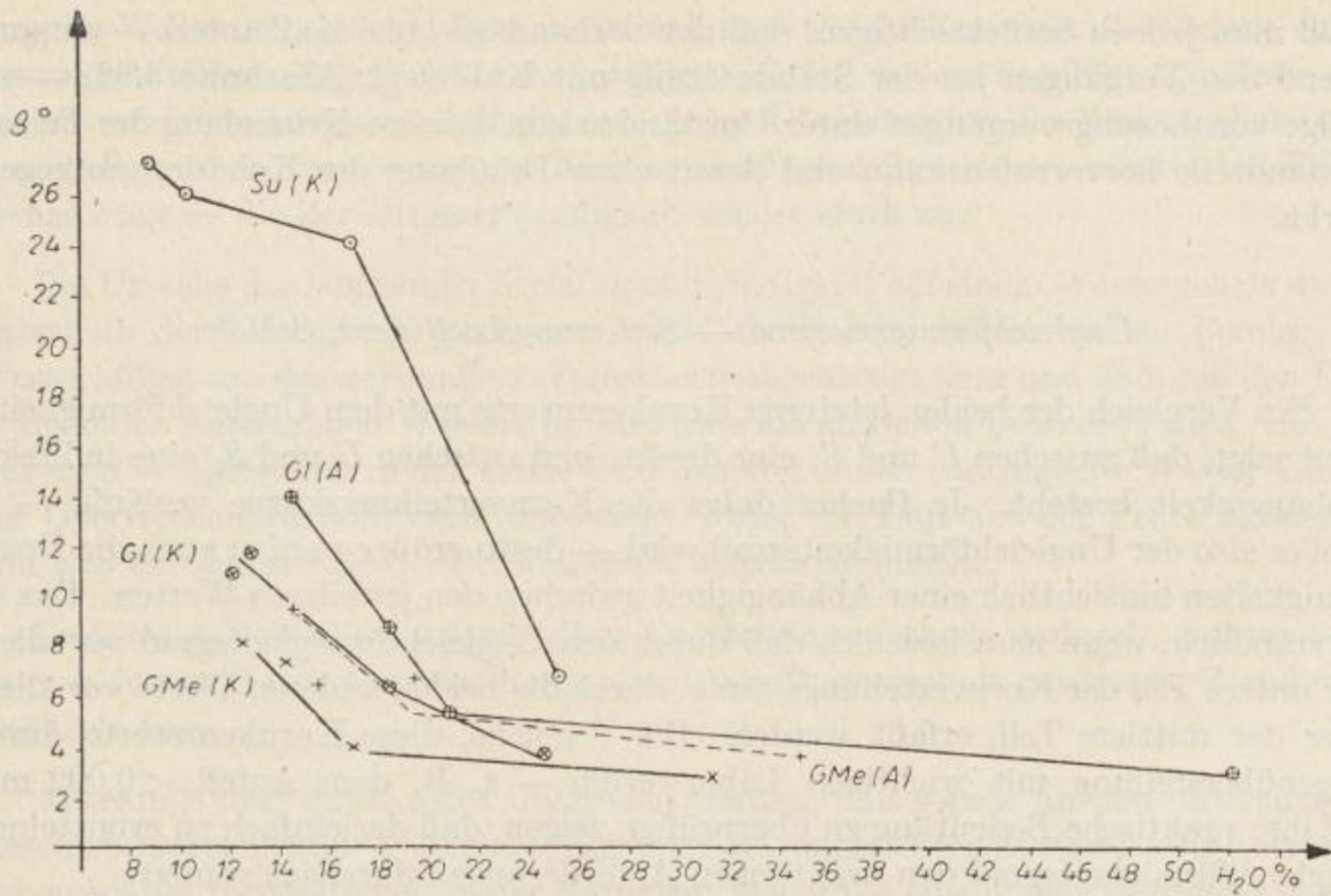


Bild 46. Beziehungen zwischen Reibungswinkel beim Schnellversuch im geschlossenen System und Wassergehalt

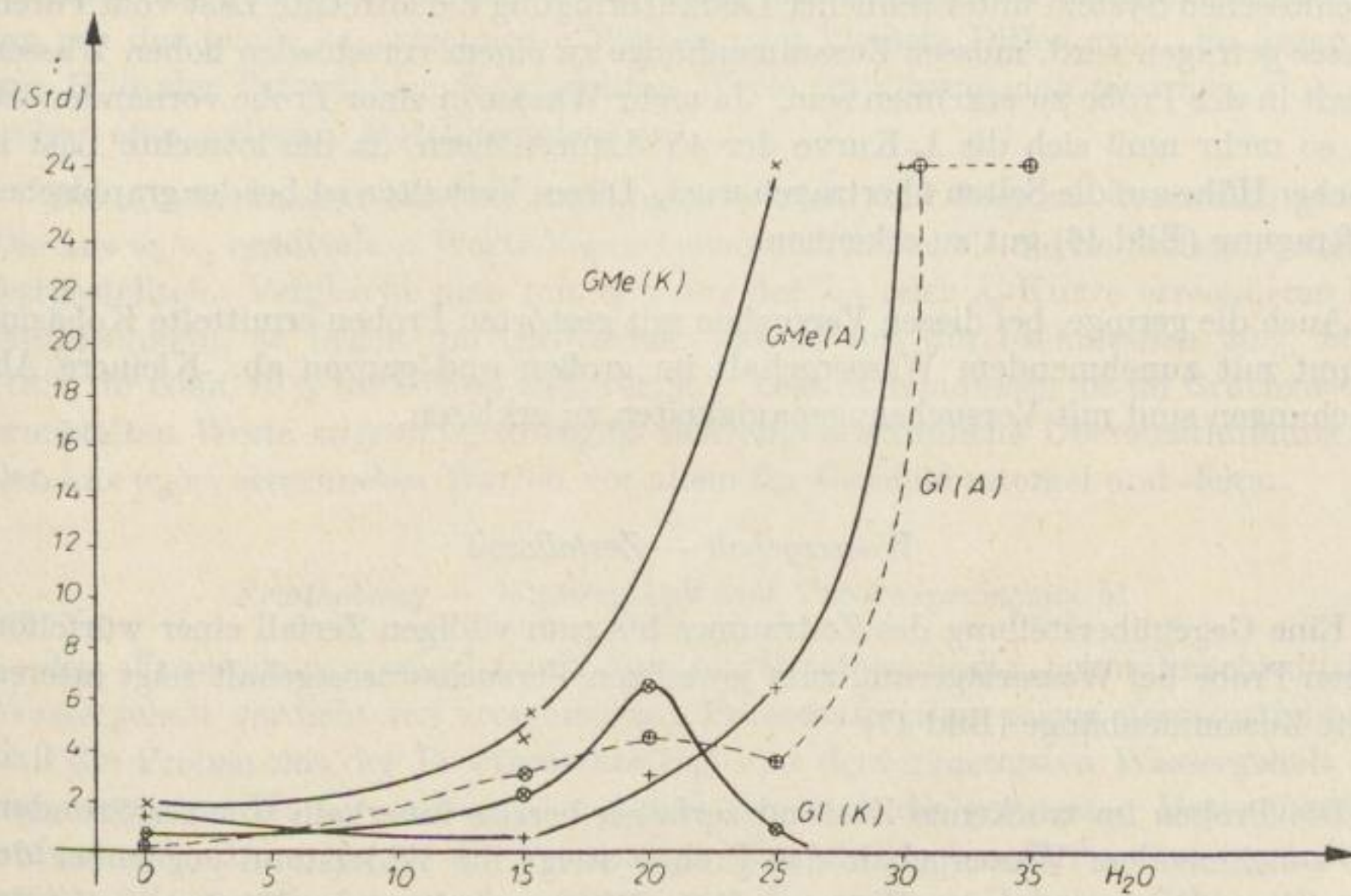


Bild 47. Beziehungen zwischen Zerfall bei Wasserlagerung und Ausgangswassergehalt

muß man jedoch berücksichtigen, daß der vorhandene hohe Kalkanteil — entsprechend den Vorgängen bei der Stabilisierung mit Kalk (vgl. Abschnitt 3.82) — als Folge von Lösungsvorgängen unter Umständen eine gewisse Krümelung der Feinstbestandteile hervorrufen kann und damit einer Erhöhung der Kohäsion entgegenwirkt.

Ungleichförmigkeitsgrad — Sortierungskoeffizient, Schiefe

Ein Vergleich der beiden letzteren Kornkennwerte mit dem Ungleichförmigkeitsgrad zeigt, daß zwischen U und S_o eine direkte und zwischen U und S_k eine indirekte Abhängigkeit besteht. Je flacher dabei die Kornverteilungskurve verläuft — je größer also der Ungleichförmigkeitsgrad wird — desto größer werden auch die Ungenauigkeiten hinsichtlich einer Abhängigkeit zwischen den jeweiligen Werten. Das ist verständlich, wenn man bedenkt, daß durch den Ungleichförmigkeitsgrad vor allem der untere Teil der Kornverteilungskurve, durch die beiden anderen Werte vor allem aber der mittlere Teil, erfaßt werden. Die Versuche, diese Kornkennwerte durch Gegenüberstellung mit wichtigen Laborwerten — z. B. dem Anteil $<0,002$ mm auf ihre praktische Bedeutung zu überprüfen, zeigen, daß der einfach zu ermittelnde Ungleichförmigkeitsgrad den praktischen Anforderungen durchaus genügt.

Schnellversuch im Seitendruckgerät — Wassergehalt

Entsprechend der Tatsache, daß bei der Bestimmung der Scherfestigkeit im geschlossenen System unter schneller Lastaufbringung die lotrechte Last vom Porenwasser getragen wird, müssen Zusammenhänge zu einem verschieden hohen Wassergehalt in der Probe zu erkennen sein. Je mehr Wasser in einer Probe vorhanden ist, um so mehr muß sich die λ_0 -Kurve der 45° -Linie nähern, da die lotrechte Last in gleicher Höhe auf die Seiten übertragen wird. Dieses Verhalten ist bei der graphischen Auftragung (Bild 46) gut zu erkennen.

Auch die geringe, bei diesen Versuchen mit gestörten Proben ermittelte Kohäsion nimmt mit zunehmendem Wassergehalt im großen und ganzen ab. Kleinere Abweichungen sind mit Versuchsungenauigkeiten zu erklären.

Wassergehalt — Zerfallszeit

Eine Gegenüberstellung des Zeitraumes bis zum völligen Zerfall einer würfelförmigen Probe bei Wasserlagerung zum jeweiligen Versuchswassergehalt zeigt interessante Zusammenhänge (Bild 47).

Die Proben im trockenen Zustand zerfallen bereits innerhalb weniger Stunden. Mit zunehmendem Wassergehalt der Proben steigt ihr Widerstand gegenüber der Einwirkung des benetzenden Wassers. Beim Wassergehalt an der Fließgrenze ist der Zusammenhalt der untersuchten Proben am größten. Noch nach mehrtägiger Lage-

rung im Wasser zeigen vor allem die Altenburger Geschiebemergel und -lehme einen gewissen Widerstand gegenüber dem völligen Zerfall, indem kegelförmige Reste der Probewürfel den Zusammenhalt wahren. Beim Überschreiten des Wassergehaltes an der Fließgrenze nimmt — wie der Klützer Geschiebelehm mit der niedrigsten Fließgrenze zeigt — die Zerfallsgeschwindigkeit wieder stark zu.

Die Ursache der langsamen Zerfallsgeschwindigkeit bei einem Wassergehalt wenig unterhalb der Fließgrenze kann damit erklärt werden, daß in diesem Bereich die Wasserhüllen um das vorhandene Feinstkorn abgesättigt sind und dadurch das Eindringen des benetzenden Wassers in die Probe am stärksten behindert wird. Bei geringerem Wassergehalt in der Probe wird das von außen zudringende Wasser infolge der Oberflächenkräfte intensiv angesaugt, wobei die Luft aus der Probe entweicht und sich ein zersprengender Schwelldruck bemerkbar macht.

Praktische Bedeutung erlangt diese Darstellungsmethode dadurch, daß man die zu dem in der Natur festgestellten natürlichen Wassergehalt gehörende Zerfallszeit ermitteln kann.

Allerdings darf dabei nicht übersehen werden, daß gerade an den untersuchten Geschiebemergeln und -lehm infolge ihrer im ungestörten Zustand sehr beträchtlichen echten Haftfestigkeit in der Natur mit Sicherheit eine höhere Festigkeit gegenüber der benetzenden Kraft des Wassers vorhanden sein dürfte.

Durchlässigkeitskoeffizient (k), Reibungsbeiwert (μ_0) aus w_0/w_1

Eine Gegenüberstellung der im DD-Gerät ermittelten Durchlässigkeitskoeffizienten mit den aus w_0/w_1 errechneten Werten zeigt kleinere Differenzen. So liegen die mit Hilfe der OHDEZahlen festgestellten Werte im allgemeinen niedriger, d. h., sie weisen eine geringere Durchlässigkeit auf.

Die Abweichungen bei den Reibungsbeiwerten sind dagegen wesentlich größer. Die aus w_0/w_1 ermittelten Werte liegen bedeutend höher als die im Seitendruckgerät festgestellten. Vergleicht man mit den aus der λ_n - oder λ_0 -Kurve errechneten Reibungswinkeln, so liegen die OHDEschen Zahlen um durchschnittlich 20% höher (18% für GMe, 19% für Gl und 25% für Su). Legt man indessen die im Bruchzustand ermittelten Werte zugrunde, so ergibt sich eine erstaunliche Übereinstimmung mit den aus w_0/w_1 errechneten Werten vor allem für Geschiebemergel und -lehm.

Frosthebung — Wassergehalt und Trockenraumgewicht

Die Frosthebungsversuche mit dem im Proctorzylinder bei unterschiedlichem Wassergehalt verdichteten verschiedenen Probematerialien zeigen übereinstimmend, daß die Proben mit der Proctordichte (γ_p) und dem günstigsten Wassergehalt (w_p) am wenigsten Wasser ansaugen und dadurch auch die geringsten Hebungseffekte aufweisen und daß ferner die Proben mit dem niedrigsten Einbauwassergehalt die größte Wasseraufnahme und entsprechend die größten Hebungseffekte erkennen lassen.

Alle anderen Proben, in denen ein höherer Wassergehalt als in der Probe mit w_{\min} bzw. eine geringere Dichte als in der Probe mit γ_p und w_p vorhanden ist, liegen hinsichtlich der Frosthebung ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit zwischen den erwähnten höchsten und niedrigsten Werten. Die Ursache dieses Verhaltens ist in der nicht gleichbleibenden zusätzlichen Wassermobilisierung in die Proben — als Folge der verschiedenen Lagerungsdichte und Wasserfüllung der Porenräume — zu suchen.

3.12 Vergleich des unterschiedlichen bodenphysikalischen Verhaltens

Die Eintragung der Ergebnisse der kombinierten Sieb- und Schlämmanalysen aller untersuchten Lockergesteine in ein Dreiecksdiagramm mit den Gruppen Ultra-schluffkorn ($<0,002$ mm), Schluffkorn ($0,002$ — $0,06$ mm) und Sand-Kieskorn ($>0,06$ mm) zeigt folgendes Bild (Bild 48).

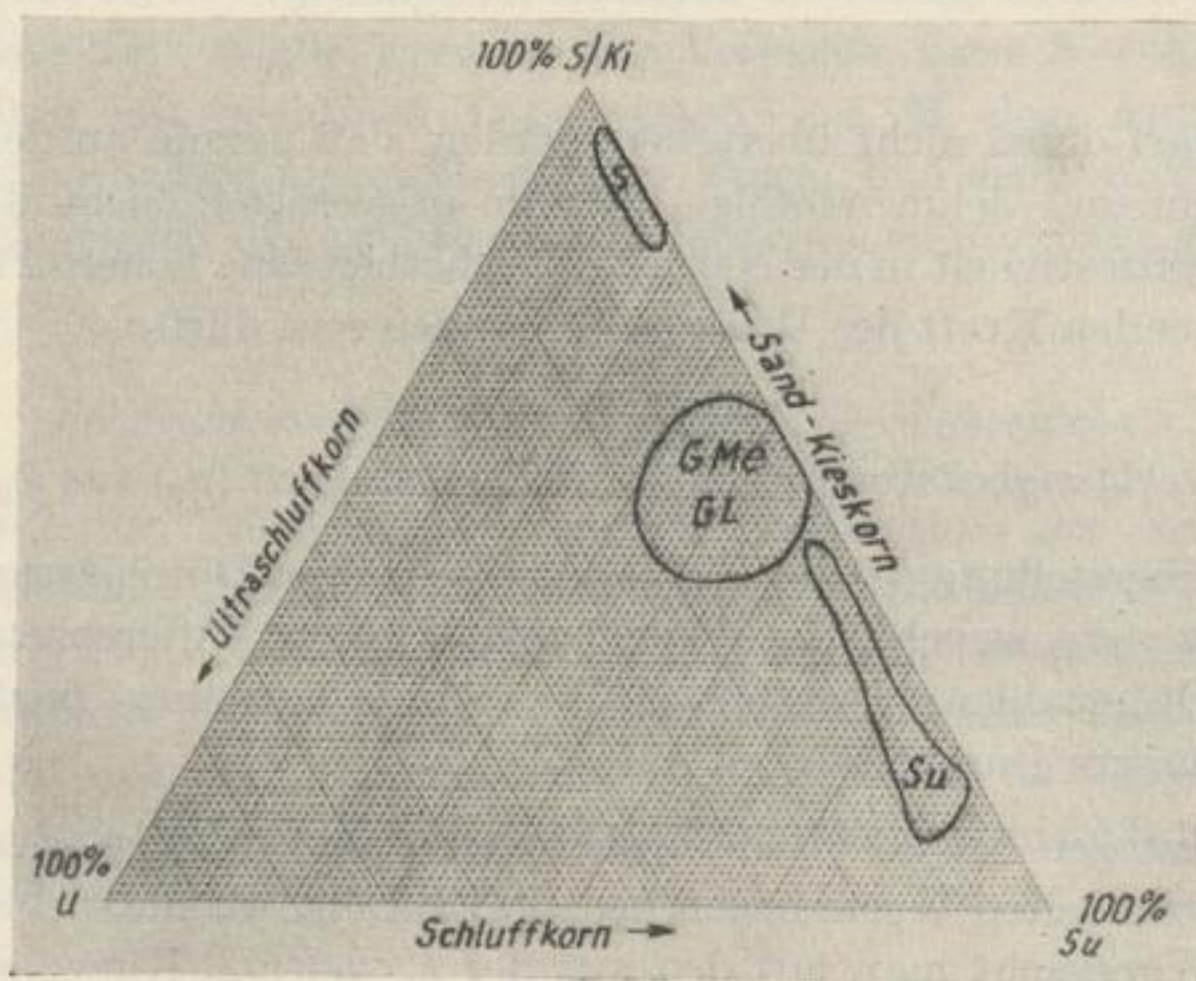


Bild 48. Dreieckdarstellung aller untersuchten Lockergesteine

Die Sande von Klütz-Höved als nichtbindige Lockergesteine liegen dicht am Sand-Kies-Bereich. Die schwachbindigen Schluffe von Klütz-Höved nehmen einen langgestreckten, schmalen Bereich zwischen Sand-Kies und Schluff — dabei stark zum Schluffbereich tendierend — ein. Die Klützer und Altenburger Geschiebemergel und -lehme fallen alle in einen kreisförmigen Bereich, der zwischen Sand-Kies und Schluff — dabei mit einer sehr geringen Tendenz zum Sand-Kies — liegt. Durch eine Ausbauchung reicht er bis zur 20%-Ultra-schluffkornlinie. In diesem Bereich liegen fast ausschließlich die Altenburger Geschiebelehme, während sich Altenburger Geschiebemergel und Klützer Geschiebemergel und -lehme nicht voneinander trennen lassen und den restlichen Teil des kreisförmigen Bereiches besetzen.

Vergleicht man den aus der Schlämmanalyse festgestellten Anteil $<0,002$ mm der untersuchten Lockergesteinstypen miteinander, so ergibt sich eine aufsteigende Reihe vom Sand Klütz [S(K)] mit 0%, über Schluff Klütz [Su(K)] mit 9%, Geschiebelehm Klütz [Gl(K)] mit 11%, Geschiebemergel Klütz [GMe(K)] mit 11% und Geschiebemergel Altenburg [GMe(A)] mit $\sim 10\%$ zum Geschiebelehm Altenburg [Gl(A)] mit 20% Ultraschluffkorn (Bild 49). Der aus der chemischen Analyse umgerechnete mineralogische Tongehalt (Tonsubstanz) zeigt ebenfalls einen Anstieg in

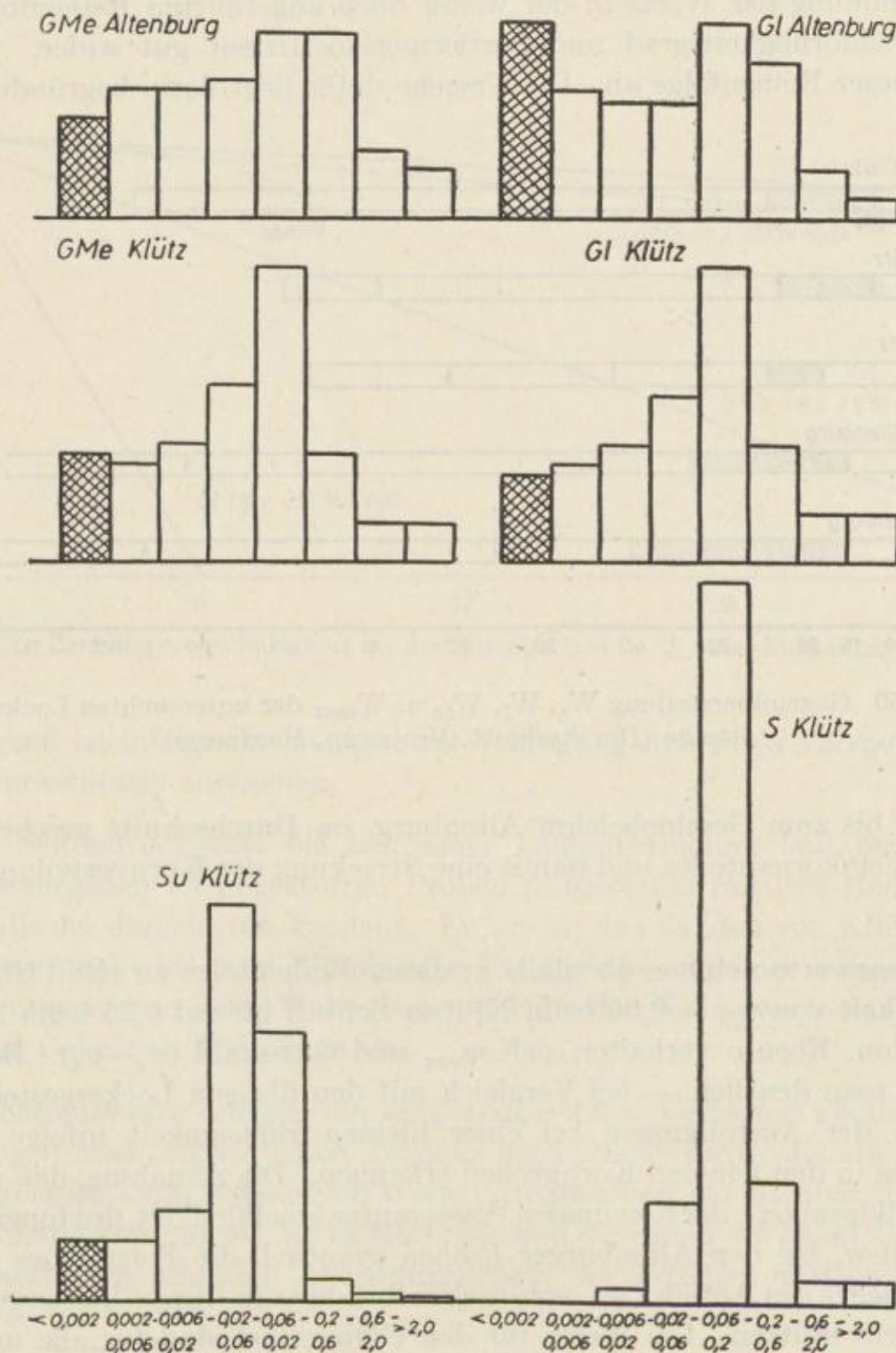


Bild 49. Mittlere Kornzusammensetzung der untersuchten Lockergesteine.

dieser Reihenfolge, wenn man vom Wert G_l (A) absieht, der unter Berücksichtigung aller anderen Kennwerte nur als Versuchsfehler erklärt werden kann.

Dabei treten gegenüber den Ergebnissen der Schlämmanalyse bei S_u (K) und G_{Me} (A) größere Abweichungen auf. Hier liegt der mineralogische Tongehalt wesentlich über dem Kornanteil $<0,002$ mm, während er bei den anderen Probematerialien etwa übereinstimmt. Damit wird die in 3.11 ausgesprochene Vermutung, daß vor allem beim Altenburger Material und auch beim Schluff Klütz die Tonminerale auch im Kornanteil $<0,002$ mm verbreitet sein müssen, untermauert.

Eine Erhöhung der Werte in der weiter oben angeführten Reihenfolge spiegeln auch Ungleichförmigkeitsgrad und Sortierungskoeffizient gut wider. Die Schiefe nimmt in dieser Reihenfolge ab. Die Ursache dafür liegt darin begründet, daß vom

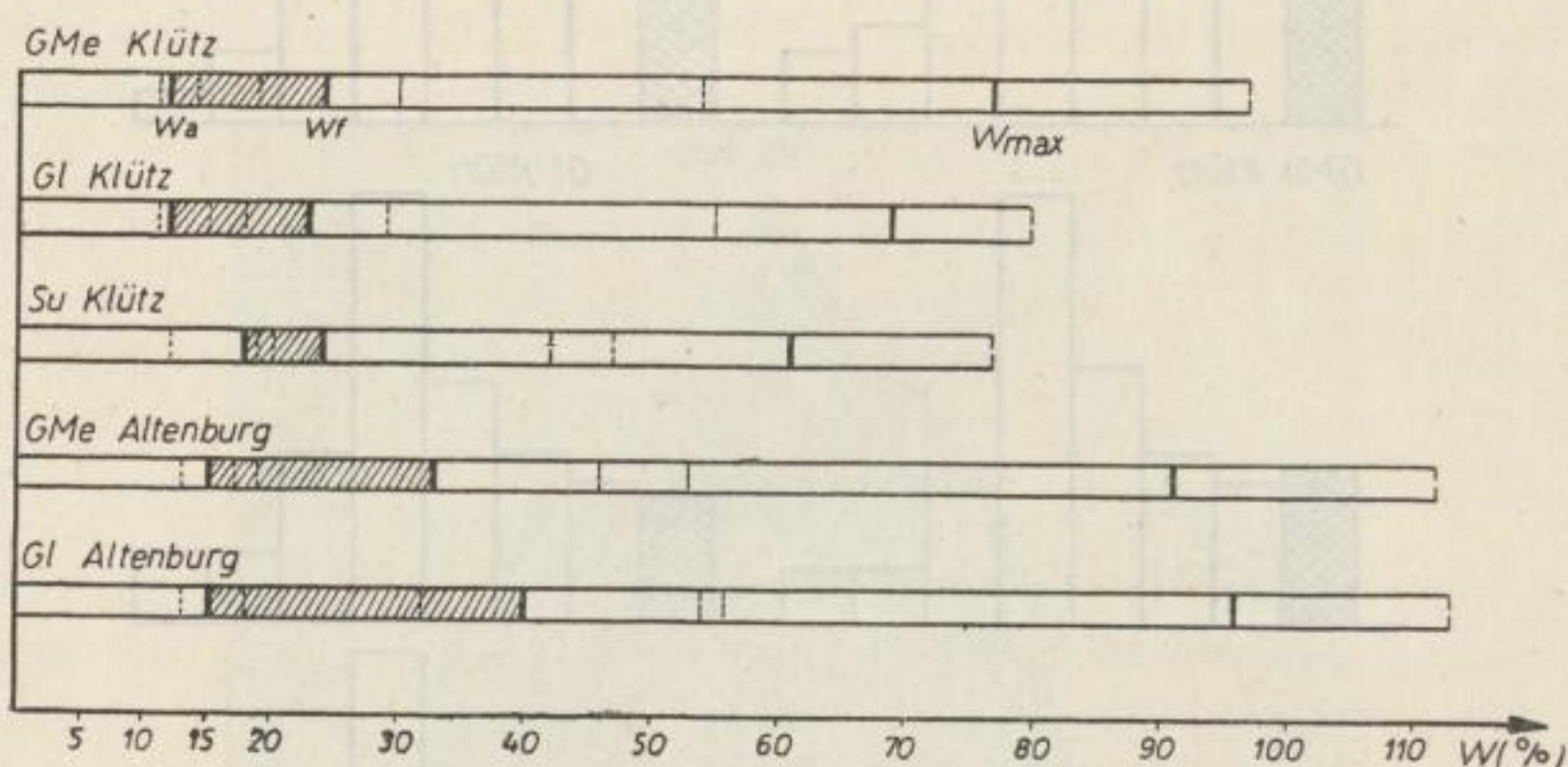


Bild 50. Gegenüberstellung W_a , W_f , W_{fa} u. W_{max} der untersuchten Lockergesteine (Durchschnitt, Minimum, Maximum)

Sand Klütz bis zum Geschiebelehm Altenburg, im Durchschnitt gesehen, eine Zunahme des Feinkornanteiles und damit eine Streckung der Kornverteilungslinie festzustellen ist.

Die Wasserwerte nehmen ebenfalls in dieser Reihenfolge zu (Bild 50). So steigt die Bildsamkeit von $w_{fa} = 0,06$ beim Klützer Schluff bis auf 0,25 beim Altenburger Geschiebelehm. Ebenso verhalten sich w_{max} und OHDEZahl ($w_0 - w_1$). Beim Schluff Klütz kann man deutlich — bei Vergleich mit den übrigen Lockergesteinen — das Hochrücken der Ausrollgrenze bei einer kleinen Bildsamkeit infolge des hohen Quarzanteiles in den feinsten Korngrößen erkennen. Die Annahme, daß die höheren Werte der Bildsamkeit, der maximalen Wasseraufnahmefähigkeit, des Ionenaustauschvermögens usw. bei den Altenburger Proben eventuell die Folge eines bemerkenswerten Anstieges des Anteiles an organischer Substanz in diesen Lockergesteinen sei, läßt sich nicht stützen. Die Werte für den Glühverlust sind für alle untersuchten Lockergesteine ziemlich gleich. Für die Altenburger Sedimente liegen sie sogar unter den Werten für Klützer Geschiebemergel und -lehme.

Ein Vergleich der Zerfallsgeschwindigkeit bei dem für die einzelnen Proben charakteristischen Wassergehalt der Fließgrenze zeigt die bisher festgestellten Abhängigkeiten bestätigt (Bild 51).

Auch der Durchlässigkeitskoeffizient weist in Richtung auf die Altenburger Lockergesteine in zunehmendem Maße niedrigere Werte auf. Die für Gl(A) bestimmte

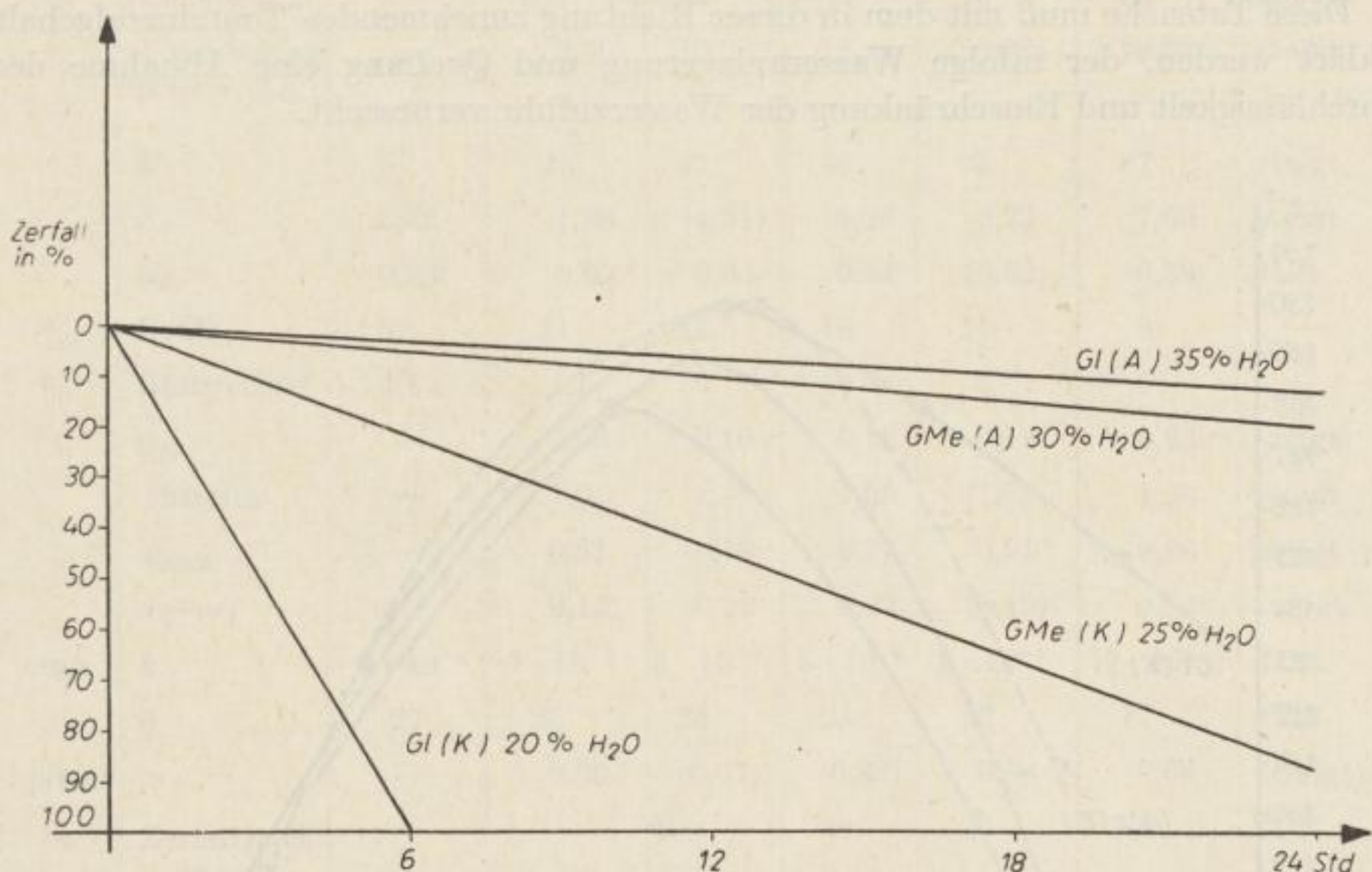


Bild 51. Zerfallsgeschwindigkeit an der Fließgrenze in % zum Ausgangsgewicht

Durchlässigkeit ist infolge der wenigen zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse nicht als repräsentativ anzusehen.

Der im Seitendruckgerät bei langsamer Lastaufbringung und bei möglichem Porenwasserausgleich an ungestörten Proben festgestellte mittlere Reibungswinkel folgt ebenfalls der dargelegten Tendenz. Er hat bei den Sanden von Klütz den höchsten Wert und sinkt bis zum Altenburger Geschiebelehm immer weiter ab. Dieses Verhalten entspricht in jeder Weise dem mit Hilfe der Wasserwerte nachgewiesenen ansteigenden Gehalt an Tonmineralien.

Die Kohäsionswerte müßten ein entgegengesetztes Verhalten als die Werte für den Reibungswinkel zeigen. Diese Tendenz wird jedoch durch die am Klützer Geschiebemergel und -lehm bestimmten Werte durchbrochen, die offenbar zu hochliegen. Der hohe Austrocknungsgrad dieses Materials und die durch die dabei kleiner gewordenen Wasserhüllen erhöhten Anziehungskräfte der Teilchen dürften die Ursache dafür sein.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Proctorversuche untermauert die bisherigen Erkenntnisse in jeder Weise. Entsprechend der Zunahme des Gehaltes an Ton-

mineralien sinkt die Proctordichte ab und der günstigste Wassergehalt steigt. Die zu erwartende Abflachung der Proctorkurve selbst ist nicht klar zu erkennen (Bild 52). Eine Betrachtung der prozentualen Frosthebung — bezogen auf die Ausgangshöhe bei allmählicher Abkühlung auf -14°C — zeigt eine abnehmende Tendenz vom Schluff über Gl(K) zum GMe(K).

Diese Tatsache muß mit dem in dieser Richtung zunehmenden Tonmineralgehalt erklärt werden, der infolge Wasseranlagerung und Quellung eine Abnahme der Durchlässigkeit und Einschränkung der Wasserzufuhr verursacht.

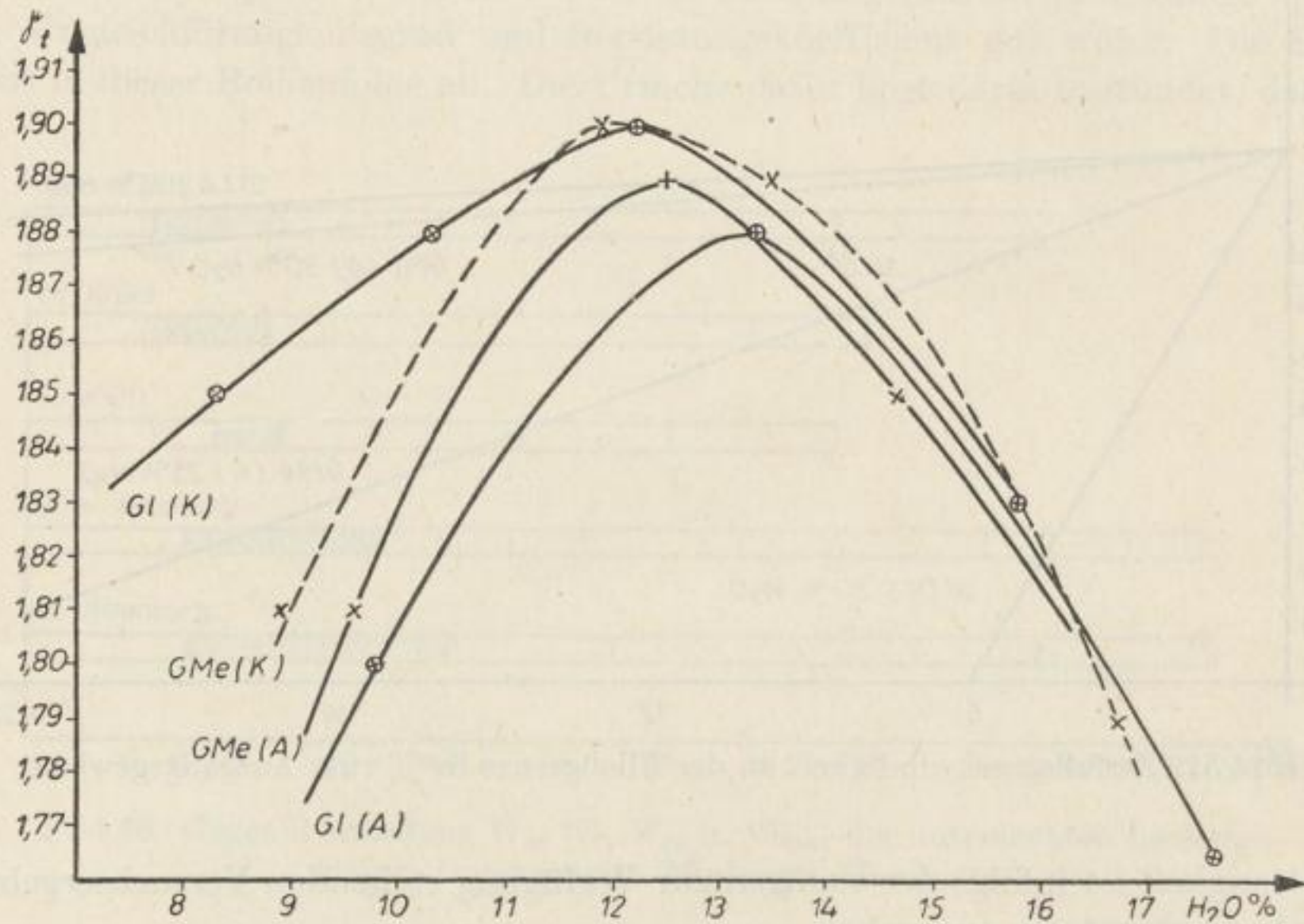


Bild 52. Ergebnisse der Proctorversuche

Auch Aktivität und Ionenaustauschvermögen ordnen sich in der überall erkennbaren Reihenfolge. Daß alle diese Werte als Folge des hohen Gehaltes an organischen Substanzen — die ja ein ähnliches Verhalten zum Wasser zeigen wie Tonminerale — etwas zu hochliegen, ist beim Vergleich der Ergebnisse mit zu berücksichtigen. Dadurch rücken alle diese Zahlenwerte auf Größen, die ein vertretbares Maß nicht überschreiten.

Durch den geringeren Gehalt der Altenburger Lockergesteine an organischer Substanz gegenüber den Proben vom Klütz-Höved wird deren wesentlich stärker bindiges Verhalten gut zum Ausdruck gebracht.

Eine zusammenfassende Darstellung dieser Untersuchungsergebnisse und Abhängigkeiten ist aus Tabelle 7 zu ersehen.

Tabelle 7

Dimen- sion	Kennwerte	Klütz-Höved				Altenburg		
		Sande	Schluffe	Gl	GMe	GMe	Gl	Tendenz
%	< 0,002 mm	0	6	9	11	10	20	steigt
%	Tonsubstanz (Chem. An.)	—	9,50	10,36	12,56	(22,32)	19,68	steigt
	U	5	13	42	48	63	87	steigt
	S_0	1,52	1,98	(4,31)	4,26	5,72	7,69	steigt
	S_k	0,98	0,65	0,55	0,44	(0,62)	0,39	fällt
%	CaCO_3	5	11	14,5	16	11	8	—
%	Glühverlust	3,5	6,5	9	10	7	7	—
l	w_{fa}	—	0,06	0,10	0,12	0,18	0,25	steigt
	Aktivität	—	1,0	1,1	1,09	(1,8)	1,28	steigt
l	w_{max}	—	0,61	0,69	0,77	0,91	0,96	steigt
	$w_0 - w_1$	—	0,15	0,22	0,23	(0,19)	0,32	steigt
cm/s	k	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	($7 \cdot 10^{-8}$)	fällt
0	ρ	27	25	25	24	22	17	fällt
kp/cm ²	c	—	0,36	(0,67)	(0,82)	0,58	0,68	(steigt)
%	Zerfall nach 24 Std.	—	—	100	88	20	14	fällt
%	Frost- hebung	(3)	11	10	8	—	—	fällt
l	w_p	—	—	0,12	0,12	0,125	0,133	steigt
t/m ³	γ_p	—	—	1,90	1,90	1,89	1,88	fällt
mval	Ionen- Austausch	—	—	9,8	10,1	15,0	20,1	steigt

3.13

Ergebnisse

Die bisherigen Ausführungen zeigen, daß man die untersuchten Lockergesteine entsprechend ihrer mineralchemischen Eigenschaften und ihres bodenphysikalischen Verhaltens in folgender Reihe ordnen kann:

Sande	}	Klütz-Höved
Schluffe		
Geschiebelehm		
Geschiebemergel		
Geschiebemergel	}	Altenburg
Geschiebelehm		

Der überwiegende Teil der ermittelten bodenphysikalischen Kennwerte und auch die Ergebnisse der mineralchemischen Untersuchungen weisen eine dieser Ordnung folgende steigende oder fallende Tendenz auf. Die Ursachen dafür liegen im chemisch-mineralogischen Aufbau der einzelnen Sedimente begründet. Die gewonnenen Erkenntnisse gestatten es, folgende Rückschlüsse auf diese für das bodenphysikalische Verhalten ausschlaggebende Zusammensetzung zu ziehen:

Die Klützer Schluffe führen auch in den Korngrößen des Ultraschluffes als Hauptbestandteil Quarz, neben einer geringen Menge von Feldspat, Kalkspat, Magnesit und Limonit. Der relativ geringe Tonmineralanteil verteilt sich auf die Ultraschluff- und Schluffkornfraktion. Die niedrigen Werte der Aktivität und des Enslinwertes lassen die Annahme als gerechtfertigt erscheinen, daß dieses Tonmineral zur Kaolinit-Gruppe gehört.

Die Klützer Geschiebemergel und -lehme bestehen ebenfalls im wesentlichen aus Quarz mit einem geringen Teil Feldspat, Kalkspat, Magnesit und Limonit. Kalzium- und Magnesiumkarbonat sind vor allem in den feinsten Korngrößen angereichert. Auch die Tonminerale treten besonders in der Ultraschlufffraktion $<0,002$ mm auf und dürften ebenfalls — unter Berücksichtigung der Höhe des Ionenaustauschvermögens, der Aktivität und des Enslinwertes — der Kaolinit-Gruppe zuzuordnen sein.

Die Altenburger Geschiebemergel und -lehme zeigen einen ähnlichen Aufbau. Allerdings ist hier der Gehalt an Kalkspat bedeutend geringer, außerdem tritt er in mehreren Kornfraktionen — also in wechselnder Korngröße — auf. Auch die vorhandenen Tonminerale zeigen keine bevorzugte Beschränkung auf die feinsten Korngrößen, sondern sind bis in den Schluffkornbereich hinauf vertreten. Außerdem dürften sie in größerer Menge als in den Klützer Proben vorhanden sein. Bestätigt wird diese Annahme sowohl durch die chemische Analyse als auch durch die Tatsache, daß der in gleicher Weise wie die Tonminerale auf den Bindigkeitscharakter einwirkende Gehalt an organischer Substanz in den Altenburger Lockergesteinen geringer ist als in den Klützer. Neben dieser Erhöhung des Tonmineralanteiles im allgemeinen ist zu vermuten, daß neben den zweifelsohne den Hauptteil bestreitenden Tonminerale der Kaolinit-Gruppe auch noch glimmerähnliche Tonminerale vom Illittyp vorhanden sind. Gestützt wird diese Annahme vor allem durch den bemerkenswert hohen Wert für das Ionenaustauschvermögen, die Aktivität und das maximale Wasseraufnahmevermögen. Beide Faktoren — der hohe Anteil an Tonmineralen als auch das Vorhandensein eines stärker wasserbindfähigen Typs — dürften die Ursache für das im Gegensatz zu den Klützer Lockergesteinen wesentlich plastischere Verhalten der Altenburger Lockergesteine sein.

Der Kornaufbau der Siebfraktionen ($>0,06$ mm Durchmesser) ist bei allen untersuchten Lockergesteinen relativ einheitlich. Es überwiegen schwach gerundete Quarze, die mit abnehmender Korngröße immer mehr zunehmen. Der Anteil von Gesteinsbruchstücken und Kalkspat ist gering. Letzterer tritt vor allem im Material vom Klütz-Höved in Form organischer Reste auf.

3.2 Die Bedeutung der Kennwerte für die Untersuchung von Geschiebemergel und -lehm

Die vorliegende eingehende Untersuchung der bodenphysikalischen Eigenschaften dieser als Mischlockergesteine [8] zu bezeichnenden pleistozänen Lockergesteine erlaubt es, kurz die Bedeutung der im Untersuchungsprogramm ermittelten Kennwerte für die Untersuchung von Geschiebemergel und -lehm abzuschätzen.

Zur allgemeinen Charakterisierung genügen Kornverteilung, spezifisches Gewicht, Raumbgewicht, Fließgrenze, Ausrollgrenze und Bildsamkeit, Kalkgehalt, Glühverlust und Ungleichförmigkeitsgrad. Daraus lassen sich bereits einige wichtige Fragen hinsichtlich der Klassifizierung der einzelnen Lockergesteine beantworten und Aussagen über Tragfähigkeit, spezifische Bodenpressung und Frostveränderlichkeit treffen.

Zur Klärung spezieller Fragen der Standsicherheit und Durchlässigkeit genügt — homogenes Material vorausgesetzt — eine Feststellung von Breiwasserzahl und Einheitswasserzahl nach OHDE. Daraus läßt sich mit hinreichender Genauigkeit die Höhe des Reibungswinkels und des Durchlässigkeitskoeffizienten bestimmen. Empfehlenswert ist es hier, einige Vergleichsuntersuchungen im DD-Gerät und zur Bestimmung der Werte für die Kohäsion auch im Triaxial- oder Seitendruckgerät durchzuführen.

Ist die Klärung des ungefähren mineralchemischen Aufbaues wünschenswert, so ist bereits mit Hilfe der Aktivität und des Ionenaustauschvermögens eine Aussage über die vorhandenen Tonmineraltypen möglich, wobei die Höhe des Glühverlustes mit zu berücksichtigen ist. Ist die Kenntnis der Verteilung des Tonmineralgehaltes oder Kalkgehaltes von Interesse, so genügt die Gegenüberstellung verschiedener Fraktionen mit der Fließgrenze bzw. dem Kalkgehalt.

Spezielle chemisch-mineralogische Untersuchungsverfahren können zwar gewisse weitere Erkenntnisse vermitteln, diese stehen aber in keinem Verhältnis zum notwendigen Aufwand.

3.3 Die festgestellten Unterschiede zwischen weichsel- und elstereiszeitlichen Geschiebemergeln und -lehmern und ihre Ursachen

Der auffälligste Unterschied zwischen den untersuchten — zwei verschiedenen Eiszeiten zuzuordnenden — Geschiebemergeln und -lehmern liegt im Grad der Bindigkeit. Hinzu kommt eine gewisse Blockarmut der elstereiszeitlichen Lockergesteine und ihre auffallend dunkle Farbe.

Die Ursache für die Zunahme der feinsten Korngrößen beim Altenburger Material dürfte einmal im längeren Transportweg und der damit verbundenen stärkeren Aufarbeitung der vom Eise aufgenommenen Gesteinspartikel zu suchen sein, ferner im Überfahren der Tertiärablagerungen des NW-sächsischen Raumes. Letztere Tatsache kann man wohl auch dafür verantwortlich machen, daß die Tonminerale nicht vorzugsweise wie beim weichseleiszeitlichen Geschiebemergel in den feinsten

Korngrößen $< 0,002$ mm auftreten, sondern vor allem auch in der Schluffkornfraktion. Auch das Auftreten glimmerähnlicher Tonminerale neben denen vom Kaolinityp im Altenburger Geschiebemergel und -lehm läßt sich mit der Aufnahme von Tertiärtonen aus dem nordwestsächsischen Raum erklären, da diese verschiedentlich neben in der Hauptsache Mineralen vom Typ Kaolinit und Fireclay (gittergestörter Kaolinit) auch glimmerähnliche Tonminerale führen. Da die erwähnten Tertiärtonen im allgemeinen als Folge der Aufnahme organischer Substanzen recht dunkle Farbtöne zeigen, kann man diese für die stark dunkelgraue und zum Teil sogar fast schwarze Farbe des Altenburger Geschiebemergels verantwortlich machen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß der Altenburger Geschiebemergel und -lehm trotzdem einen geringeren Anteil an organischer Substanz führt als das Material vom Klütz-Höved. Gerade dort hätte man infolge des Überfahrens der tertiären Schichtenfolgen mit einem höheren Gehalt an organischen Bestandteilen rechnen müssen. Andererseits kann man nur annehmen, daß der zweite weichseleiszeitliche Eisvorstoß im weiteren Gebiet der Lübecker Bucht verbreitete interglaziale Gyttjaablagerungen überfahren hat — was im Auffinden eines zusammenhängenden Gyttjahorizontes¹ innerhalb der Geschiebemergel und Sande im Bereich des Klein-Klütz-Höved [18] eine gewisse Stütze findet-, die vom vorrückenden Eis aufgenommen wurden und für den hohen Gehalt an organischer Substanz verantwortlich zu machen sein könnten.

Bemerkenswerte Unterschiede zeigt ferner der Kalkgehalt an den untersuchten, verschiedenen Eiszeiten zugehörigen Lockergesteinen. Wie nicht anders zu erwarten, liegt der Kalkgehalt des Klützer Materials höher als der des Altenburger Materials. Die Ursache ist in den umfangreichen Vorkommen von Kreideablagerungen im Ostseeraum zu suchen, was auch im Vorhandensein kalkiger organischer Reste in den Siebfraktionen zum Ausdruck kommt. Die weitere Tatsache, daß der Kalkanteil der Klützer Geschiebemergel und -lehme bevorzugt im Ultraschluffkornbereich $< 0,002$ mm auftritt, kann vor allem mit der erdigen und feinkörnigen Beschaffenheit der Kreideablagerungen und nicht zuletzt mit der von Eisvorstoß zu Eisvorstoß intensiver wirksamer Aufbereitung und Kornverfeinerung durch Aufnahme von Material der jeweils älteren pleistozänen Ablagerungen erklärt werden. Im Falle der elstereiszeitlichen Lockergesteine sollte man infolge des langen Transportweges mit der gleichen Abhängigkeit rechnen können. Das trifft jedoch in keiner Weise zu, vielmehr wurde festgestellt, daß der im Altenburger Geschiebemergel vorhandene Kalkspat über alle Fraktionen verteilt auftritt. Die Ursache dafür kann sowohl in der Aufnahme von Kalkstein aus dem weiteren Raume Mitteldeutschlands als auch in sekundären Sammlungs- und Kristallisationserscheinungen liegen, was durch die Feststellung kugelförmigen Kalkspataggregaten in den Siebfraktionen bestätigt wird.

Ein Vergleich der im Geschiebemergel und -lehm vorherrschenden Gefügeart zeigt, daß in den Altenburger Lockergesteinen bevorzugt Zerrüttungserscheinungen als Folge einer die Bruchgrenze überschrittenen Beanspruchung festzustellen sind. Im

¹ Glühverlust der Gyttja $> 20\%$.

Klützer Mergel dagegen überwiegt die massige, z. T. unregelmäßig geklüftete Ausbildung.

Auffällig ist in diesem Zusammenhang, daß die festgestellte Kornzusammensetzung der Geschiebemergel aus dem Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved — wie auch die von DÜCKER [19] für die Geschiebemergel des Brodtener Steilufers nördlich Travemünde ermittelten Werte — nicht mit den von K. RICHTER [20] für den gesamten norddeutschen Raum errechneten Durchschnittswerten übereinstimmen. Die RICHTERSchen Werte liegen bei rund 4% Kieskorn, 56% Sand- und Schluffkorn, sowie 40% Ultraschluffkorn. Eine ungefähre Übereinstimmung ist dagegen mit der von RICHTER für den dänischen Raum angegebenen Kornzusammensetzung zu erkennen (4 bis 8% Kieskorn, 57 bis 80% Sand- und Schluffkorn, 15 bis 35% Ultraschluffkorn). Diese Abweichungen im ersten Falle und Übereinstimmungen im zweiten Falle können nur darauf zurückzuführen sein, daß die Angaben von RICHTER bevorzugt auf den Analysen der in Norddeutschland weitverbreiteten Ablagerungen des Frankfurter, Brandenburger und Warthe-Stadiums aufbauen. Die dem Pommerischen Stadium zuzuordnenden Ablagerungen aus dem Küstengebiet NW-Mecklenburgs tendieren deshalb stärker zu den jüngeren glazigenen Ablagerungen Dänemarks.

Zusammenfassend läßt sich an Hand der Ergebnisse der mineralchemischen und bodenphysikalischen Untersuchungsverfahren feststellen, daß Geschiebemergel und Geschiebelehm als verbreitete pleistozäne Lockergesteine neben geringeren örtlichen Schwankungen in ihrer Zusammensetzung auch bemerkenswerte und geotechnisch ins Gewicht fallende regionale Unterschiede aufweisen können. Eine regionalgeologische Gliederung der einzelnen Eisvorstöße an Hand bodenphysikalischer Untersuchungsergebnisse läßt sich daraus jedoch nicht ableiten, da die sicherlich vorhandene Zunahme des Feinkornanteiles — und damit in gewissem Sinne auch der Bindigkeit — mit der Länge des Transportweges durch die Aufnahme und Verarbeitung von anstehenden Gesteinen überdeckt wird.

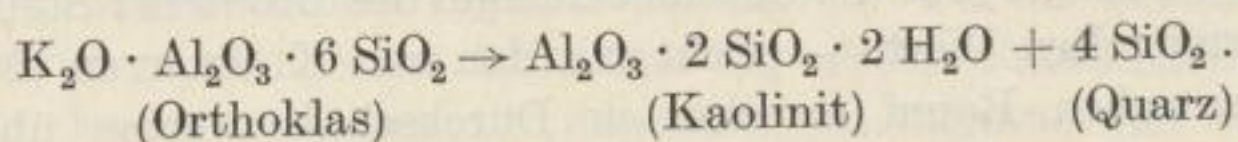
3.4

Die Verlehmung der Geschiebemergel

Die durch den Einfluß des Klimas hervorgerufenen sekundären Veränderungen der obersten Zonen der Grundmoränenablagerungen äußern sich sichtbar vor allem durch den auffälligen Farbwechsel von grau nach gelbbraun durch Oxydation vorhandener Eisenverbindungen. In der Literatur [21] wird außerdem auf die Zersetzung leicht verwitternder (veränderlichfester) Felsgesteine, die allmähliche Entkalkung und andere Lösungsvorgänge hingewiesen. Unmittelbar an der Oberfläche werden mit Hilfe von Bodenbakterien außerdem Humusstoffe gebildet. Bei Betrachtung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse fallen besonders die Unterschiede zwischen den Verlehmungsvorgängen beim elstereiszeitlichen und beim weichseleiszeitlichen Geschiebemergel hinsichtlich der Änderung der plastischen Eigenschaften — also des Gehaltes an Tonmineralen — auf.

Bei der Verlehmung des Altenburger Geschiebemergels findet eine starke Anreicherung von Tonmineralen statt, die nur durch Neubildung dieser Mineralien

erklärbar ist. Diese Tatsache kommt im gesamten bodenphysikalischen Verhalten eindeutig zum Ausdruck. An Hand der chemischen Analyse läßt sich weiterhin erkennen, daß der Feldspatgehalt abgenommen und der Quarzgehalt zugenommen hat. Die Ursache dafür dürfte in der Zersetzung von Feldspat als Folge der Verwitterungsvorgänge zu suchen sein. Dabei entstehen aus



Letztere reichern sich im Geschiebelehm an. Diese Tatsache unterstreicht die Zunahme des Tongehaltes und damit der plastischen Eigenschaften. Der Gehalt an Limonit und Kalkspat verringert sich infolge von Lösungsvorgängen vor allem in den hangenden Zonen. Örtliche Ausscheidungen dieser Minerale in den liegenden Zonen bestätigen diese Vorgänge. Der Gehalt an organischer Substanz wird — sofern man von der obersten etwa 10 bis 30 cm mächtigen Mutterbodenschicht absieht — durch die Verwitterungsvorgänge nicht berührt.

Der Klützer Geschiebelehm zeigt im Gegensatz zu den bisherigen Feststellungen keine Zunahme des bindigen Charakters gegenüber dem Geschiebemergel, sondern eher eine Abnahme, die sich allerdings nur sehr geringfügig bemerkbar macht. Nur in den hangenden 30 bis 80 cm nimmt — wie die Proben 1, 5 und 14 zeigen — der Kalkspatgehalt bemerkenswert ab, während er über die gesamte übrige Mächtigkeit sich kaum vom Geschiebemergel unterscheidet.

Man kann aus diesen Gegenüberstellungen schließen, daß die Verwitterungsintensität vor allem in der Elster-Saale-Warmzeit offenbar bedeutend größer war als in der Nacheiszeit. Hinzu kommt die Tatsache, daß der Geschiebelehm im Gebiet von Altenburg durch Anwehung und Überdeckung von Löß vor der Abtragung geschützt wurde. Anders verhält es sich dagegen beim Geschiebelehm vom Klützhöved, der der Abtragung in starkem Maße ausgesetzt ist, so daß eine vorhandene Umsetzungszone diesen Vorgängen immer wieder zum Opfer gefallen ist.

Abschließend zu diesem Problem läßt sich feststellen, daß die besonders auffällige gelbbraune Farbe als Kennzeichen der hangenden Zonen des Geschiebemergels nicht immer ein Kriterium für eine bodenphysikalisch ins Gewicht fallende und die Eigenschaften wesentlich verändernde Umwandlung der Lockergesteine darstellt.

3.5 Lagerungsverhältnisse und Schichtenparallelisierung

3.51 Klütz-Höved

3.511 Allgemeines

Das mit Hilfe der in den Jahren 1954 und 1956 durchgeführten Profilaufnahme entstandene Küstenlängsprofil (vgl. Bild 2) zeigt deutlich — besonders infolge der vielen zugewachsenen und -gerutschten Kliffabschnitte — die Schwierigkeiten, die sich einer Klärung der Lagerungsverhältnisse und einer eventuellen Parallelisierung der ein-

zelenen Schichten entgegenstellen. Im folgenden soll deshalb untersucht werden, inwieweit sich die untersuchten Lockergesteine auf Grund ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften eventuell in jeweils sich unterscheidende Gruppen — die dann eine gewisse Gliederung der im Steilküstengebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved angeschnittenen Sedimente erlauben würde — zusammenfassen lassen.

3.512

Kiese, Sande, Schluffe und Tone

Kiese und die im allgemeinen mit diesen vergesellschafteten Grobsande treten im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved nur sehr selten in Erscheinung. Sie sind meist in geringe Längserstreckung und Mächtigkeiten unter einem Meter besitzenden Linsen mit den Sanden und Schluffen vergesellschaftet.

Die als Sande zusammengefaßten Lockergesteine zeigen trotz ihrer Verbreitung über die gesamte Klifflänge von West nach Ost einen außerordentlich gleichmäßigen Aufbau. An allen Proben ist die Feinsandfraktion beherrschend, zu der kleine Anteile von Grobschluff und Mittelsand hinzukommen. Nur die Proben 3 und 14 weisen infolge kleinerer Grobsand- und Feinkiesanteile geringe Abweichungen auf.

In jedem Falle sind die Sande feingeschichtet und führen in Form dünner Lagen oder auch feinverteilt organische Substanzen, deren mengenmäßiger Anteil ebenfalls recht einheitlich ist. Auch der Kalkgehalt ist — von in der Probenahme zu suchenden kleineren Schwankungen abgesehen — ziemlich gleichmäßig. Nur im Bereich des Profiles 3 (Brooker Höhe) zeigen die Feinsande undeutliche Fältelungen.

Bei den untersuchten Schluffen ist es mit Hilfe ihres unterschiedlichen bodenphysikalischen Verhaltens möglich, drei im Gebiet des Klütz-Höved vorkommende Schlufftypen zu unterscheiden. Die weiteste Verbreitung hat ein ungeschichteter, gelbbraun gefärbter und mit helleren Lagen durchsetzter Schluff; der ganz vereinzelt Geschiebe von 2 bis 3 cm Durchmesser führt. Die Hauptfraktionen sind hier Grobschluff und Feinsand, wobei ersterer etwas überwiegt. Die Bildsamkeit dieses Lockergesteines wurde im Durchschnitt mit $w_{fa} = 0,04$ bestimmt.

Hinsichtlich der Verbreitung im Steilküstengebiet folgen schluffige Sedimente, die einmal Fältelungen und unregelmäßig wolkenhafte Strukturen und zum anderen Rippelschichtung aufweisen. Sie zeichnen sich durch eine auffällig hohe Beteiligung der Grobschlufffraktion aus. Fließ- und Ausrollgrenze ließen sich bei diesem Typ nicht ermitteln, entsprechend niedrigliegt auch die maximale Wasseraufnahmefähigkeit. Auch im Ungleichförmigkeitsgrad und Sortierungskoeffizienten zeigen sie auffällig niedrige Werte.

Der dritte Schlufftyp, der bereits zu tonigen Sedimenten überleitet, hat seine größte Verbreitung im Bereich des Profiles 13. Hier baut er auf über 200 Meter Länge einen beträchtlichen Teil des Steilufers auf. Vor allem im Gebiet des Gr.-Klütz-Höved findet sich dieser Schlufftyp noch in einigen kleineren Vorkommen mit Sanden und Schluffen vergesellschaftet. Das auffällige an diesen Schluffen ist ihr

hoher Tonmineralanteil, der sich in einer hohen Fließ- und Ausrollgrenze ($w_f = 42\%$, $w_a = 25\%$) und entsprechend hoher Bildsamkeit widerspiegelt. Infolge eines starken Anteiles an Quarzsubstanz im Feinstkorn sind die Plastizitätsgrenzen im Gegensatz zu den übrigen Lockergesteinen des Klütz-Höved stark nach oben verschoben. Der Anteil an organischer Substanz liegt gegenüber den anderen Schluffen etwas niedriger. Diese tonhaltigen Schluffe sind undeutlich geschichtet, führen verschiedentlich Kalkkonkretionen und zeigen Färbungen zwischen gelbbraun und grau.

Als Tone anzusprechende Lockergesteine sind im Gebiet des Klütz-Höved nur als feine, dünne Lagen oder Linschen — meist im Sande eingelagert — anzutreffen. Eine Probenahme und Untersuchung unterblieb aus diesem Grunde.

3.513

Geschiebemergel und -lehm

Alle Versuche, mit Hilfe der ermittelten Kornzusammensetzung oder anderer bodenphysikalischer Kennwerte auffällige örtliche Unterschiede im Geschiebemergel oder -lehm festzustellen, die eine gewisse Gliederung ermöglichen könnte, zeigen keinen Erfolg. Weder die Methode des Vergleiches innerhalb eines Profiles vom Hangenden zum Liegenden noch die Gegenüberstellung der Kennwerte aller im Hangenden der Sande und Schluffe mit dem vermutlich im Liegenden davon anstehenden Geschiebemergel noch die Einbeziehung der strukturellen Merkmale (vgl. Abschn. 2. 11), führte zu einem vertretbaren Ergebnis. Vor allem die für diese Betrachtungen ausschlaggebende Grobschluff- und Feinsandfraktion (vgl. 3.515) weist bei allen Geschiebemergeln und -lehmen außerordentlich geringe Schwankungen auf (vgl. Bild 25 und 28).

3.514 *Vergleich mit dem Brodtener Steilufer (nördlich Travemünde)*

Die in den Jahren um 1950 unter anderem von DÜCKER [19], GRIPP [22], OTTO [23], SEIFERT [24] und SPETHMANN [25] durchgeführten Untersuchungen im weiteren Gebiet der Lübecker Bucht, die vor allem einer Klärung der mit dem Küstenrückgang des Brodtener Steilufers zusammenhängenden Fragen dienen sollten, gestatten einige interessante Vergleiche zum Untersuchungsgebiet zwischen Rosenhagen und Boltenhagen.

In der gleichen Weise wie es für das Gebiet des Klütz-Höved festgestellt wurde, zeigen auch die westlich davon vorhandenen glazigenen Ablagerungen ausgedehnte Einlagerungen schluffig-feinsandiger Sedimente. Sie werden von den verschiedenen Verfassern als Staubeckenabsätze gedeutet, die während eines kurzzeitigen Rückzuges des Inlandeises im weiteren Gebiet des Lübecker Beckens zum Absatz gelangten. Beim erneuten Vorstoß des Eises nach Süden wurden diese Ablagerungen überfahren und teilweise aufgearbeitet. Die Zunahme des Schluffkornanteiles vom Liegenden zum Hangenden innerhalb der im Gebiet des Brodtener Steilufers aufgeschlossenen Geschiebemergel wird damit in Verbindung gebracht. Im großen und ganzen weist der Brodtener Geschiebemergel eine Kornzusammensetzung auf, die mit 10 bis 20%

Ultraschluffkorn, 40 bis 50% Schluffkorn und 30 bis 50% Sandkorn der des Klützer Mergels recht ähnlich ist. Nur die Brodtener Schluffe zeigen einen etwas gleichmäßigeren Kernaufbau mit 85 bis 95% Schluffkorn und 5 bis 15% Ultraschluffkorn. Eine Feinsandkomponente ist fast nicht vorhanden. Auch die übrigen bodenphysikalischen Werte des Geschiebemergels zeigen gute Übereinstimmung. So schwankt der Enslinwert etwa zwischen 40 und 70%, die Ausrollgrenze liegt etwa bei 15% und die Fließgrenze bei 30% Wassergehalt.

Der endgültige Rückzug des Eises aus dem Gebiet des Lübecker Beckens erfolgte unter dauernder Oszillation der Gletscherstirn, indem kleinere Vorstöße den Rückzug unterbrachen. Dabei wurden Toteisstauchmoränen gebildet.

3.515

Schlußfolgerungen

Die durch die bodenphysikalischen Untersuchungen, durch Herstellung eines Längsprofiles im Maßstab 1:10000 und Auswertung der Untersuchungsergebnisse vom Brodtener Steilufer gesammelten Erkenntnisse lassen folgende Deutung des Aufbaues der im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved aufgeschlossenen glazigenen und fluvioglazigenen Sedimente zu.

Die bei der Untersuchung vorgefundenen sandig-schluffigen Lockergesteine sind im mittleren — allerdings oft durch Bewuchs nicht zugänglichen — Teil des Kliffs vermutlich mehr oder weniger durchgehend vorhanden. Untermauert wird diese Ansicht durch die weite Verbreitung von Abbruchsnischen und Kesselbuchten in diesem Bereich des Kliffs, die ja ihre Entstehung dem Grundwasseraustritt in sandigen Sedimenten mit regressiver Erosion verdanken. Zum Absatz kamen diese Sedimente während eines kurzzeitigen Rückzuges des Inlandeises durch die etwa in Südrichtung abfließenden Schmelzwässer auf dem im liegenden Teil des Kliffs im allgemeinen verborgenen und durch die Probenahme nicht erfaßbaren Geschiebemergel dieses Eisvorstoßes. Die ziemlich gleichmäßige Transportgeschwindigkeit dieser Schmelzwässer war die Ursache für die Ablagerung von hauptsächlich feinsandig-schluffigen (Feinsand und Schlufftyp 2) und nur örtlich grobsandig-kiesigen Massen. Die in den feinkörnigeren Sedimenten verbreitete Rippelschichtung weist dabei auf Ablagerungen aus langsam fließendem Flachwasser hin. In entsprechender Entfernung vom Eisrand dürfte diese Vorstellung vertretbar sein. Als Beckenabsätze zu deutende schluffig-tonige Ablagerungen — ähnlich den Sedimenten im Brodtener Steilufer — sind im Gebiet des Klütz-Höved außerordentlich selten anzutreffen und meistens auf ein örtliches Vorkommen beschränkt (Schlufftyp 3). Das wieder vorrückende Eis mußte diese fluvioglazigenen Ablagerungen überfahren, hat sie dabei zum Teil aufgearbeitet und war außerdem die Ursache für umfangreiche Störungen in dem ehemals sicher mehr oder weniger horizontal und zusammenhängend zur Ablagerung gekommenen Schichtenkomplex.

Der verbreitete umgeschichtete Schlufftyp 1 mit seiner vereinzelt, aber überall feststellbaren Geschiebeführung kann danach als eine Art ‚Lokalmoräne‘ angesehen

werden, die im wesentlichen aus den aufgearbeiteten schluffig-feinsandigen fluvioglazigenen Sedimenten unter Aufnahme kleinerer Geschiebe entstanden ist. Diese Deutung wird durch die gleichmäßig starke Beteiligung der Grobschluff- und Feinsandfraktion, des Anteiles an organischer Substanz und auch Kalk gestützt. Außer-

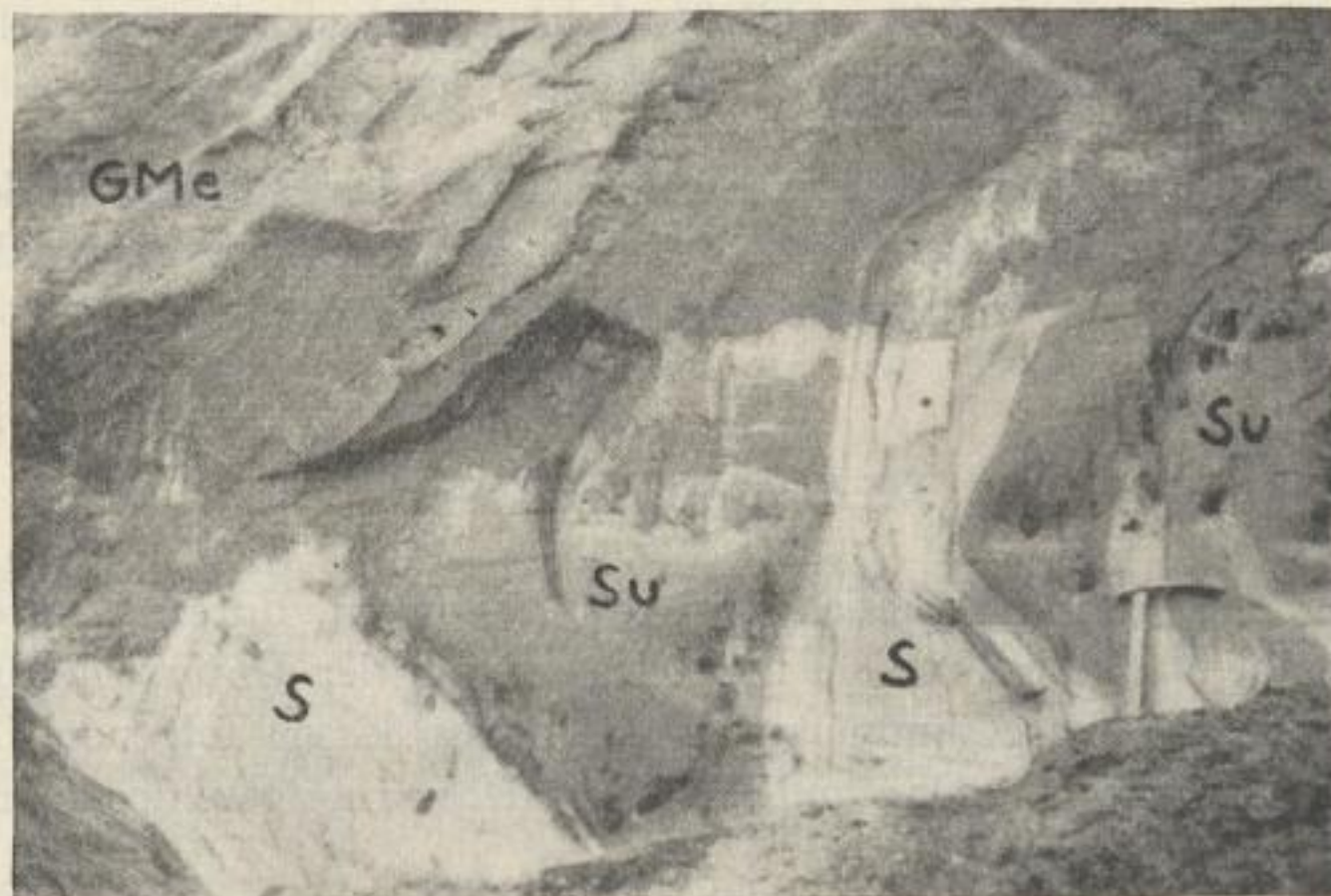


Bild 53. Enge Vergesellschaftung zwischen Feinsanden und Schluffen im Kliff



Bild 54a. Stauchungen der Sedimente im Kliff

dem spricht dafür die enge Vergesellschaftung dieses Sedimentes sowohl mit den fluvioglazigenen als auch mit den rein glazigenen Ablagerungen [1], (Bild 53).

Die beim Überfahren durch das Eis hervorgerufenen Schichtenstörungen lassen sich vor allem als Stauchungen (Bild 54a/b), als örtlich größere Faltungen (Bild 55)

und Verwerfungen und nicht zuletzt in der außerordentlich starken Aufspaltung und Gliederung des Schichtenkomplexes in kleinere und größere Schollen (Bild 56) und auch im schollenförmigen Eindringen von Geschiebemergel in die Ablagerungen fluvioglazigenen Ursprungs längs des gesamten aufgeschlossenen Teils des Kliffes

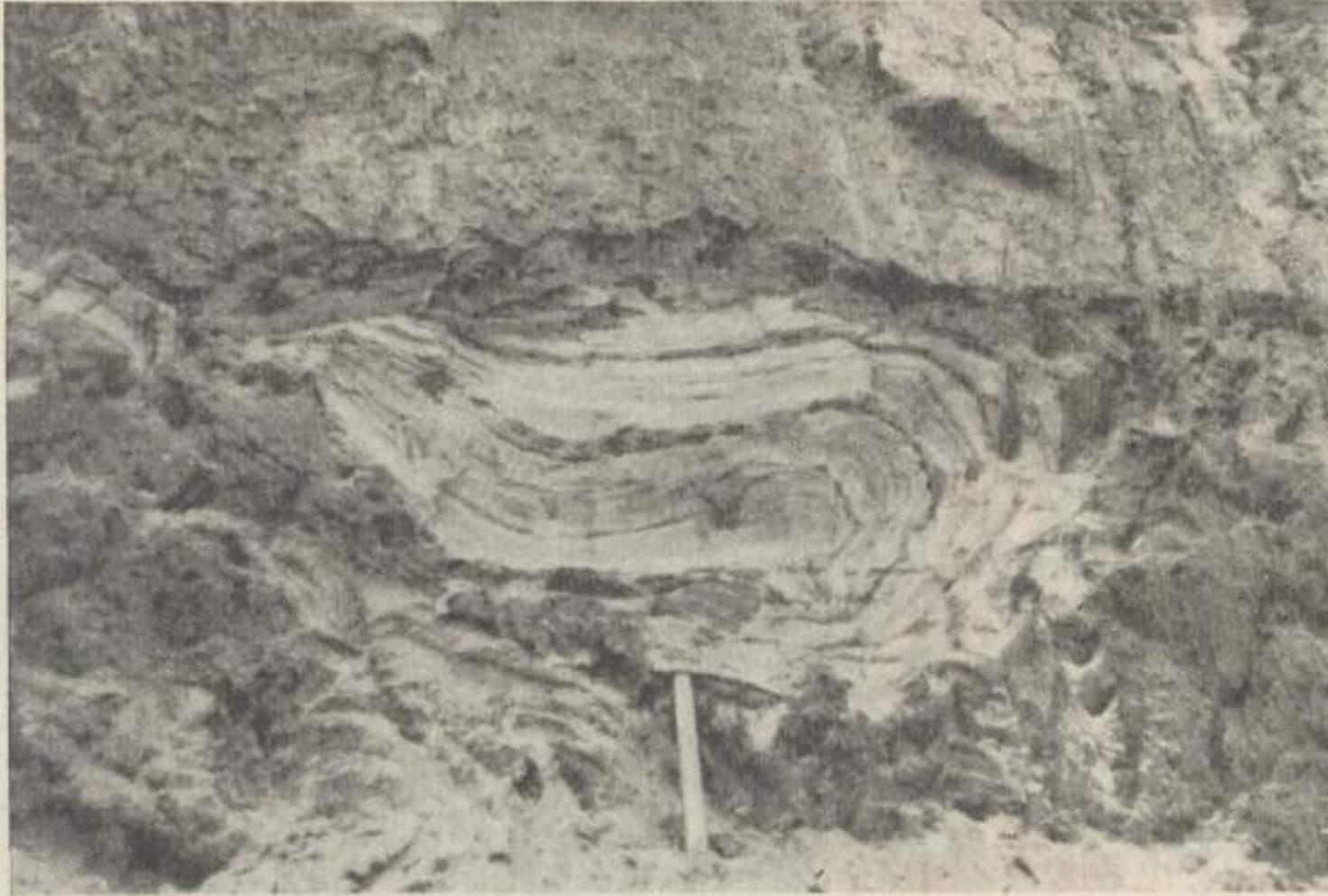


Bild 54b. Stauchungen der Sedimente im Kliff

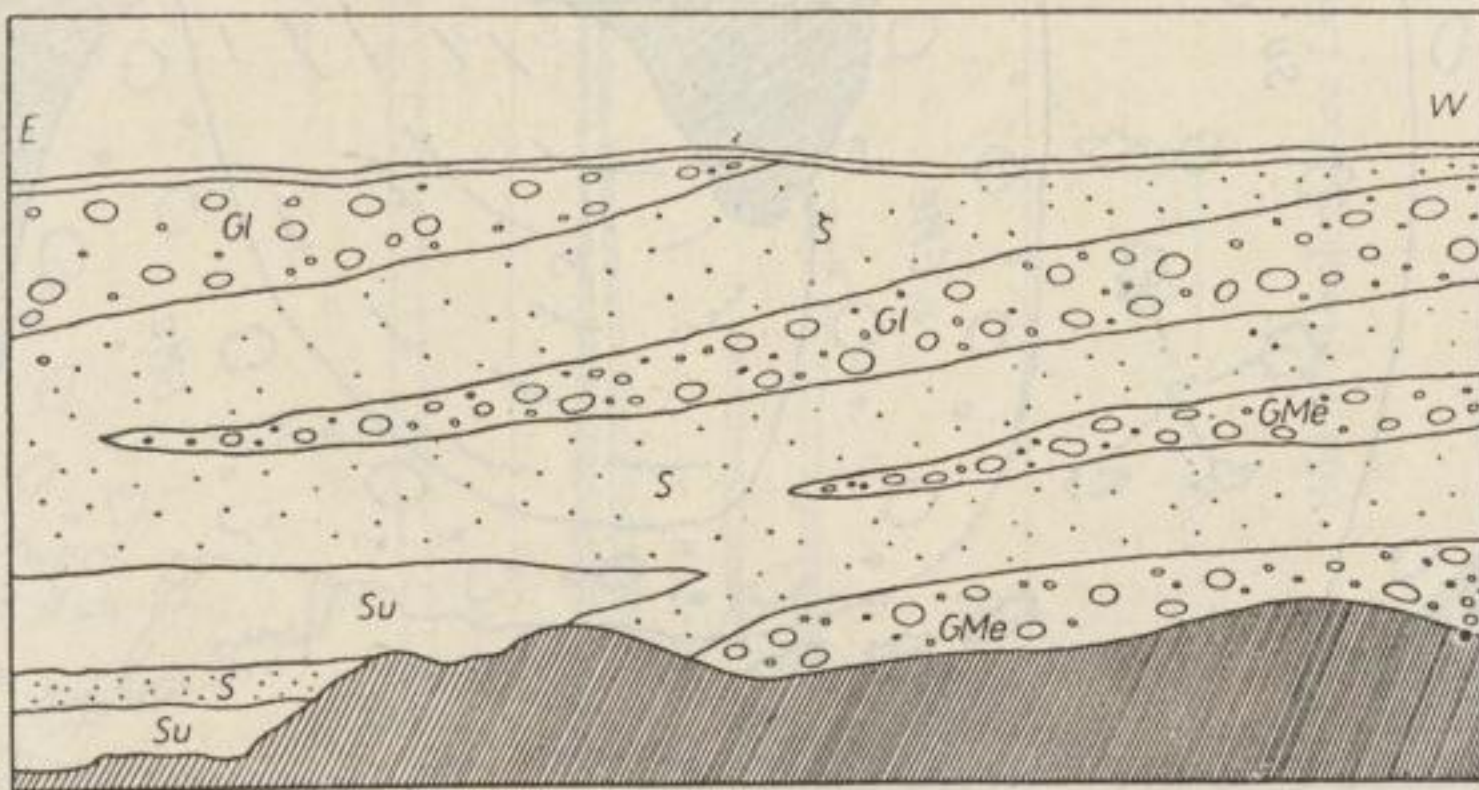


Bild 56. Kliffprofil 300 m westl. Wegmündung Steinbeck (Klein-Klützhöved). Geschiebemergel und Schluff schollenförmig in Feinsanden. Maßstab ca. 1:500

nachweisen [1]. Damit wird auch das verschiedentliche Auftauchen der sandig-schluffigen Sedimente bis zur heutigen Oberfläche erklärlich. Der im hangenden Teil des Kliffes aufgeschlossene und durch die Probenahme erfaßte Geschiebemergel und sein oberflächliches Verwitterungsprodukt dürften danach aller Wahrschein-

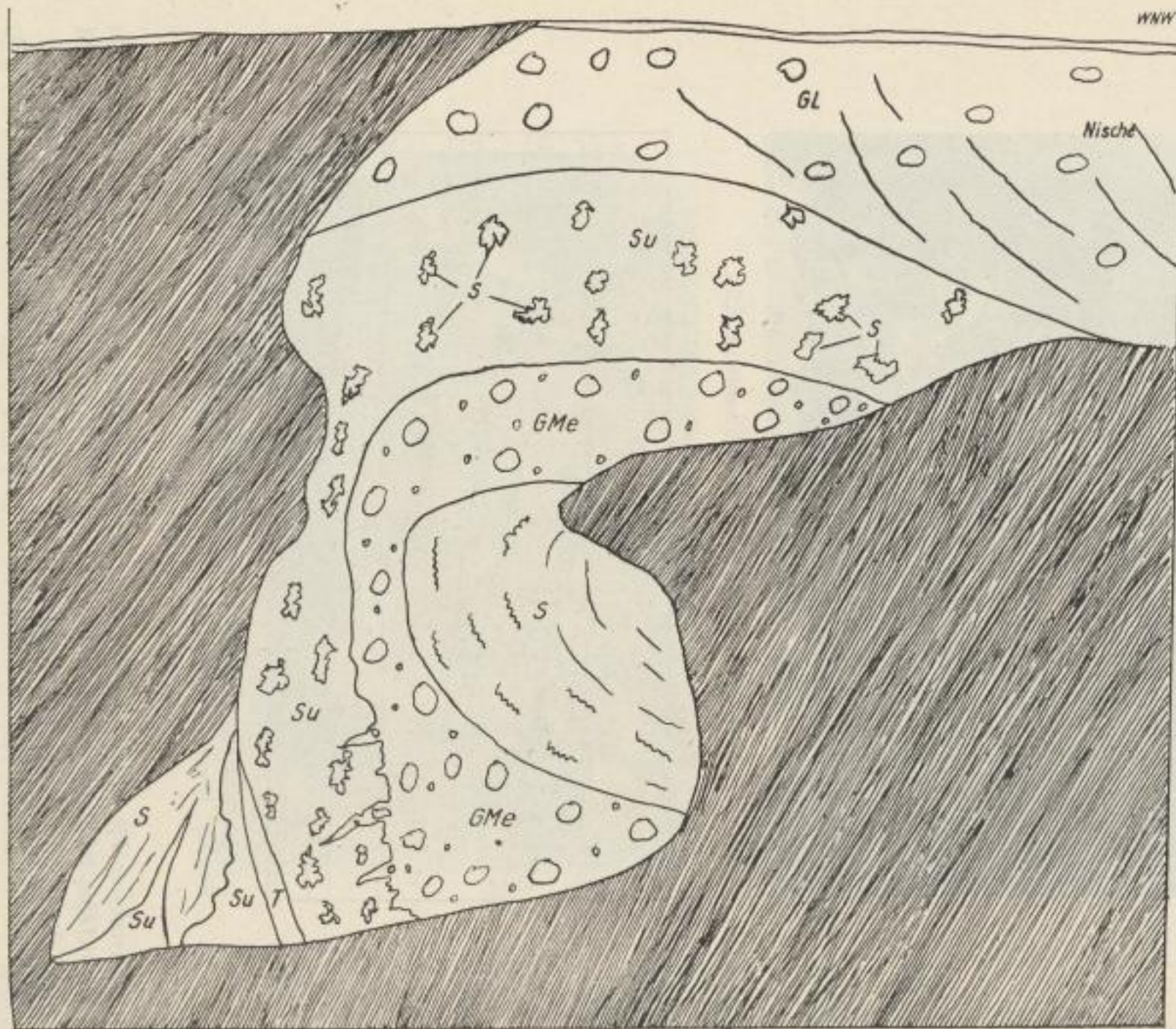
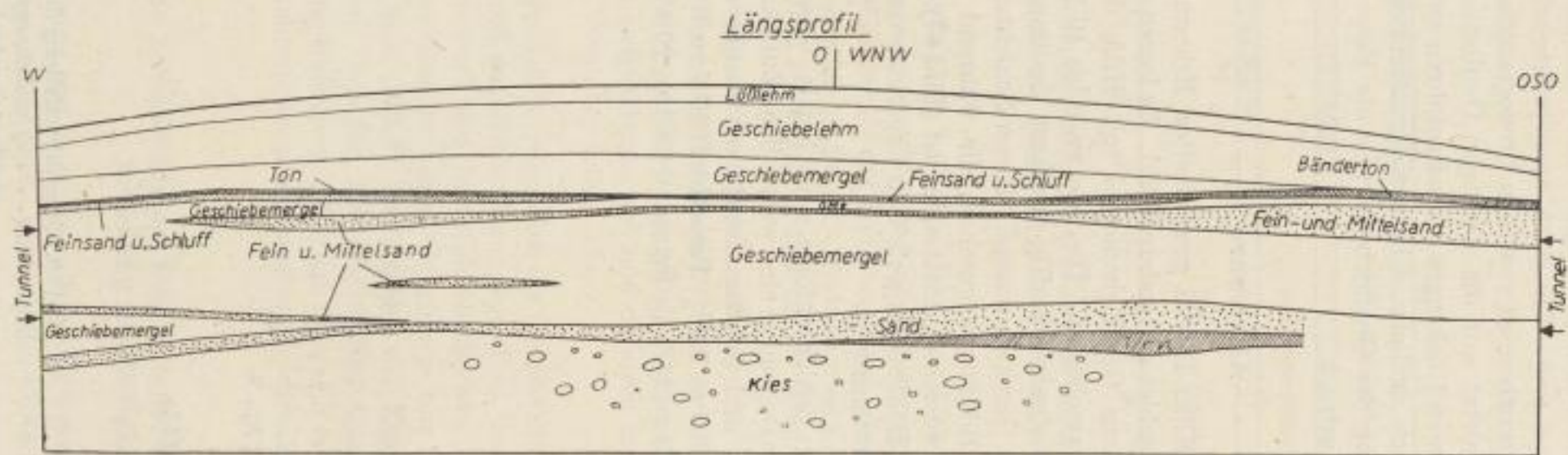


Bild 55. Faltungen der Sedimente im Kliff



Längen 0 10 20 30

Höhen 0 5 10m

Bild 57. Geologisches Längsprofil Tunnelabtrag Altenburg

Lagerungsverhältnisse und Schichtenparallelisierung

lichkeit nach trotz ihrer intensiven Aufspaltung in einzelne Schollen nur *einem* Vorstoß des Inlandeises zuzurechnen sein. Die stark ausgeprägte schollenförmige Aufgliederung der Sedimente im Grenzbereich zwischen fluvioglazigenen und glazigenen Lockergesteinen wird nicht zuletzt auf die kräftigen Oszillationsbewegungen des Eisrandes während des langsamen Rückzuges zurückzuführen sein; sie kommt auch in der nicht seltenen — durch örtliche Überbeanspruchungen hervorgerufenen — feinmosaikartigen Gliederung des Geschiebemergels als Folge einer Überschreitung der Bruchgrenze zum Ausdruck.

3.52

Altenburg

Im Gegensatz zu den am Klütz-Höved gesammelten Erkenntnissen bietet sich im Altenburger Untersuchungsgebiet ein anderes Bild. Es lassen sich hier eindeutig zwei petrographisch verschiedene Geschiebemergel mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Laborkennwerte unterscheiden. Die in etwa 8 bis 10 Meter Tiefe aufgeschlossene Schichtenfolge aus tonig-schluffig-sandigen Sedimenten trennt einen liegenden und einen hangenden Geschiebemergel. Dieser Schichtenkomplex ist demnach als eine fluvioglazigene Bildung anzusehen, die während eines kurzzeitigen Rückzuges innerhalb der Elstervereisung entstanden ist (Bild 57). Damit finden die von GRAHMANN im Gebiet von Böhlen festgestellten Lagerungsverhältnisse auch für das Gebiet Altenburg eine Bestätigung.

Der im Hangenden dieser Schichtenfolge anstehende Geschiebemergel zeigt gegenüber dem im Liegenden anstehenden eine wesentliche Zunahme des Feinkornes. Innerhalb der einzelnen Sieb- und Schlämmfraktionen macht sich das wie folgt bemerkbar. Ultraschluffkorn 13,4 zu 7,9%; Feinschluff 13,5 zu 10,2%; Mittelschluff 14,1 zu 12,7%; Grobschluff 14,3 zu 14,7%; Feinsand 18,2 zu 20,4%; Mittelsand 18,3 zu 19,1%; Grobsand 5,1 zu 7,4%; Grobkorn 2,9 zu 7,5%.

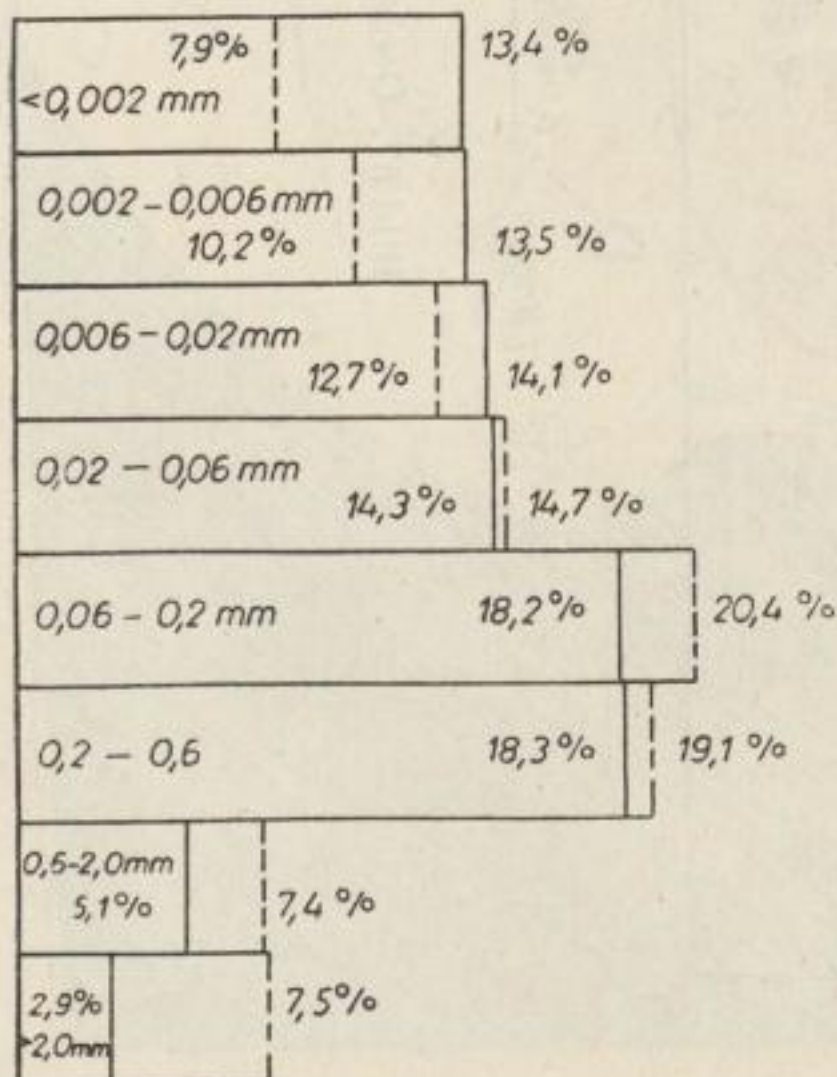


Bild 58. Gegenüberstellung der Kornverteilung des liegenden (---) und hangenden (-----) Altenburger Geschiebemergels

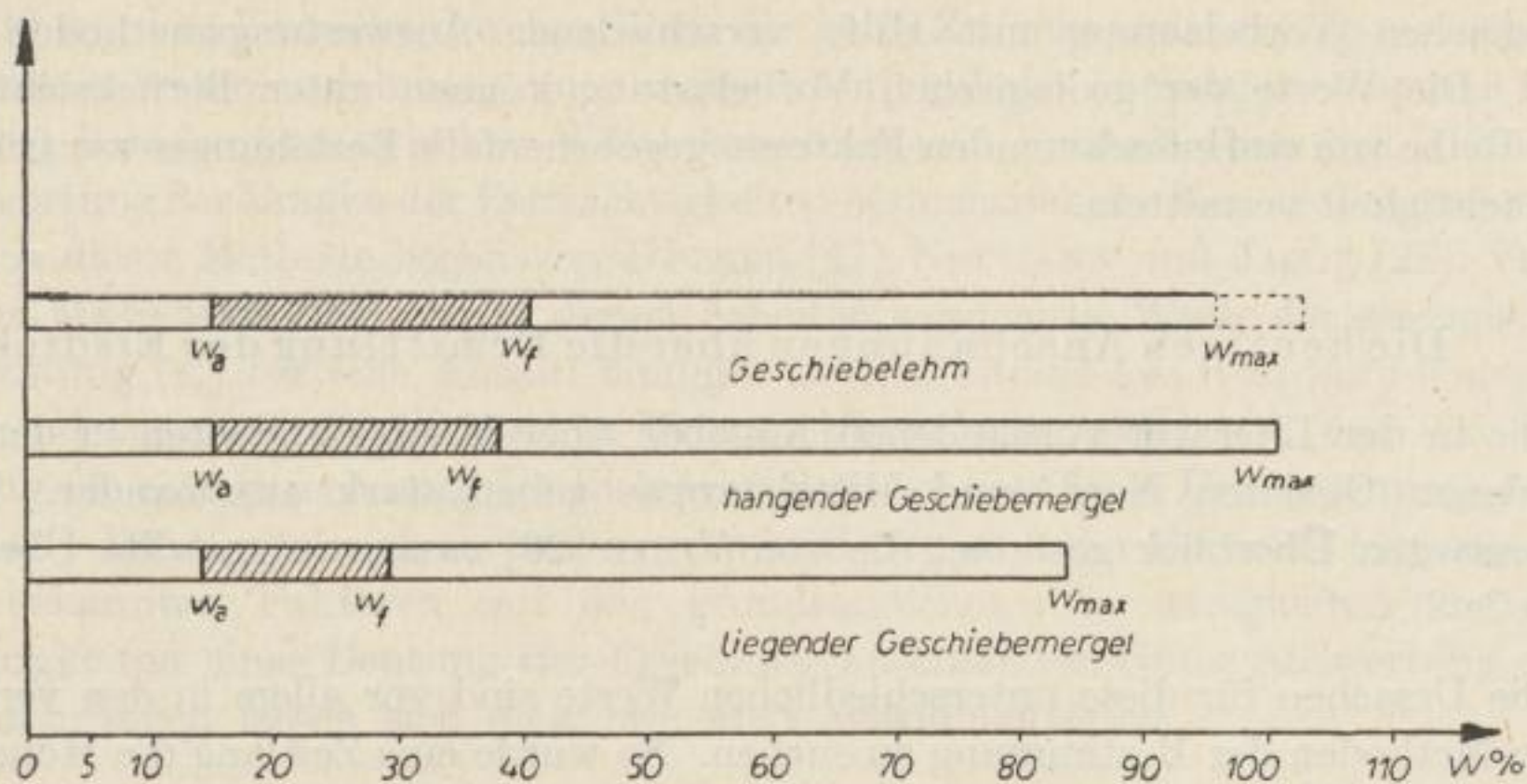


Bild 59. Gegenüberstellung der Wasserwerte des Altenburger Geschiebemergels (liegender und hangender) und des Altenburger Geschiebelehmes

zu 19,1%; Grobsand 5,1 zu 7,4% und Kieskorn 2,9 zu 7,5% (Bild 58). Entsprechend gestatten auch die Wasserwerte eine klare Scheidung der Ablagerungen dieser beiden Eisvorstöße. Die Bildsamkeit des liegenden Geschiebemergels liegt mit 0,15 wesentlich unter der des hangenden mit 0,23. Auch das maximale Wasseraufnahmevermögen zeigt mit 84 zu 101% eindeutige Unterschiede (Bild 59).

Danach muß angenommen werden, daß der zweite Eisvorstoß der Elstervereisung eine beträchtliche Menge der tonig-schluffigen und z. Z. auch etwas sandigen — während des Rückzuges zur Ablagerung gekommenen — Schichtenfolge, die als Bänder-ton zu deuten ist, aufgearbeitet hat und dadurch mehr Feinkorn als der Geschiebemergel des ersten Vorstoßes führt.

Mit dieser Erkenntnis werden auch die festgestellten hohen Unterschiede zwischen Geschiebemergel und dem Verwitterungsprodukt Geschiebelehm erklärbar (vgl. 3.4). Vergleicht man nämlich die bodenphysikalischen Kennwerte des hangenden Geschiebemergels, aus dem der Geschiebelehm ja nur hervorgegangen sein kann, miteinander, so zeigt sich, daß die Änderungen der Eigenschaften ein vertretbares Maß nicht überschreiten. Das für den Altenburger Geschiebemergel typische auf eine Überbeanspruchung hinweisende Gefüge läßt sich infolge der sonst keine Störungen aufweisenden Schichtenfolge nur mit einer gleichmäßigen aber sehr hohen Eisauflast erklären.

3.6 Die geologische Vorbelastung der Sedimente im Gebiet des Klütz-Höved und ihre Beziehung zur Eisauflast

Die Durchführung von Zusammendrückungsversuchen bei verhinderter Seitenausdehnung, die nur mit Proben aus dem Steilküstengelände des Klütz-Höved möglich war, gestattet aus dem Verlauf der Drucksetzungskurven eine Festlegung der

geologischen Vorbelastung mit Hilfe verschiedener Auswertungsmethoden (vgl. 1.52). Die Werte der geologischen Vorbelastung können unter Berücksichtigung einer Reihe von einflußnehmenden Faktoren gegebenenfalls Beziehungen zur früheren Eismächtigkeit vermitteln.

3.61 Die heutigen Anschauungen über die Ermittlung der Eisdicken

Die in der Literatur vorhandenen Angaben über Eismächtigkeiten in den verschiedenen Gebieten Nord- und Mitteleuropas gehen stark auseinander. Einen interessanten Überblick gestattet die von VIETE [26] zusammengestellte Übersicht (Tabelle 8).

Die Ursachen für diese unterschiedlichen Werte sind vor allem in den verschiedenen Methoden der Bestimmung zu suchen. So wurde eine Zeitlang die Höhenlage der nordischen Geschiebe im Mittelgebirgsraum für die Mächtigkeitsberechnung herangezogen, dann Methoden, die auf einer Reihe von Annahmen, z. B. den Gefälleverhältnissen der Eisoberfläche, dem Bodenrelief usw., beruhen. Erst mit dem stärkeren Bekanntwerden der bodenmechanischen Untersuchungsverfahren in den Jahren

Tabelle 8

Autor	Gebiet	Eisdicke	Bemerkungen
HELLAND (1879)	Berlin mittlere Ostsee	370 m 650—700 m	
DATHE (1894)	mittlere Ostsee	maximal 4000 m	gefällte Eisoberfläche 1:100
FRECH (1901)	Trebnitzer Katzengebirge	anfangs 100—200 m maximal 600—800 m	
ZIMMERMANN (1905)	Stettin	3300 m	Gefälle 1:200
DEECKE (1906)	Stettin	1000 m 400—500 m	Hauptvereisung letzte Vereisung
GRAHMANN (1925)	Leipzig Dresden	400 m 200 m	{ Elstereiszeit { Gefälle 1:500
PENCK (1933)	südliche Ostsee	100—1500 m	
BETTENSTAEDT (1934)	Halle	200—250 m	Hauptvorstoß der Saaleeiszeit
GRIPP (1947)	Holstein	100—130 m	letzte Eiszeit
WAGENBRETH (1955)	Profen bei Zeitz	60 m	Saaleeiszeit Gefälle 1:1000

um 1930 wurden Versuche durchgeführt, die beim Zusammendrückungsversuch bei verhinderter Seitenausdehnung einer ungestörten bindigen Lockergesteinsprobe festgestellten Beziehungen zwischen Wiederbelastung und Erstbelastung (vgl. 1.52) zur Beantwortung der Fragen der Eismächtigkeiten heranzuziehen. Neuere Untersuchungen nach dieser Methode liegen von DÜCKER [27], NEUMANN und JACOB [28], VIETE [26] und MATSCHAK [29] vor. In diesen Arbeiten werden die Werte der geologischen Vorbelastung (p_v) für eine Anzahl bindiger Lockergesteine aus dem norddeutschen Raum und aus den mitteldeutschen Braunkohlengebieten mitgeteilt und ihre Verwendung für eine Berechnung der Eismächtigkeit im jeweiligen Untersuchungsgebiet diskutiert. Dabei setzt sich erstmals VIETE kritisch und unter Berücksichtigung aller heute bekannten Faktoren mit den grundsätzlichen Ungenauigkeiten und den Schwierigkeiten einer Deutung der Ergebnisse auseinander. Unter Auswertung eigener Erfahrungen lassen sich diese wie folgt zusammenfassen:

1. Ungenauigkeiten bei der Probenahme
2. Ungenauigkeiten bei der Versuchsdurchführung
3. Verschiedene Methoden der Berechnung der Vorbelastung (CASAGRANDE, OHDE, RUDERT/FRITZSCHE)
4. Nachträgliche Auflockerungserscheinungen in den Sedimenten infolge starker Wasseraufnahme, Frost und tektonischer Einwirkungen
5. Unbekannte Mächtigkeit der Schichten zwischen Eisunterkante und Probenahmepunkt als Folge von Erosionserscheinungen
6. Unbekanntes Raumgewicht der Zwischenschichten und des Eises
7. Eiskalotte beansprucht den Untergrund statisch und dynamisch, letzteres in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des vorrückenden Eises und der Morphologie des Geländes

Dabei lassen sich die in den Punkten 1; 2; 3 und 6 zusammengestellten Fehler auf ein vertretbares Mindestmaß beschränken. Die unter 4; 5 und 7 erwähnten Fehlereinflüsse dagegen entziehen sich jeglicher Möglichkeit einer auch nur ungefähren Abschätzbarkeit. Auch dieses exakte Verfahren der Bodenmechanik versagt also bei einer mechanischen Übertragung der Ergebnisse auf die Belange der Geologie, da dabei nicht nachweisbare Annahmen getroffen werden müssen, die besonders die niedrigen Werte für p_v in einem nicht vertretbaren Maße beeinflussen.

3.62 Bemerkungen zur Eisdicke im Gebiet des Klütz-Höved

An bindigen Lockergesteinen, die für die Durchführung von Druckversuchen in Frage kamen, standen aus dem Gebiet des Gr.- und Kl.-Höved nur Geschiebemergel- und Geschiebelehmproben zur Verfügung. Auch diese glazigenen Sedimente selbst müssen in ähnlicher Weise wie die vom Eis überfahrenen bindigen Lockergesteine die durch das Eis eingetragenen Kräfte in ihrer Drucksetzungslinie wider spiegeln.

An den untersuchten Proben wurden Werte für die geologische Vorbelastung zwischen 2 und 6 kp/cm² festgestellt (vgl. 2.31/2). Diese recht unterschiedlichen und vergleichsweise niedrigen Werte zeigen zur Probenahmetiefe und zum Gefüge keinerlei Beziehungen, sondern streuen ohne erkennbare Zusammenhänge. Man kann danach nur annehmen, daß die kräftige Oszillation des Eisrandes beim Abschmelzen, die sich in einer Auflösung des Schichtenverbandes in Einzelschollen und in der Bildung von Toteisstauchmoränen äußerte (vgl. 3.515), einen örtlich sehr unterschiedlichen dynamischen Einfluß ausgeübt hat. Dieser dynamische Einfluß kann sowohl verfestigend als auch entfestigend gewirkt haben. Hinzu kommen noch Auflockerungserscheinungen als Folge des Tauvorganges nach dem Abschmelzen des letzten Eises.

Da beide Tendenzen entgegenlaufen, könnte man — wobei allerdings die Höhe ihrer jeweiligen Einflußnahme völlig unberücksichtigt bleibt — den Versuch machen, aus den Werten für p_v eine mittlere geologische Vorbelastung zu errechnen, die im vorliegenden Falle zwischen 3 und 4 kp/cm² liegt. Setzt man dabei eine mittlere Entnahmetiefe von 8 m an und die erodierte Schichtmächtigkeit willkürlich mit etwa 2 m fest — bei einem gleichbleibenden mittleren Feuchtraumgewicht von 2,2 t/m³ —, so käme man zu einer Mächtigkeit des überlagernden Eises von etwa 10 m! Während des Abschmelzvorganges kann eine solche geringe Mächtigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt natürlich vorhanden gewesen sein, keinesfalls aber während der größten Ausdehnung des Eisvorstoßes.

Diese Ausführungen zeigen ebenfalls, daß eine Festlegung der Eisdicke mit Hilfe der aus Zusammendrückungsversuchen ermittelten geologischen Vorbelastung auf kaum lösbare Schwierigkeiten stößt, da mehrere Unbekannte vorliegen. Das trifft im besonderen Maße auf Schichtfolgen zu, die durch starke Eisrandbewegungen während des Abschmelzens in ihren Lagerungsverhältnissen gestört wurden, was von den glazigenen Sedimenten selbst in noch stärkerem Maße widergespiegelt wird.

3.7 Die Gewinnbarkeit der untersuchten Lockergesteine

Das Lösen eines Gesteins aus dem durch die geologischen Verhältnisse geschaffenen Verband bezeichnet man als Gewinnbarkeit, deren Feststellung eine wichtige Grundlage für die Aufstellung des Leistungsverzeichnisses bei Erdarbeiten darstellt. Die Gewinnbarkeit der verschiedenen Gesteine ist abhängig von Kornaufbau, Härte, Zähigkeit und vor allem von der Gefügebildung, bei Lockergesteinen noch vom Wassergehalt und bei Felsgesteinen von den tektonischen Einflüssen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß es für die Gewinnbarkeit eines bestimmten Gesteines keinen feststehenden Maßstab gibt. Nur in Abhängigkeit von den Lagerungsverhältnissen, der Gefügebildung, des Verwitterungszustandes und des mineralogischen Aufbaues kann jeweils die Einstufung in die einzelnen Gewinnungsklassen erfolgen.

3.71 Bodenklassen

Die für die DDR gültige Einteilung der Bodenklassen basiert auf der Angabe von Lösegeräten und charakteristischen Gesteinsarten. Danach werden 10 verschiedene

Tabelle 9

Boden- klasse	Lösegerät	Charakteristische Gesteinsart	
		allgemein	Beispiel
1	Schöpfgefäße	schlammiger — schwimmender Boden	Triebsand
2	Schaufel	leichter Boden ohne nennenswer- ten inneren Zusammenhang	loser Sand Kiessand, trockene, lose Asche
3	Schaufel z. T. Spaten	mittlerer Boden mit geringem inne- rem Zusammen- hang	lehmiger, toniger Sand, Kies, Torf, Moor- und Marschboden
4	Spaten, z. T. Breithacke	schwerer Boden mit starkem, innerem Zusammenhang	sandiger Lehm, Ton, nasser, fest- gelagerter Sand, leichter Mergel- und Kleiboden, loses Felsgeröll
5	Kreuz- und Breithacke	Hackboden mit starkem inneren Zusammenhang	festgelagerter Lehm und Ton, middle- rer-schwerer Mergelboden, verwittertes Trümmergestein, am Spaten klebender nasser Lehm und Ton
6	Spitz- und Kreuzhacke	Hackfelsen	fester Mergelboden, schieferartiger Fels, Kalkmergel, Konglomerate, Steine, Kreide, weicher Sandstein
7	Bruchstangen, Keile, Auf- bruchhämmer	schwerer Hack- und Brechfelsen	Schiefergestein, nicht kompakter klüftiger Felsen
8	Sprengstoff	leichter Sprengfelsen	weicher Sand- und Kalkstein Tonschiefer Konglomerat
9	Sprengstoff	mittlerer Sprengfelsen	Kalk- und Sandstein schwere Konglomeratgesteine mit bindigen Bodenarten versetzter Fels
10	Sprengstoff	schwerer Sprengfelsen	Fels in Bänken, harter Kalkstein, Gra- nit, Syenit, Basalt, Diabas, kristalliner Schiefer, Gneis, Quarzit

Bodenklassen unterschieden, die im Festpreiskatalog „Erd- und Felsarbeiten“ aufgeführt und mit der Preisverordnung 412 verbindlich festgelegt sind (Tabelle 9). Diese Einteilung zeigt gegenüber der DIN 1962, der TVE (Reichsautobahn) und den Arbeitsnormen für die Bauindustrie (Mai 1949) bereits erhebliche Vorteile [7]. Als

schwerwiegender Mangel ist jedoch die Angabe von Bodenarten als Beispiel zu werten, da hierdurch eine unbeeinflusste Urteilsbildung erschwert wird, zumal die außerordentlich wichtigen Fragen der Lagerungsverhältnisse und Gefügebildung, der Zusammensetzung und Konsistenz unberücksichtigt bleiben. Außerdem fehlt die Angabe der Leistung, deren große Bedeutung für die Einteilung der Bodenklassen als einzig entscheidender Maßstab besonders von KEIL [8] gewürdigt und begründet wird.

3.72 Einteilung der untersuchten Lockergesteine

Die durch die Geländeuntersuchungen und bodenmechanischen Laboratoriumsversuche erworbenen Kenntnisse der verschiedenen Klützer und Altenburger Lockergesteine gestatten ihre Einordnung in die erwähnten Bodenklassen.

Sande Klütz

Die untersuchten Feinsande besitzen nur im kapillardurchfeuchteten Zustand einen gewissen geringen inneren Zusammenhang. Der sehr kleine Anteil an Körnungen $< 0,06$ mm und die übrigen bodenphysikalischen Kennwerte weisen darauf hin, daß keine echte Kohäsion vorhanden ist. Der geringe Kalkgehalt wirkt nicht verkittend. Die Feinsande sind danach der Bodenklasse 2 zuzuordnen.

Schluffe Klütz

Die Schluffe zeigen einen geringen Bindigkeitsgrad, was sowohl in den niedrigeren Wasserwerten zum Ausdruck kommt als auch in den kleinen Werten für die Kohäsion. Dieser Lockergesteinstyp besitzt demnach bereits eine gewisse Verbandsfestigkeit, die eine Einordnung in die Bodenklasse 3 rechtfertigen. Die als Stau-beckenabsätze gedeuteten tonig-schluffigen Sedimente vom Profil 13 haben einen größeren inneren Zusammenhang und reichen infolge ihrer massigen, ungegliederten Gefügebildung in die Bodenklasse 4 bis 5 hinein.

Geschiebemergel Klütz

Bei einem typischen Mischlockergestein, wie es der Geschiebemergel darstellt, kommt die Unzulänglichkeit der heute noch üblichen Bodenklasseneinteilung klar zum Ausdruck. So würden folgende zu den Bodenklassen 3, 4, 5 und 6 gehörende charakteristische Bodenarten auf den Geschiebemergel mit seiner in gewissen Grenzen schwankenden Zusammensetzung passen:

lehmiger, toniger Sand
sandiger Lehm und Ton
festgelagerter Lehm und Ton
mittlerer bis schwerer Mergelboden
am Spaten klebender nasser Lehm und Ton
fester Mergelboden

Weitere nicht berücksichtigte, aber die Gewinnungsfestigkeit entscheidend beeinflussende Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen Gefügearten: massig, geklüftet und mosaikartig gegliedert. Auch Feuchtigkeitsgehalt und Kalkgehalt des Materials wechseln und ergeben jeweils andere Festigkeitseigenschaften. Hier zeigt sich sehr gut, daß nur die Berücksichtigung der Leistung einen brauchbaren Maßstab liefern könnte. Als Lösegeräte kommen in Abhängigkeit von der erwähnten Zusammensetzung, Konsistenz und Gefügebildung, sowohl Breithacke als auch Kreuz- und Spitzhacke in Frage. Danach ist der Geschiebemergel vom Klütz-Höved bei geklüfteter und gegliederter Ausbildung, normaler Zusammensetzung — wie sie auf den Seiten 51 — 58 dargestellt wurde — und einem Wassergehalt etwas über der Ausrollgrenze, wie er in normalfeuchten Jahren ebenfalls weitverbreitet ist, in die Bodenklasse 5 einzuordnen. In massiger Ausbildung, einem Wassergehalt unter der Ausrollgrenze (halbfeste bis feste Konsistenz), hohem Gehalt an Tonmineralien oder örtlicher Verkittung durch Kalkausscheidung gehört der Geschiebemergel bereits zur Bodenklasse 6.

Geschiebelehm Klütz

Die zum Geschiebemergel gemachten Ausführungen haben im wesentlichen auch für den Geschiebelehm Gültigkeit. Infolge seines überwiegend geringeren Tonmineralgehaltes, der stärkeren Klüftigkeit und einer gewissen Auflockerung als Folge der Einwirkung der klimatischen Faktoren ist der Geschiebelehm ausschließlich der Bodenklasse 5 zuzuordnen.

Geschiebemergel Altenburg

Auch hier ist in den grundsätzlichen Problemen eine Übereinstimmung mit dem Geschiebemergel Klütz vorhanden. Der höhere Bindigkeitsgrad und die zweifelsohne vorhandene höhere geologische Vorbelastung, die in der über die gesamte Mächtigkeit verbreiteten feinmosaikartigen Gliederung zum Ausdruck kommt, machen trotz dieser Gefügebildung eine Einordnung in die Bodenklasse 6 erforderlich. Die Gewinnbarkeit dieses Materials wird durch eine örtlich bedingte Schwierigkeit noch mehr erhöht. Bei der Gewinnung im weiteren Bereich der Tunnelleitung stand der Geschiebemergel im Zwang. Seine feinverschachtelte, einem Bruchsteinmauerwerk ähnliche Gefügebildung machte hier selbst eine Gewinnung mit dem Bagger unmöglich. Der Geschiebemergel mußte deshalb örtlich durch Auflockerungssprengungen für die Gewinnungsgeräte bearbeitbar gemacht werden, was mindestens seine Einordnung in Bodenklasse 7 notwendig macht. Auch dieser erhöhte Schwierigkeitsgrad als Folge besonders ungünstiger Lagerungsverhältnisse kommt in der heute gültigen Einteilung in Bodenklassen nicht zum Ausdruck und kann nur bei Einführung eines auf der Leistung beruhenden Einteilungsprinzips erfaßt werden.

Geschiebelehm Altenburg

Die stärkere Auflockerung des Geschiebelehmes als Folge der von der Oberfläche her wirkenden klimatischen Einflüsse machen ihn, einen Wassergehalt im Bereich

der Ausrollgrenze vorausgesetzt, leichter gewinnbar als den Geschiebemergel, so daß eine Einordnung in die Bodenklasse 5 gerechtfertigt erscheint. Nach starken Regenfällen nimmt der Geschiebelehm auf Grund seines hohen Tonmineralgehaltes im Gegensatz zum Geschiebemergel sehr viel Wasser auf und gibt es nur sehr langsam wieder ab. In diesem Zeitraum ähnelt der Geschiebelehm einem hochplastischen Ton — was in seinem bodenphysikalischen Verhalten auch deutlich zum Ausdruck kommt — und ist demzufolge auch nur sehr schwer zu gewinnen. In diesem Falle ist wieder eine Zuordnung zur Bodenklasse 6 erforderlich.

3.73

Schlußfolgerungen

Die Ausführungen im letzten Abschnitt zeigen deutlich, welche Schwierigkeiten auftreten, wenn die Bodenarten in die im Festpreiskatalog und in den Technischen Vorschriften für die Ausführung von Erdarbeiten festgelegten und damit für die DDR verbindlichen Bodenklassen eingeordnet werden sollen. Daraus läßt sich ersehen, daß die heute gültige Bodenklasseneinteilung nicht oder nur in geringem Maße den Belangen der Praxis entspricht. Es fehlen klare, eindeutige Hinweise in einer solchen grundlegenden Anordnung, auf der die gesamte Massenabrechnung beruht. Als großer Mangel werden die Angabe von charakteristischen Bodenarten, das Fehlen eines allen Erfordernissen gerecht werdenden Einteilungsprinzips, die Nichtberücksichtigung der Konsistenz eines bindigen Lockergesteines und einer Anzahl weiterer die Gewinnbarkeit beeinflussender Faktoren — wie Lagerungsverhältnisse und Gefügeausbildung — empfunden.

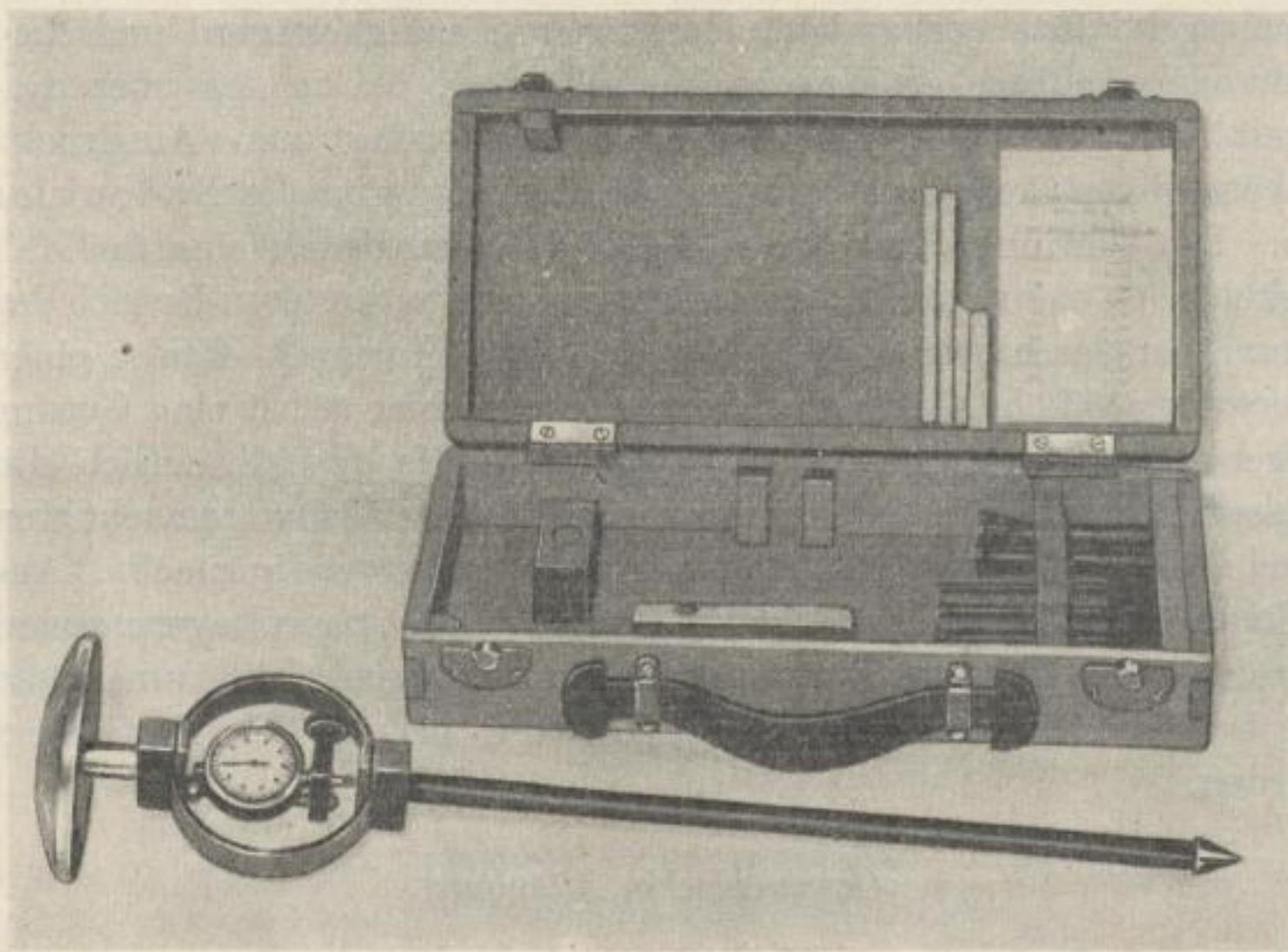


Bild 60. Handsonde nach STEIN

Eine Möglichkeit zur Einordnung der verschiedenen Lockergesteine in die Bodenklassen 1 bis 7 ist auch in der Benutzung von Sonden und der Bestimmung des Eindringungswiderstandes zu erblicken. Hierfür würde sich gut die in allen Straßenbaubetrieben der DDR vorhandene Handsonde mit Ringkraftmeßbügel in der Ausführung nach STEIN (Bild 60) eignen. Selbstverständlich sind auch hier eingehende Versuchsreihen vor einer Einführung in die Praxis vorzusehen.

3.8 Bemerkungen zum Kliffabtrag und zur Kliffsicherung im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved

3.81 Allgemeines

Die mit der Sicherung von Steilküsten zusammenhängenden Probleme sind nur mit Hilfe verschiedener naturwissenschaftlicher und technischer Arbeitsmethoden zu lösen. Dazu gehören vor allem solche der Geologie, Hydrologie, Ingenieurgeologie, Bodenmechanik und Bautechnik. Besondere Bedeutung kommt dabei der Bodenmechanik zu, da nur diese Disziplin Kennwerte liefert, mit denen die Fragen der Standsicherheit von Kliffböschungen bzw. deren Rutschempfindlichkeit beantwortet werden können. Außerdem gestattet die bodenphysikalische Untersuchungsmethode die Durchführung von Modellversuchen — z. B. der Zerfallsempfindlichkeit und Frostveränderung — und die Übertragung dieser Ergebnisse mit hinreichender Genauigkeit auf die Praxis.

Die eingehenden Kenntnisse vor allem des bodenphysikalischen Verhaltens der im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved aufgeschlossenen weichselezeitlichen Schichtenfolge macht es möglich, die Probleme des Abtrages und der Sicherung der dortigen Steilküste zu untersuchen und allgemein auszuwerten. Nicht zuletzt gestattet der erst in jüngster Zeit angelegte bis zu 25 m tiefe Einschnitt in Ablagerungen der Elstereiszeit bei Altenburg interessante Vergleichsmöglichkeiten vor allem auf dem Gebiet der Böschungssicherung.

Die in den folgenden Abschnitten verwendeten küstenkundlichen Begriffe entsprechen der von v. BÜLOW [30] vorgeschlagenen Terminologie.

3.82 Physiographische Einteilung von Lockergesteinssteilküsten

3.821 Grundlagen

In Steilküstengebieten sind im allgemeinen zwei, in ihrem Erscheinungsbild verschiedene Klifftypen festzustellen, die durch laufende Übergänge miteinander verbunden sind, und zwar das völlig unbewachsene, steile, häufig der Meeresabrasion ausgesetzte Kliff, ferner das mit einer zusammenhängenden Vegetationsdecke überzogene, flach abfallende Kliff, das einen hohen Vorstrand aufweist. Die Übergangsformen zeigen unterschiedliche Vegetationsbedeckung und Vorstrandbreite, einen relativ steilen Böschungswinkel und unterliegen bevorzugt der Abtragung durch klimatische Faktoren. Für die genannten Typen haben sich im Laufe der Zeit die

Bezeichnung „aktives“, „inaktives oder totes“ und „schwach oder zeitweise aktives“ Kliff eingebürgert. Trotz der Mängel, die diesen Beziehungen anhaften, werden sie auch heute noch recht häufig gebraucht.

In jüngster Zeit hat KANNENBERG [31] bei seinen Untersuchungen der schleswig-holsteinischen Ostseeküste für dieses Gebiet eine Klassifizierung der Steilufer nach der Höhe des Klifffußes — bzw. des Strandes vor dem Kliffuß — über NN durchgeführt. Sein Einteilungsprinzip fußt auf der Tatsache, daß eine Abhängigkeit zwischen den Anfängen einer Vegetationsbedeckung — als entscheidendem Merkmal zur Trennung des sogenannten „aktiven“ Kliffs vom „zeitweise aktiven“ Kliff — und der Höhe des Klifffußes über NN besteht.

Kennt man die obere Grenze der durchschnittlichen Brandungswirkung in einem Gebiet, die sich aus der Häufigkeit und Höhe der Hochwässer ohne weiteres ermitteln läßt, kann man auch angeben, welche Höhe der Kliffuß über NN haben muß, damit sich eine gewisse Vegetation ohne Störung durch häufige Meeresüberflutung ansiedeln kann. Nur die sehr seltenen hohen Hochwässer (HHW) ändern dieses Bild für kurze Zeit. Unter Auswertung des Pegels Lübeck und eines mittleren Wellenfaktors konnte KANNENBERG als durchschnittliche Höhe der Hochwasserwirkung auf die Steilküsten im Bereich der Lübecker Bucht ein Niveau von ca. 1,5 m über NN feststellen.

Nach diesen hier nur kurz skizzierten Gesichtspunkten lassen sich drei relativ einfach voneinander zu trennende Klifftypen unterscheiden, in die sich alle Kliffformen gut einordnen lassen, die in einem Steilküstengebiet vorhanden sind. (Tabelle 10).

Tabelle 10

	Abbruchssteilufer	Ausgleichsteilufer	Anlandungssteilufer
Bisherige Bezeichnung	aktives Kliff	schwach oder zeitweise aktives Kliff	inaktives oder totes Kliff
Kliffußhöhe über NN	< 1,5 m	> 1,5 m	> 1,5 m
Vegetation	vereinzelt vorhanden	in unterschiedlicher Stärke vorhanden	völlig zugewachsen
Böschungsverhältnisse	steil und im Abtrag	Ausgleich wird angestrebt	Ausgleich abgeschlossen
Hauptabtragungsfaktor	Meeresabrasion	Klimatische Faktoren	kein Abtrag mehr
Verhältnisse in der küstennahen Zone	vorherrschende Abtragung	vorherrschende Durchfrachtung	vorherrschende Ablagerung

3.822 *Verbreitung der drei Klifftypen im Gebiet des Klütz-Höved*

Die erläuterte Einteilungsmethode wurde im Steilküstengebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved angewendet. Die dazu notwendigen Höhen des Klifffußes über NN konnten aus der Seekarte des SHD abgegriffen bzw. mußten durch Messung der Strandbreite und des Strandneigungswinkels bestimmt werden. Als Maß der durch-



Bild 61. Ausgleichsteilufer (Gebiet Kl.-Klütz-Höved)



Bild 62. Abbruchssteilufer (Gebiet Gr.-Klütz-Höved)

schnittlichen Höhe der Hochwasserwirkung kann auch für das Gebiet von Klütz-Höved mit hinreichender Genauigkeit der Wert von 1,5 m über NN angenommen werden. Daraus ergibt sich folgendes Bild (vgl. Bild 70).

Der überwiegende Teil des Kliffs zwischen Rosenhagen und Boltenhagen ist als Ausgleichsteilufer (Bild 61) anzusprechen. Bewuchs ist in diesen Abschnitten immer vorhanden und bedeckt das Kliff in wechselnder Stärke. Die Böschungen sind als Folge der Erosionserscheinungen von Grund- und Oberflächenwasser mehr oder weniger abgeflacht und liegen im allgemeinen zwischen 35 und 42° , bei einem durchschnittlich 20 m hohen Kliff. Dabei wird etwa die Hälfte der Kliffhöhe von abgebrochenem Gesteinsmaterial eingenommen (Kliffhalde).

Nur einige kurze Abschnitte des Küstengebietes können als Abbruchsteilufer (Bild 62) bezeichnet werden. Sie sind im allgemeinen unbewachsen. Die Böschungen sind steil 55 — 80° , der Vorstrand ist relativ schmal und Kliffhalden sind nur örtlich in geringer Mächtigkeit vorhanden. Es handelt sich dabei um folgende Abschnitte:

- N-Spitze Kl.-Klütz-Höved (Bereich des Profiles 7)
- N-Spitze Gr.-Klütz-Höved (Bereich des Profiles 12)
- E-Flanke Gr.-Klütz-Höved (nördlich Profil 14)

Die noch an einigen Punkten in der Karte angegebenen Werte unter 1,5 m haben ihre Ursache in mächtigen Kliffhalden, die einen Teil des Strandes überlagern und dadurch eine geringe Kliffußhöhe über NN vortäuschen.

Typisches Anlandungsteilufer (Bild 63) mit dichtem und zusammenhängendem Bewuchs, flacher Böschung und meistens breitem Vorstrand läßt sich ebenfalls nur auf kürzere Strecken verfolgen, und zwar in folgenden Abschnitten:



Bild 63. Anlandungsteilufer (Gebiet Kl.-Klütz-Höved)

- Mittelteil Kliff Rosenhagen (Bereich des Profiles 1)
 W- und E-Abschnitt Kliff Hohenhöft (weiterer Bereich des Profiles 7)
 NE-Spitze Kl.-Klütz-Höved (Bereich östlich des Profiles 7)
 NW-Spitze Gr.-Klütz-Höved (Bereich östlich des Profiles 11)
 Kliff nördlich Boltenhagen (Bereich südlich des Profiles 14)

3.823 *Morphologie der Steilküste im Gebiet des Klütz-Höved*

Auffällige Abweichungen vom schwach geschwungenen Verlauf der gesamten Küstenlinie zwischen Rosenhagen und Boltenhagen/Redewisch zeigt die Kliffkante mit einem fast zickzackähnlichen Verlauf (vgl. Bild 61). Die Ursache dafür liegt in der Erosionswirkung des oberflächlich abfließenden oder am Kliff als Grundwasser austretenden Niederschlagswassers in Verbindung mit dem wechselnden Kliffaufbau. So beginnt die vom Oberflächenwasser hervorgerufene Erosion der Kliffkante bei einer zentimeterbreiten und -tiefen Einkerbung (Bild 64) und kann nach Durchlaufen aller Zwischenstadien (Bild 65) bis zu einer mehrere Meter breiten und tiefen Eintalung in Form einer dauernd wasserführenden Bachmündung (Bild 66) fortschreiten. Das Grundwasser verursacht indessen an seiner Austrittsstelle am Kliff eine sich bis zur Kliffkante fortsetzende flache nischenähnliche Einbuchtung (Bild 67), deren Größe anfangs nur wenige Meter beträgt, die sich aber zu einer sogenannten „Kesselbucht“ bis zu 50 m Durchmesser vergrößern kann. Die Kesselbuchten sind oft bis zu beträchtlicher Höhe mit abgerutschten Erdschollen und niedergebroschenem stückigem Gesteinsmaterial angefüllt. Es kommt auch vor, daß sich mehrere solcher Kesselbuchten — nur getrennt durch vorspringende, die ursprüngliche Lage der Kliffkante anzeigende „Pfeiler“ — aneinanderreihen und die niedergestürzten Gesteinsmassen sich zu einer durchgehenden einige hundert Meter langen und mehrere Dekameter tiefen oft dicht bewachsenen „Großterrasse“ vereinen, wie sie im Gebiet zwischen Brook und Warnkenhagen ausgeprägt sind. Hier kommt es dann auch zum Abbruch großer zusammenhängender Erdschollen. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß die hangenden Teile des Steilufers unterhalb der Kliffkante — sofern sie aus Geschiebemergel oder -lehm bestehen — im gesamten Küstengebiet fast senkrechte Wände von 5 bis 10 m Höhe bilden. Nur die Kliffabschnitte, die mit einer dichten zusammenhängenden Vegetationsdecke überzogen sind, zeigen keine Erosionserscheinungen.

Das Vorhandensein eines Grundwasserhorizontes oder sein Fehlen und die sich daraus ergebende mächtige oder geringmächtige Kliffhalde aus abgebrochenem und abgerutschtem Gesteinsmaterial, fernerhin eine dichte Vegetationsdecke, sind auch die Ursachen dafür, daß sich die Böschungsquerprofile im gesamten untersuchten Küstengebiet auf drei Grundformen zurückführen lassen, nämlich auf

- das Kliff mit auffälligem Böschungsknick in wechselnder Höhe und einer mächtigen Kliffhalde (Bild 68),
- das etwa gleichmäßig steil-geböschte Kliff mit einer geringmächtigen Kliffhalde (Bild 69) und
- das gleichmäßig flachgeböschte und dicht bewachsene Kliff ohne Kliffhalde (vgl. Bild 63).



Bild 64. Erosions-
einkerbung am Kliff



Bild 65. Erosions-
rinne am Kliff



Bild 66. Bachmün-
dung Hafthagen
(Gr.-Klütz-Höved)



Bild 67. Nische im Kliff



Bild 68. Kliff mit Böschungsknick



Bild 69. Gleichmäßig steil geböschtes Kliff

9*

Der sich dabei in jedem Einzelfalle einstellende Böschungswinkel ist abhängig von den bodenphysikalischen Eigenschaften, dem jeweils vorhandenen Wassergehalt und den Gefügeverhältnissen der anstehenden Lockergesteine (vgl. 3.842.3). Er schwankt mit wechselndem Wassergehalt.

3.83 Die Stärke des Küstenrückganges im Gebiet des Gr.- u. Kl.-Klütz-Höved

3.831 *Ermittlung des Rückganges durch Kartenvergleich*

Die bisher bekanntgewordenen Angaben [32/33] über die Beträge des jährlichen Rückganges des Steilküstengebietes vom Klütz-Höved beruhen auf Schätzungen oder auf der Festlegung von Durchschnittswerten. Um zu genauen Werten über den bisherigen Landverlust als Folge der Böschungsrutschungen und der Abrasion in diesem Gebiet zu kommen, wurde ein Kartenvergleich durchgeführt. Dazu standen die Meßtischblätter Travemünde (2031), Kalkhorst (2032), Hohenkirchen (2033), Warnkenhagen (1932) und Gr.-Klütz-Höved (1933), die in den Jahren 1879 bis 1904 aufgenommen sind, zur Verfügung. Entgegenkommenderweise gestattete der SHD Stralsund — Dänholm — dem Verfasser die Anfertigung einer Transparentpause des Küstenverlaufes aus der im Jahre 1954 aufgenommenen Seekarte. Von dieser im Maßstab 1:10000 vorliegenden Karte wurde mittels Pantograph ein Blatt 1:25000 hergestellt. Durch koordinatengleiche Übereinanderzeichnung beider Karten ist es möglich, den im genannten Zeitraum im Küstengebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved erfolgten Küstenrückgang genau festzustellen (Bild 70). Vergleichsbasis bildete dabei in erster Linie die Kliffkante, da die Lage des Klifffußes jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist.

Das Hauptgebiet der Abtragung im Untersuchungsgebiet liegt danach im weiteren Bereich des Gr.-Klütz-Höved, zwischen den Orten Boltenhagen/Redewisch und Hafthagen. Hier erreichte der Küstenrückgang Werte zwischen 50 und 100 m in den vergangenen 60 bis 80 Jahren. Weiter nach Westen in Richtung auf die Nordspitze des Kl.-Klütz-Höved nimmt der Küstenrückgang kleinere Werte an. Er liegt im Mittel bei 50 m während des Vergleichszeitraumes.

Unmittelbar an der Nordspitze des Kl.-Klütz-Höved bis zum Beginn des Rutschungsgebietes zwischen Warnkenhagen und Brook (Großterrasse) beträgt der Abtrag etwa 50 m.

Im daran nach W anschließenden Rutschungsgebiet ist die Kliffkante bis zu 75 m in den letzten 60 bis 80 Jahren zurückverlegt worden, während die Strandlinie durchschnittlich 50 m seewärts gewandert ist als Folge der Fließbewegung der aufgeweichten abgerutschten Massen. Nur im Gebiet der Weg- und Bachmündung Warnkenhagen ist die Strandlinie bis zu 20 m zurückgewichen. Die Ursache dürfte in der veränderten Streichrichtung der Küste (E-W) zu suchen sein.

Zwischen Brook und Gr. Schwansee lassen sich — von kleineren Strandlinienvorverlegungen im Gebiet des Kliffes „Hohenhöft“ abgesehen — keine Änderungen des Küstenverlaufes feststellen.

Im Gebiet westlich Gr. Schwansee bis zur Grenze Deutsche Demokratische Republik/Bundesrepublik ist im wesentlichen eine Ansandung zu verzeichnen, die in den letzten 60 bis 80 Jahren bis zu 75 m betrug. Diese Ansandung nimmt in Richtung auf den Priwall zu.

Auf die Ermittlung und Angabe von Mittelwerten der jährlichen Abtragung wurde verzichtet, da sie infolge der in mehrjährigen Abständen vorkommenden Sturmfluten mit einer außerordentlich hohen Abrasionswirkung ein falsches Bild ergeben müssen. So teilt B. ROGGE [34] mit, daß während der Sturmflut am 13. 1. 57 im Gebiet des Gr.-Klütz-Höved Abbrüche bis zu 2,5 m zu verzeichnen waren.

3.832 *Zusammenhänge zwischen Änderung des Küstenverlaufes, Kliffaufbau und Kliffotyp*

Mit Hilfe des Kartenvergleiches erkennt man, daß der am weitesten nach Nordosten — und damit zur offenen Ostsee — exponierte Küstenteil den stärksten Rückgang aufweist. Die im inneren Teil der Lübecker Bucht — etwa vom Kl.-Klütz-Höved an — gelegenen Kliffabschnitte zeigen dagegen — nach Westen in zunehmendem Maße — geringe Abtragungerscheinungen. Eine wesentliche Ursache dafür dürfte, wie die Auswertung der meteorologischen Statistiken ergibt, darin liegen, daß Stürme mit Windstärken über 8 vorwiegend aus NE-Richtung wehen. Außerdem haben nur NE-Winde genügend Wasserfläche vor sich, um Hochwasserwirkungen erzielen zu können.

Unterschiede in der Stärke des Rückganges bei einem mehrschichtigen oder nur aus Sanden und Schluffen bestehenden Kliffaufbau lassen sich nicht nachweisen. Der Aufbau allein aus Geschiebemergel setzt der Zerstörung jedoch wesentlich stärkeren Widerstand entgegen, was an dem einzigen nur aus Geschiebemergel bestehenden Kliffabschnitt etwa 1 km nördlich Ortsausgang Boltenhagen/Redewisch gut zu erkennen ist. Hier weist der Küstenrückgang mit nur etwa 25 m in den letzten 60 bis 80 Jahren den weitaus geringsten Wert im gesamten Gebiet des Gr.-Klütz-Höved (vgl. Bild 70) auf.

Die nach dem Vorschlag von KANNENBERG durchgeführte Gliederung des Steilküstengebietes Klütz-Höved in verschiedene Kliffotypen in Abhängigkeit von der Kliffußhöhe über NN stimmt gut mit dem Bild überein, das durch den Kartenvergleich ermittelt wurde. So weisen die als Abbruchsteilufer bezeichneten Kliffabschnitte den größten Rückgang auf. Die Anlandungssteilufer zeigen keine oder nur geringe Änderungen im Küstenverlauf gegenüber der Vermessung vor 60 bis 80 Jahren. Es kann sogar an einigen Stellen — so im Bereich des „Hohenhöft“ und des Kliffes Rosenhagen vorkommen, daß die Kliffkante bei der Vermessung 1954 mehrere Meter weiter seewärts angegeben wurde als vor etwa 60 bis 80 Jahren. Die Ursache dafür ist im dichten, verfilzten und teilweise durch Stranddorn völlig unzugänglich gewordenen Bewuchs zu suchen, der oftmals ein genaues Festlegen der Lage der Kliffkante unmöglich macht. Der Küstenrückgang im Bereich der Ausgleichsteilufer ist abhängig von der Lage des gesamten Küstenabschnittes zur

Angriffsrichtung der See und damit von der Wirksamkeit der Meeresabration, die für einen dauernden Abtransport der Lockermassen sorgen, die durch die Einwirkung der klimatischen Faktoren abbrechen und abrutschen. Besonders gut ist diese Tatsache im Gebiet der durch abgerutschte Massen entstandenen „Großterrasse“ zwischen Brook und Warnkenhagen zu erkennen. An diesem gegenüber einem direkten Angriff der See geschützt liegenden Küstenteil (WSW-ENE-Streichrichtung, konnten sich infolge starken und verbreiteten Grundwasseraustrittes die abgerutschten Massen anhäufen und zu einer zusammenhängenden Terrasse sammeln (vgl. Bild 71 a). Hier ist ein Zustand eingetreten, in dem ein Kliffabschnitt auf Grund der nur geringen Abrasionswirkung in den eigenen Abrutschmassen ‚ertrinkt‘. Die immer weiter zur Strandlinie gleitenden oder fließenden Massen verdecken oft vollkommen den Strand und werden schon bei Niedrigwasser von der See bespült. Die geringe Wirksamkeit des benetzenden Wassers auf Geschiebemergel mit einem Wassergehalt nahe der Fließgrenze (vgl. Abschn. 3.11 und Bild 47) ist die Ursache für die sehr langsame Zersetzung und den langsamen Abtransport dieser Massen durch das Meer. Die besonders starke Angriffswirkung der See auf Küstenteile mit einer Streichrichtung W-E bis

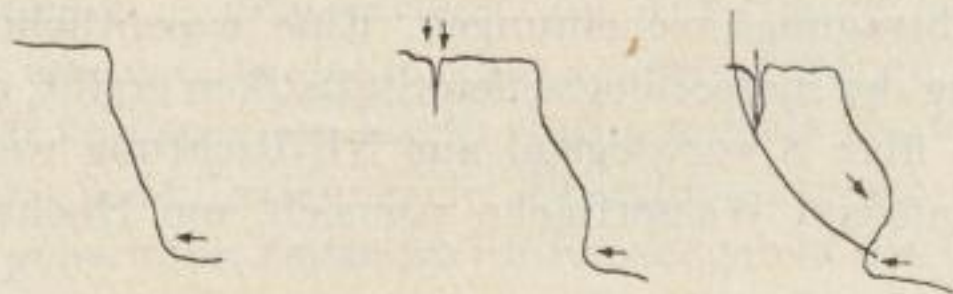


Bild 71 a. Schematische Darstellung der Kliffabtragung beim Abbruchsteilufer

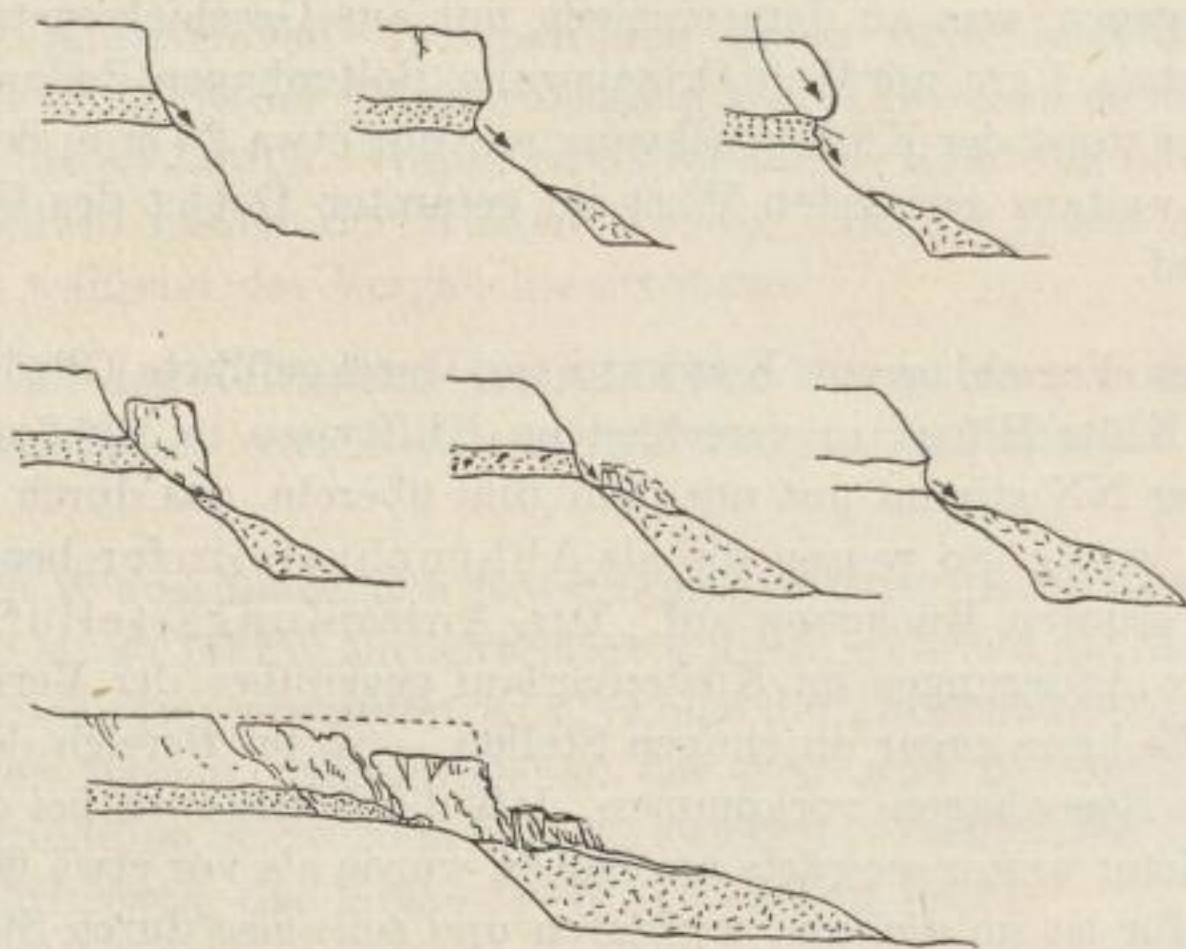


Bild 71 b. Schematische Darstellung der Kliffabtragung beim Ausgleichsteilufer. Skizze 7: Staffelbrüche bei geringer Wirksamkeit der Abrasion

NW-SE macht sich besonders im Bereich der Bachmündungen bemerkbar. Trotz der Erhöhung der Schorre in diesen Abschnitten als Folge des von den Bächen mitgeführten und im Mündungsgebiet zum Absatz gekommenen Materials ist hier im allgemeinen ein Rückgang der Küstenlinie zu verzeichnen.

3.833 *Der Landverlust in den vergangenen 60 bis 80 Jahren im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved*

Das gesamte Küstenhinterland (Kliffhochfläche) im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved wird, abgesehen von kleineren hier zu vernachlässigenden Waldstücken, landwirtschaftlich genutzt. Der vorzugsweise an der Oberfläche anstehende Geschiebelehm verbürgt die gute Qualität des Bodens. In den zurückliegenden 60 bis 80 Jahren gingen in dem Gebiet zwischen Brook und Boltenhagen/Redewisch, das einer Abtragung unterliegt, unter Zugrundelegung der durch den Kartenvergleich erhaltenen Werte, ein Gebiet von rund 0,357 km² landwirtschaftlicher Nutzfläche verloren.

Nimmt man einen mittleren Bodenpreis von 0,25 DM/m² an², so beträgt der wirtschaftliche Schaden im Steilküstengebiet des Kl.- und Gr.-Klütz-Höved etwa 90000 DM.

3.84 Böschungsrutschungen als Hauptform des Steilküstenabtrages

3.841

Die auftretenden Rutschungen

Jede Rutschung kann man unter Berücksichtigung der Stabilitätsverhältnisse als Geländebruch (Hang- oder Grundbruch) mit einer horizontalen und vertikalen Verlagerung der Massen bezeichnen, die dabei aufgelockert und somit entfestigt werden. Grundsätzlich müssen beim Auftreten einer Rutschung die abschiebenden, treibenden Kräfte größer sein als der Gleitwiderstand.

Im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved sind ausschließlich Hangbrüche verbreitet, die nach ihrem Auftreten in Oberflächen- und Tiefenrutschungen zu trennen sind. Nach der Einteilung von KEIL [8] gehören sie in die Gruppe der rekurrierenden Rutschungen, die sich sowohl in Kriech- und Gleitbewegungen als auch in abrupten Abbrucherscheinungen äußern.

3.842

Die Ursachen der Rutschungen

3.842.1

Allgemeines

Die Ursachen der Rutschungen lassen sich nach KEIL [8] zurückführen auf

1. Veränderung der Auflast bei gleichbleibender Gefügebeschaffenheit,
2. Veränderung der Gefügebeschaffenheit,
3. Veränderung des hydrostatischen Seitendruckes.

Nach Angaben der Abt. Finanzen/Preise d. Rates d. Kreises Grevesmühlen liegen die Kosten für Ackerland zwischen 0,10 u. 0,12 DM/m², für Bauland zwischen 0,40 u. 0,50 DM/m². Als Mittelwert wurde 0,25 DM/m² angenommen.

Im Gebiet des Gr.- und Kl.-Klütz-Höved sind diese drei Hauptursachen zusammenwirkend feststellbar. Im einzelnen handelt es sich dabei um folgende Faktoren:

Unterspülung des Kliffußes	(zu Gruppe 1)
Frostsprengung	
Wasseranreicherung in den feinkörnigen Erdarten durch Frost	
Auftrieb im Grundwasserhorizont	(zu Gruppe 2)
Wasserübersättigung der bindigen Lockergesteine	
Grundwasserstau infolge unregelmäßigen Kliffaufbaues	(zu Gruppe 3)

Rutschungsfördernd wirken dabei Klüftung und feinmosaikartige Gliederung des Geschiebemergels sowie ein mehrschichtiger (inhomogener) Aufbau des Kliffs aus bindigen und nichtbindigen Lockergesteinen.

Im folgenden werden die Ursachen der Rutschungen unter Berücksichtigung aller erwähnten Faktoren zusammenfassend dargestellt, um darauf aufbauend die Frage der Standsicherheit der Kliffböschungen mit Hilfe von Gleitsicherheitsberechnungen zu untersuchen. Diese Darstellungsweise verläßt bewußt die in der küstengeologischen Literatur [19, 30, 31] bisher übliche Methode einer getrennten Erläuterung der Wirkung von Abrasion, Erosion und Klima, um die wichtigen Fragen der Stabilitätsänderungen klar herausarbeiten zu können.

3.842.2 *Die stabilitätsmindernden Faktoren und ihre Wirkung auf das Steilufer*

An Steiluferabschnitten, die vorwiegend der Zerstörung durch die Abrasionswirkung des Meeres ausgesetzt sind, müssen die Vorgänge, die zur Auslösung von Rutschungen und Abbrüchen führen, andere sein als an Kliffabschnitten, die nur bei Hochwässern oder Sturmfluten von der See bespült werden.

Abbruchssteilufer

So erfolgt der Abtrag der Abbruchssteilufer fast ausschließlich über eine allmähliche Versteilung und in manchen Fällen auch Unterhöhlung des Kliffußes bis zu einer Höhe, die der Höhe der Wellen entspricht. Erst nach Überschreiten eines kritischen Punktes des Böschungswinkels (vgl. 3.842.3), der vom Kliffaufbau (ein- oder mehrschichtig), von den Materialeigenschaften (Scherfestigkeit, Gefüge) und von der Uferhöhe abhängig ist, brechen die hangenden Kliffteile — sofern sie aus bindigem Material bestehen — schalenförmig ab (Bild 71 a). Sie werden durch den Wellenschlag und die benetzende Wirkung des Seewassers aufbereitet und abtransportiert.

Vor Beginn des Abbruchs bilden sich in einer gewissen vor allem von der natürlichen Gliederung des anstehenden bindigen Lockergesteines und der Uferhöhe abhängigen Entfernung von der Kliffkante in der Kliffhochfläche Zugrisse. Durch Eindringen von Niederschlagswasser in diese sich immer mehr öffnenden Spalten und Fugen und dem dabei auftretenden hydrostatischen Druck wird der Abbruch beschleunigt.

Der Abtrag des Kliffußes hängt von den Materialeigenschaften (Kohäsion) und vor allem vom Gefüge der anstehenden Lockergesteine ab. Die hohe Kohäsion des stark vorbelasteten Geschiebemergels (vgl. 2.31) setzt dem Angriff des benetzenden

Wassers starken Widerstand entgegen. Begünstigend für den Angriff des Wassers wirken dagegen Klüftung oder gar feinmosaikartige Gliederung, Sandlinsen und -schmitzen und eine durch Frost hervorgerufene Auflockerung der Oberfläche. Völlig anders verhält sich ein Steilufer mit einer am Kliffuß austretenden Sand- oder Schluffschicht. Das Fehlen oder die geringe Größe der Haftkräfte zwischen den Körnchen und die entsprechende leichte Benetzbarkeit bewirken einen wesentlich schnelleren Abtrag des Materials durch das Meer.

Ein eventuell vorhandener Austritt von Grundwasser aus sandigen Zwischenlagen muß naturgemäß den Abtrag eines Abbruchsteilufers beschleunigen, wenn auch die Kliffußabration die Hauptursache der Zerstörung ist.

An einem nur aus Sanden aufgebauten Abbruchsteilufer wird sich der charakteristische natürliche Böschungswinkel — etwa zwischen 35 und 40° — nach Abtragung des Kliffußes durch nachstürzende Massen bald wieder einstellen. Nur kurze Zeit können die durch die Durchfeuchtung hervorgerufenen Kapillarkräfte (scheinbare Kohäsion) eine Versteilung des Kliffußes bewirken. Schollenabbrüche sind infolge der nicht vorhandenen Kohäsion unmöglich.

Bei niedrigem Wasserstand ist bei einem Abbruchsteilufer neben der geringen Wirkung des aus durchlässigen Schichten ausfließenden Grundwassers vor allem die Schwerkraft bei der Abtragung wirksam, die das anstehende Gestein, das durch die verschiedenen physikalischen und chemischen Kräfte gelockert wurde, zum Strand abstürzen läßt. In einem solchen Zeitraum ist an

Abbruchsteilufern also vorzugsweise die „Destruktion“ v. BÜLWS [35] tätig.

Ausgleichsteilufer

Das homogene — nur aus einem Lockergesteinstyp aufgebaute — Kliff, das nicht dem dauernden Abtrag durch auflaufende Wellen unterliegt, wird ausschließlich durch die Vorgänge der „Destruktion“ zerstört. Die Wirksamkeit des von der Oberfläche herabfließenden Regenwassers ist gering und zeigt sich nur in schmalen Regenrunsen (Bild 72) auf dem Kliff und flachen Erosionskerben in der Kliffkante. Der sich dabei einstellende Böschungswinkel ist abhängig von der durch den jeweiligen Wassergehalt schwanken-



Bild 72. Regenrunsen am Kliff

den Scherfestigkeit des Materials (vgl. 2.31/2.32), seiner Gefügeausbildung und der Stärke des Pflanzenwuchses, der im günstigen Falle einen höheren Zusammenhalt von Teilen der Kliffoberfläche bewirken kann. Die durch die Wirkung der Frostsprengung, des Wurzeldruckes und hydrostatischen Druckes — als Folge der Wassereinwirkung auf der Kliffhochfläche —, des Austrocknens und Feuchtwerdens, Erwärrens und Abkühlens allmählich sich lockernden und schließlich aus dem Verband sich lösenden Gesteinsteilchen folgen der Schwerkraft und stürzen zum Strand ab. Die so entstehende Halde vor dem Kliffuß wird nur von Hochwässern oder Sturmfluten abgetragen. Damit ist der immerwährenden Verflachung des Böschungswinkels eine natürliche Grenze gesetzt.

An einem Ausgleichsufer, das aus bindigen und nichtbindigen Lockergesteinen aufgebaut ist, bietet sich hinsichtlich der Abtragung ein wesentlich anderes Bild. Der schwerdurchlässige Geschiebemergel mit einem Durchlässigkeitskoeffizienten von $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ cm/s ist als Grundwasserstauer wirksam, während in den darin eingelagerten Sanden — mit Werten für den Durchlässigkeitskoeffizienten von $k \geq 1 \cdot 10^{-4}$ cm/s (vgl. 2. 31 und 2.34) — das Grundwasser strömt und entsprechend den jeweiligen Gefälleverhältnissen am Steilrand austritt. Der durch die See im Laufe der Jahrtausende geschaffene vertikale Anschnitt der pleistozänen Schichtenfolge wirkt also als Quellhorizont großen Ausmaßes. Infolge seiner kontinuierlichen Wirksamkeit stellt hier das am Kliff ausfließende Grundwasser den wichtigsten rutschungsauslösenden Faktor dar, indem es durch rückschreitende Erosion (Bild 73) und eine durch Auftrieb hervorgerufene Verringerung der Reibungskräfte in den Sanden den Gleitwiderstand der hangenden Kliffpartien herabsetzt oder gänzlich beseitigt, und so Schollenabbrüche auslöst (Bild 74). Das austretende Grundwasser durchfeuchtet außerdem durch ununterbrochenes Zusickern im Laufe der Zeit sowohl die sich im Liegenden an den grundwasserführenden Horizont anschließenden Kliffpartien als auch die Abbruch- und Abrutschmassen, die einen Teil



Bild 73. Grundwasseraustritt am Kliff



Bild 74. Nachbrechende Kliffpartien über einen Grundwasserhorizont

des Strandes und den Kliffuß bedecken. Durch allmähliche Wasseraufnahme bis in den Bereich der Fließgrenze verlieren sie ihre Kohäsion und einen Teil ihrer Reibungsfestigkeit und gleiten in Form eines „Bergschliffes“ (Bild 75) als typische Oberflächenrutschung zum Strand ab. Die sich am Strand und am Kliffuß anhäufenden Massen werden dann bei Hochwasser durch die Wellenwirkung aufgearbeitet und abtransportiert.

In Bild 71 b wird versucht, die bisher erläuterten Vorgänge schematisch darzustellen.

Zum Entstehen der Bergschlipfe ist zu bemerken, daß die weit verbreiteten schluffigen Lockergesteine schon nach Zuführung einer geringen Menge Wasser — im Gegensatz zum Geschiebemergel — die Fließgrenze überschreiten und abrutschen, was in ihrer Bildsamkeit (vgl. 2.33) begründet ist.



Bild 75. Schlammure am Kliff

Die Größe der vom hangenden Teil des Kliffes abrutschenden und abbrechenden Schollen richtet sich vor allem nach der natürlichen Gliederung der anstehenden Lockergesteine, nach dem Aufbau des Kliffs aus einer Erdart oder mehreren verschiedenen und nicht zuletzt nach dem Abstand zwischen Grundwasserhorizont und Kliffkante. Ist dieser Abstand groß und besteht der hangende Kliffteil nur aus Geschiebemergel, so können die aus dem Verband sich lösenden und abrutschenden Schollen mehrere hundert Kubikmeter Größe annehmen.

Geht auf Grund einer günstigen Lage der Küste zur wirksamen Wellenrichtung der Aufarbeitungsprozeß der sich am Kliffuß ansammelnden Abbruch- und Abrutschmassen sehr langsam vor sich, wie es im Gebiet der „Großterrasse“ zwischen Brook und Warnkenhagen beobachtet werden konnte (vgl. 3.832), so wird die grundwasserführende Sandschicht trotzdem weiter durch Erosion zurückverlegt. Dabei kommt es durch Stauung des Grundwassers zu einer Durchfeuchtung und Aufweichung der liegenden Kliffteile. Im Gebiet zwischen Brook und Warnkenhagen reicht diese Aufweichungszone oft bis fast hundert Meter landeinwärts. Auf diesem plastischen Untergrund gleiten dann die aus Geschiebemergel und -lehm in halbfester Konsistenz bestehenden hangenden Kliffteile in Form von Staffelbrüchen ab (vgl. Bild 71 b, Skizze 7). Oft ist hier infolge der schnell wirksam werdenden Auflast der großen Schollen ein Porenwasserausgleich unmöglich, und es gelten zeitweise die Bedingungen, die bei den Schnellversuchen im Seitendruckgerät künstlich geschaffen wurden. Daraus ist abzuleiten, daß beispielsweise der Geschiebemergel, bereits bei einem Wassergehalt um 20% so gut wie keine Scherfestigkeit mehr aufweist (vgl. Bild 46) und demzufolge bereits bei einer sehr geringen Neigung abrutschen muß.

Besonders stark tritt die Abtragung an einem Ausgleichsteilufer mit mehrschichtigem Aufbau im Frühjahr auf. Die Ursache dafür liegt vor allem in der Frostveränderlichkeit der anstehenden Geschiebemergel, Geschiebelehme und Schluffe. Selbst die Feinsande mit einem geringen Schluffgehalt zeigen — wie nachgewiesen wurde (vgl. 2.34) — geringe frostveränderliche Eigenschaften. Während der Frostperiode entstehen in diesen frostveränderlichen Erdarten Eislinsen parallel zu den Isothermen bis zu einer Tiefe, die sich nach der jeweiligen Frosteindringtiefe richtet. Dabei wird zusätzlich aus der Umgebung Wasser in die Frostzone geführt (vgl. 1.52 und 3.92). Während der Taupriode im Frühjahr tritt dadurch besonders in den Kliffteilen im Liegenden der Grundwasserhorizonte eine plötzliche Wasserübersättigung ($w_n > w_f$) auf, die zur Auslösung einer großen Zahl von Oberflächenrutschungen führt, wobei sich Schlammmassen lavaartig zum Strand hinabwälzen.

Örtlich können an einem Ausgleichsteilufer auch Rutschungen ausschließlich durch die Wirkung des hydrostatischen Seitendruckes ausgelöst werden, und zwar dann, wenn eine in den Geschiebemergel eingelagerte grundwasserführende Schicht vor dem Austritt am Steilufer auskeilt, so daß das Grundwasser gestaut wird, wie es bei dem sehr unregelmäßigen Aufbau der eiszeitlichen Ablagerungen im Gebiet des Klütz-Höved beobachtet wurde.

Das an der Oberfläche abfließende Regen- und Schmelzwasser hat — im Gegensatz zum Grundwasser — keine große Bedeutung für die Abtragung eines Ausgleichsteilufers. Durch Einsickern in Klüfte, Risse und Spalten des Geschiebemergels und -lehmes übt es einen gewissen hydrostatischen Druck aus, dessen Wirkung aber im Vergleich zu den erläuterten Abtragungsfaktoren nur geringe Bedeutung zukommt. Starke Niederschläge, wie sie z. B. während des Sommerhalbjahres 1954 — als im Juli/August fast das Doppelte der mittleren Niederschlagshöhe gemessen wurde — auftraten, können in manchen Fällen durch Ausspülen das Abrutschen kleinerer Schollen beschleunigen und auch örtlich ein Aufweichen der Kliffhalde verursachen. Im großen und ganzen zeigt sich die Wirkung des oberflächlich abfließenden Wassers aber nur im Entstehen von Erosionsrinnen, die das Kliff in Abhängigkeit vom Materi-



Bild 76. Schollensenkung der Oberflächenwasser am Kliff

alaufbau überziehen, und von Erosionskerben in der Kliffkante. Als Beispiel dafür ist in Bild 76 eine etwa 5 m^3 große Scholle zu sehen, die durch Oberflächenwasserabfluß zwischen Kliff und Scholle innerhalb weniger Wochen um mindestens 40 cm absank.

Abschließend soll nicht unerwähnt bleiben, daß auch Wind, Tiere und Menschen die Abtragung einer Steilküste beschleunigen helfen. So können die an das Steilufer anprallenden Seewinde durch Wirbelbildung zwischen bindigen Lockergesteinen eingelagerte Sande ausblasen (Bild 77), Gänge und Höhlen von Wühlmäusen, Kaninchen, Füchsen und Uferschwalben (Bild 78) eine Lockerung der Kliffsedimente verursachen und kleinere Abbrüche vorbereiten. Die Badegäste können durch den Auf- und Abstieg am Kliff dem Oberflächen- und Grundwasser günstige Angriffsmöglichkeiten schaffen und unter Umständen auch größere Massenbewegungen auslösen. Der Einfluß des Menschen auf die Abtragung eines Steilküstengebietes ist, besonders infolge des verstärkten Badebetriebes an der gesamten mecklenburgischen Küste in den letzten Jahren, nicht zu unterschätzen [36].



Bild 77. Wirkung der Deflation am Kliff



Bild 78. Aushöhlungen durch Uferschwalben am Kliff

3.842.3

Untersuchung der Standsicherheit der Kliffböschungen

Im folgenden soll unter Benutzung der im Laboratorium für die verschiedenen Lockergesteine ermittelten bodenphysikalischen Kennwerte (vgl. 2.3) die Standsicherheit der im Gebiet des Klütz-Höved vorhandenen Steilufer auch rechnerisch, und zwar nach bekannten Berechnungsverfahren von OHDE [37] und FELLENIUS [38], untersucht und damit gleichzeitig das am Kliff wirksame Kräftespiel und die Gleichgewichtsgrundlagen erklärt werden. Für die Berechnung wurden zwei typische Kliffquerprofile zusammengestellt, die hinsichtlich der Böschungsneigung und des geo-

logischen Aufbaues die Verhältnisse im Untersuchungsgebiet gut vertreten. Die mittlere Kliffhöhe wurde beide Male mit 30 m festgelegt. Damit kann ein für den vorliegenden Zweck ausreichendes Bild der günstigsten und ungünstigsten Böschungsverhältnisse im Gebiet des Klütz-Höved ermittelt werden. Untersuchungen, die den oft von Meter zu Meter wechselnden Aufbau und die verschiedene Höhe des Kliffs berücksichtigen wollten, würden einige Hundert Gleitkreisberechnungen notwendig machen, ohne daß man zu einem eindeutigen Ergebnis gelangt.

Sandkliff

An einem nur aus Sanden aufgebauten Steilufer sind keine Standsicherheitsberechnungen erforderlich, da sich hier der typische natürliche Böschungswinkel einstellen muß; der sich nur bei kapillarer Durchfeuchtung kurzzeitig ändern kann. Die Messungen der Böschungswinkel ergaben zwischen 35 und 40° schwankende Werte.

Geschiebemergelkliff

Freistehende Kliffhöhe. Für den Fall eines ausschließlich aus Geschiebemergel und -lehm zusammengesetzten Steilufers soll zunächst mit Hilfe einer von OHDE aufgestellten Beziehung untersucht werden, welche freistehende Wandhöhe (h_k) im Geschiebelehm als dem die hangenden Kliffpartien im allgemeinen aufbauenden Lockergestein möglich ist. Die Gleichung von OHDE berücksichtigt dabei besonders die Kohäsion als wesentlichen den Zusammenhalt eines bindigen Lockergesteines bewirkenden Faktor:

$$h_k = 2 \left(\sqrt{1 - \mu^2} + \mu \right) \frac{c}{\gamma} - \frac{P}{\gamma}$$

Darin bedeuten:

- μ = Tangens des Reibungswinkels
- c = Kohäsion
- P = Auflast
- γ = Raumgewicht des feuchten Bodens.

Das letzte Glied dieser Gleichung entfällt im vorliegenden Falle, da keine Auflast vorhanden ist. Für die Rechnung sollen die für den Geschiebelehm ermittelten Extremwerte verwendet werden, um die Grenzwerte der freistehenden Wandhöhe berechnen zu können:

	μ	c	γ
Minimum	0,35	0,50 kp/cm ²	1,92 t/m ³
Maximum	0,62	0,95 kp/cm ²	2,22 t/m ³

Danach ergibt sich:

$$h_{k(\min)} = 2 \left(\sqrt{1 - 0,35^2} + 0,35 \right) \frac{5,0}{2,22} = 6 \text{ m}$$

$$h_{k(\max)} = 2 \left(\sqrt{1 - 0,62^2} + 0,62 \right) \frac{9,5}{1,92} = 14 \text{ m}$$

Es zeigt sich dabei, daß beim Zusammentreffen günstiger Faktoren (geringer Wassergehalt, hohe Scherfestigkeit, geringe Klüftung) ein nur aus Geschiebemergel und -lehm aufgebautes Steilufer unter der Voraussetzung senkrechter Böschungen bis etwa 14 m Höhe standsicher ist, ohne daß es zur Auslösung von Rutschungen kommen kann. Dabei werden selbstverständlich die Wirkungen der klimatischen Faktoren nicht mit berücksichtigt.

Gleitkreisuntersuchungen. Da die durchschnittliche Kliffhöhe im Untersuchungsgebiet bei rund 30 m liegt, genügen die Berechnungen nach der OHDESCHEN Formel nicht. Eine Festlegung der Standsicherheit ist dann nur mit Hilfe von Gleitkreisuntersuchungen möglich. Nach der Methode von FELLENIUS wird dabei der Rutschkörperquerschnitt in Streifenelemente beliebiger Breite zerlegt. Durch Multiplikation des Rauminhaltes dieser 1 m tief gedachten Elemente mit dem Raumgewicht der Erdart erhält man das Gewicht dieses Segmentes. Diese Gewichte greifen punktförmig im Schwerpunkt der Segmente an und wirken in lotrechter Richtung. Nach dem Parallelogramm der Kräfte werden sie jeweils in eine Tangential- und eine Normalkraft zerlegt. Die Integration aller Tangential- und Normalkräfte und Multiplikation dieser punktförmig angenommenen Lasten mit der Segmentbreite ergibt die in der angenommenen kreisförmigen Gleitfläche wirkenden abschiebenden (Tangential-) und haltenden (Normal-)Kräfte. Bei Verlauf der Gleitfläche in kohärenten Erdarten lassen sich durch Multiplikation der für die Kohäsion bestimmten Werte mit der Länge der Gleitfläche auch noch die wirksamen Kohäsionskräfte bestimmen. Die Sicherheit (η) wird dann nach der Gleichung

$$\eta = \frac{\Sigma N \cdot \mu + c \cdot l}{\Sigma T}$$

bestimmt.

Darin bedeuten:

N = Normalkräfte (t)	c = Kohäsion (t/m ²)
T = Tangentialkräfte (t)	l = wirksame Länge in der Gleitfläche (m ²)
$C = c \cdot l$ = Kohäsionskräfte (t)	$\mu = \operatorname{tg} \varrho$ = Reibungsbeiwert

Standsicherheit ist nach diesem Berechnungsverfahren nur vorhanden, wenn $\eta = 1,3$ fach oder größer ist.

Gleitkreisuntersuchung I/1. Der Böschungswinkel für das nur aus Geschiebemergel und -lehm bestehende Steilufer wurde im ersten Fall mit 60° angenommen. Der hangende Teil des Kliffs direkt unterhalb der Kliffkante soll, entsprechend des niedrigsten für h_k berechneten Wertes, auf etwa 6 m Höhe senkrecht stehen bei einer Gesamthöhe des Kliffs von 30 m. Als ungünstigster Fall kann eine steile, das gesamte Kliff durchziehende und am Kliffuß austretende Gleitfläche angenommen werden (Bild 79a). Der hangende freistehende Kliffabschnitt soll nur als Auflast wirksam sein. Für die Scherfestigkeit von Geschiebelehm und Geschiebemergel wurde — da beide Erdarten hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften sehr ähnlich sind (vgl. 2.31 und 2.32) — ein für beide Erdarten geltender Durch-

schnittswert benutzt: $\mu = 0,51$ und $c = 0,7 \text{ kp/cm}^2$. Das mittlere Raumbgewicht wurde mit $\gamma = 2,10 \text{ t/m}^3$ angenommen. Die Gleitkreisberechnung ergab eine Sicherheit für die untersuchte Böschung von $\eta = 0,7$, d. h., es ist keine Standsicherheit vorhanden.

Gleitkreisuntersuchung I/2. Für diese Untersuchung wurde die Kliffböschung mit 50° angenommen, bei einer freistehenden Kliffkante von 6 m Höhe. Die Gleitfläche hat etwa denselben schwachgekrümmten Verlauf wie im ersten Fall, auch die bodenphysikalischen Werte wurden unverändert in die Rechnung aufgenommen. In den

Gleitsicherheitsberechnung I/1

Nr.	$G(F)$	μ	c	γ	T	ΣT	N	ΣN
1+A	79	0,51	0,7	2,1	64	216	50	258
2+B	137	0,51	0,7	2,1	90		103	
3	91	0,51	0,7	2,1	48		77	
4	31	0,51	0,7	2,1	14		28	

Tangentialkräfte

$$\Sigma T \cdot 7,0 \cdot 1,0 \cdot 2,1 = 216 \cdot 7 \cdot 2,1 = 3180 \text{ t}$$

Kohäsionskräfte

$$C = c \cdot l = 7,0 \cdot 38 = 266 \text{ t}$$

Normalkräfte

$$\Sigma N \cdot 7,0 \cdot 1,0 \cdot 2,1 = 258 \cdot 7 \cdot 2,1 = 3800 \text{ t}$$

Sicherheit

$$\eta = \frac{3800 \cdot 0,51 + 266}{3180} = \frac{1940 + 266}{3180} = \frac{2206}{3180} = 0,7 \text{ fach}$$

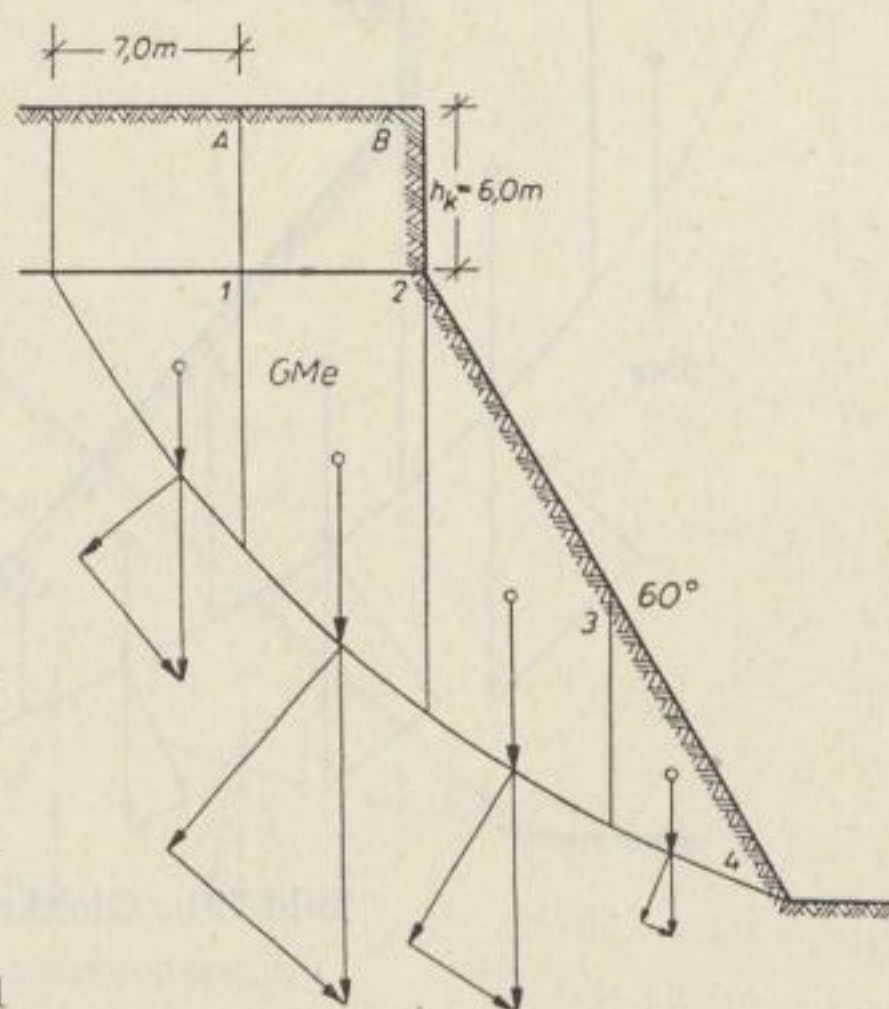


Bild 79a. Gleitkreisuntersuchung I/1

gewählten Gleitkreis sind hier allerdings die hangenden Kliffteile mit einbezogen worden. Die durch Gegenüberstellung der Tangential-, Normal- und Kohäsionskräfte ermittelte Sicherheit liegt bei $\eta = 0,8$ (Bild 79b). Auch bei Annahme einer etwa 8 m hohen Kliffhalde mit einer Böschungslänge von nur 30° und eines hohen in den Abbruchmassen sicher nicht vorhandenen Raumbgewichtes von $\gamma = 2,10 \text{ t/m}^3$ ändert sich die Sicherheit nur sehr geringfügig auf etwas über $\eta = 0,8$ (vgl. Klammerwerte in Bild 79b).

Gleitkreisuntersuchung I/3. In diesem Falle wurde für das Kliff von 30 m Höhe, das nur aus Geschiebelehm und Geschiebemergel bestand, eine durchgehende Böschungslänge von 40° angenommen. Der Gleitkreis ist wiederum schwachgekrümmt

Gleitsicherheitsberechnung I/2

Nr.	$G(F)$	μ	c	γ	T	ΣT	N	$N \Sigma$
1	43	0,51	7,0	2,1	32	194 (201)	23	246 (279)
2	112	0,51	7,0	2,1	78		77	
3	88	0,51	7,0	2,1	52		71	
4	60	0,51	7,0	2,1	26		55	
5	21 (36)	0,51	7,0	2,1	6 (10)		20 (33)	
(6)	(20)	0,51	7,0	2,1	(3)	(20)		

Tangentialkräfte

$$\Sigma T \cdot 7,0 \cdot 1,0 \cdot 2,1 = 194 \cdot 7 \cdot 2,1 = 2852 \text{ t}$$

$$(201 \cdot 7 \cdot 2,1 = 2955 \text{ t})$$

Kohäsionskräfte

$$C = c \cdot l = 7,0 \cdot 50 = 350 \text{ t}$$

Normalkräfte

$$\Sigma N \cdot 7,0 \cdot 1,0 \cdot 2,1 = 246 \cdot 7 \cdot 2,1 = 3616 \text{ t}$$

$$(279 \cdot 7 \cdot 2,1 = 4101 \text{ t})$$

Sicherheit

$$\eta = \frac{3616 \cdot 0,51 + 350}{2852} = \frac{2230}{2852} = 0,78 \text{ fach}$$

$$(\eta = \frac{4101 \cdot 0,51 + 350}{2955} = \frac{2440}{2955} = 0,83 \text{ fach})$$

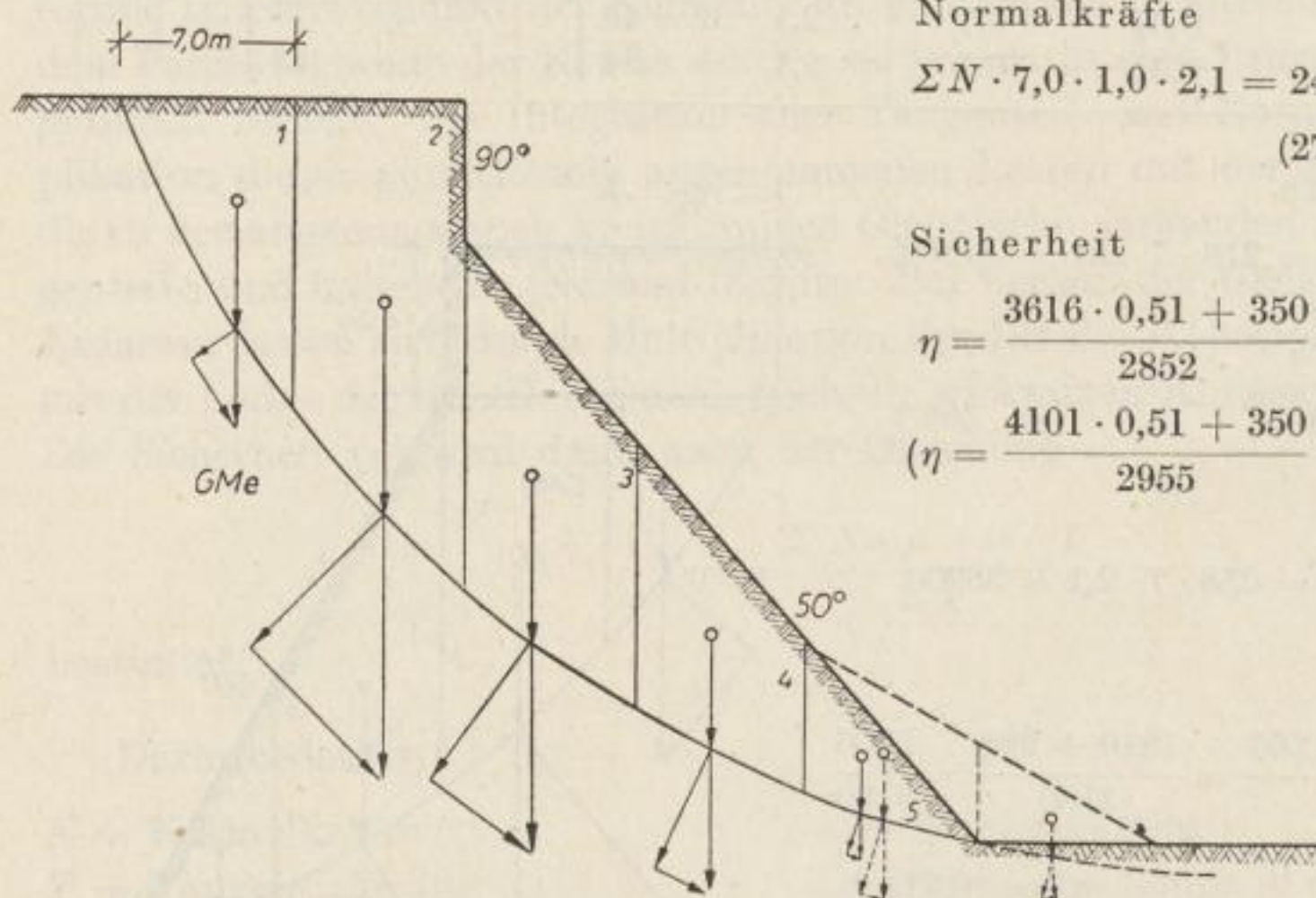


Bild 79b. Gleitkreisuntersuchung I/2

und mündet am Fußpunkt. Die bodenphysikalischen Werte wurden nicht verändert. Dabei ergibt sich eine Sicherheit von $\eta = 1,0$ (Bild 79c), die entsprechend den Vorschriften für Gleitsicherheitsuntersuchungen ebenfalls noch keine genügende Standsicherheit verbürgt.

Kliff aus Geschiebemergel und Sanden

Im Gebiet des Klütz-Höved hat das Steilufer mit wechsellagerndem Aufbau aus bindigen und nichtbindigen Lockergesteinen die weiteste Verbreitung. Da die Lagerungsverhältnisse im einzelnen außerordentlich unterschiedlich sind, wurden die Gleitsicherheitsuntersuchungen auf einen Grundtyp beschränkt, der möglichst umfassende Aussagen vor allem hinsichtlich des ungünstigsten Falles zuläßt. Das dafür

Gleitsicherheitsberechnung I/3

Nr.	$G(F)$	μ	c	γ	T	ΣT	N	ΣN
1	41	0,51	7,0	2,1	30	201	25	331
2	97	0,51	7,0	2,1	62		70	
3	106	0,51	7,0	2,1	54		87	
4	88	0,51	7,0	2,1	36		78	
5	57	0,51	7,0	2,1	16		54	
6	18	0,51	7,0	2,1	3		17	

Tangentialkräfte

$$\Sigma T \cdot 8 \cdot 1,0 \cdot 2,1 = 201 \cdot 8,0 \cdot 2,1 = 3377 \text{ t}$$

Normalkräfte

$$\Sigma N \cdot 8 \cdot 1,0 \cdot 2,1 = 331 \cdot 8,0 \cdot 2,1 = 5560 \text{ t}$$

Kohäsionskräfte

$$C = c \cdot l = 7,0 \cdot 60 = 420 \text{ t}$$

Sicherheit

$$\eta = \frac{5560 \cdot 0,51 + 420}{3377} = \frac{3260}{3377} = \underline{\underline{0,97 \text{ fach}}}$$

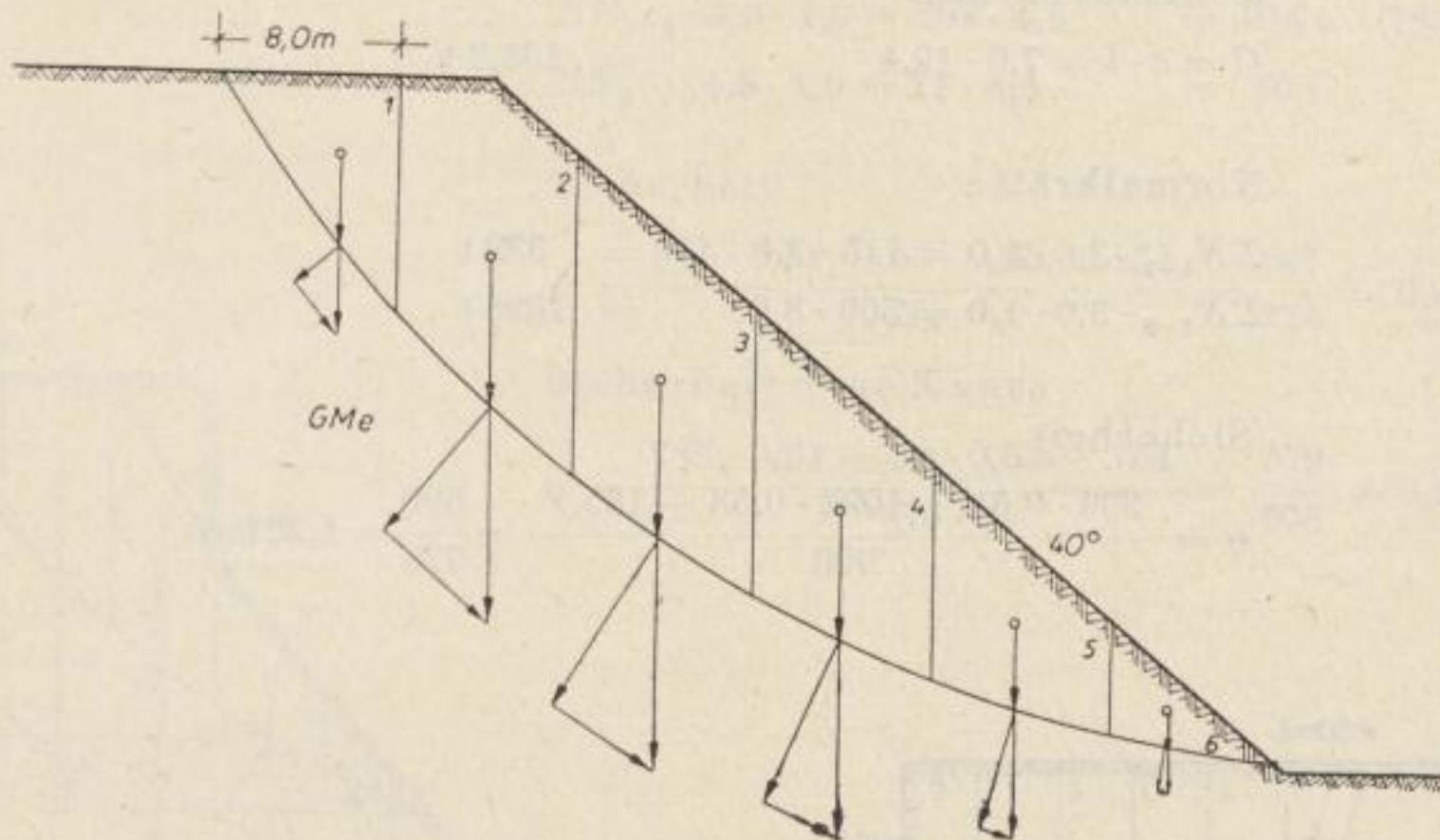


Bild 79c. Gleitkreisuntersuchung I/3

ausgewählte Kliffquerprofil hat folgenden Aufbau. Das 30 m hohe Kliff besteht hauptsächlich aus Geschiebemergel bzw. -lehm und führt etwas unterhalb der mittleren Höhe — bei 12 m — eine etwa 3 m mächtige Schicht aus nichtbindigen Lockergesteinen. Die Kliffböschung hat eine Neigung von etwa 50°, die hangenden 6 m stehen senkrecht. Entsprechend den Verhältnissen in der Natur ist im Liegenden der nichtbindigen und im allgemeinen grundwasserführenden Schicht eine mächtige Kliffhalde vorhanden, die etwa unter einem Winkel von 20 bis 30° den Kliffuß und Teile des Strandes überdeckt. Beide Tatsachen rechtfertigen die Vorstellung, daß alle Gleitkreise ungefähr im Bereich der liegenden Grenzzone zwischen Sand und Geschiebemergel austreten. Die Wasserführung in den Sanden macht die Grenzfläche zu einer natürlichen Schwächezone. Die mächtige und hoch ansetzende Kliffhalde

Gleitsicherheitsberechnung II/1

Nr.	G	μ	c	γ	T	ΣT	N	ΣN
1	24,4	0,51	0,7	2,1	21	}	12	113
2	61,2	0,51	0,7	2,1	47		39	
3	79,1	0,51	0,7	2,1	51		62	
4	95,1	0,53	—	1,64	48	}	81	366
5	102,4	0,53	—	1,64	40		96	
6	106,8	0,53	—	1,64	28		104	
7	50,7	0,53	—	1,64	7	} 242	51	366
8	27,4	0,53	—	1,64	—		27	
9	7,4	0,53	—	1,64	—		7	

Tangentialkräfte

$$\Sigma T \cdot 3,0 \cdot 1,0 = 242 \cdot 3,0 = 726 \text{ t}$$

Kohäsionskräfte

$$C = c \cdot l = 7,0 \cdot 19,4 = 135,8 \text{ t}$$

Normalkräfte

$$\Sigma N_{1-3} \cdot 3,0 \cdot 1,0 = 113 \cdot 3,0 = 339 \text{ t}$$

$$\Sigma N_{4-9} \cdot 3,0 \cdot 1,0 = 366 \cdot 3,0 = 1098 \text{ t}$$

Sicherheit

$$\eta = \frac{339 \cdot 0,51 + 1098 \cdot 0,53 + 135,8}{726} = \frac{890}{726} = \underline{\underline{1,22 \text{ fach}}}$$

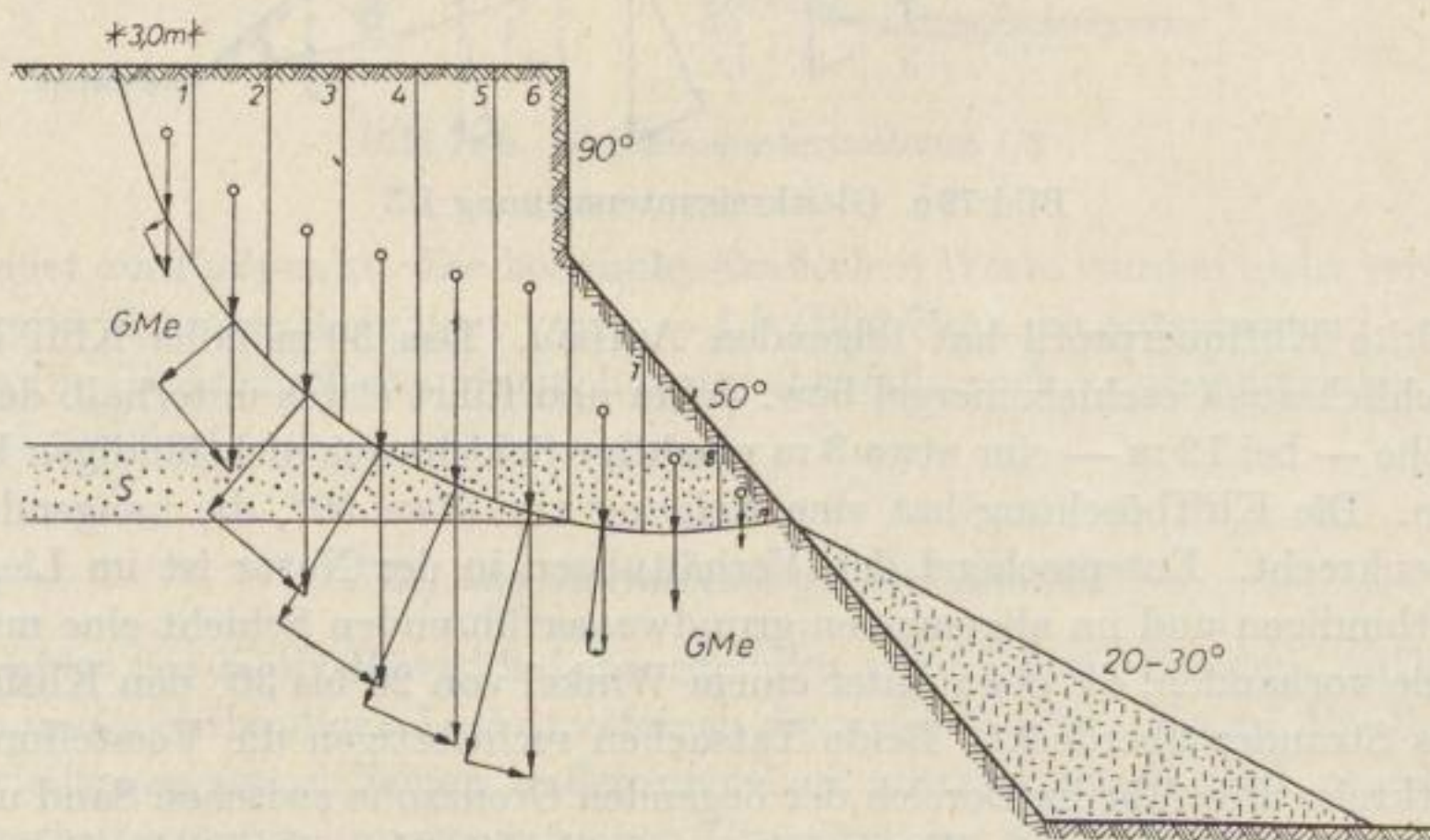


Bild 79d. Gleitkreisuntersuchung II/1

Gleitsicherheitsberechnung II/2

Nr.	G	μ	c	γ	T	ΣT	N	ΣN
1	28,4	0,51	0,7	2,1	22	172 (150)	18	203 (174)
2	77,5	0,51	0,7	2,1	53		55	
3	113,4	0,51	0,7	2,1	68 (46)		91 (62)	
4	44,9	0,51	0,7	2,1	23		39	
5	18,9	0,53	—	1,64	6		11	11

Tangentialkräfte

$$\Sigma T \cdot 4,5 \cdot 1,0 = 172 \cdot 4,5 = 774 \text{ t (675 t)}$$

Kohäsionskräfte

$$C = c \cdot l = 7,0 \cdot 22 = 154 \text{ t}$$

Normalkräfte

$$\Sigma N_{1-4} \cdot 4,5 \cdot 1,0 = 203 \cdot 4,5 = 914 \text{ t (783 t)}$$

$$\Sigma N_5 \cdot 4,5 \cdot 1,0 = 11 \cdot 4,5 = 50 \text{ t}$$

Sicherheit

$$\eta = \frac{914 \cdot 0,51 + 50 \cdot 0,53 + 154}{774} = \frac{647}{774} = 0,85 \text{ fach}$$

Sicherheit ohne Kante

$$\eta = \frac{783 \cdot 0,51 + 50 \cdot 0,53 + 154}{675} = \frac{579}{675} = 0,85 \text{ fach}$$

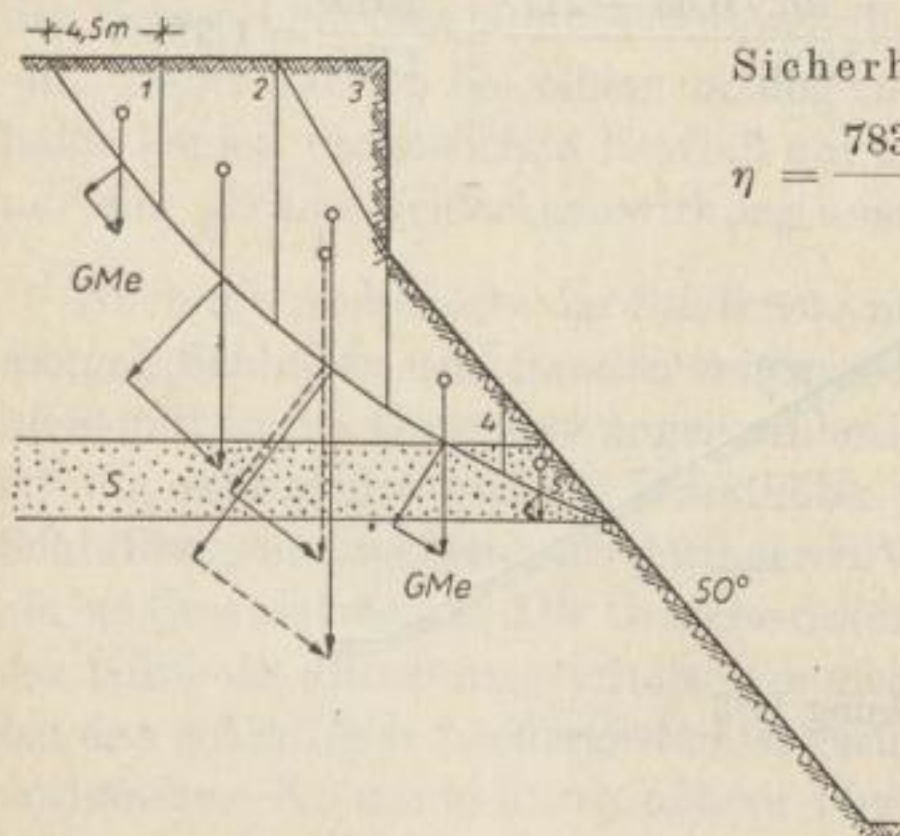


Bild 79e. Gleitkreisuntersuchung II/2

wirkt zusätzlich als Widerlager, so daß die liegenden Kliffpartien meistens nicht mit von den Gleitflächen erfaßt werden. Diese Annahme deckt sich mit den Verhältnissen im untersuchten Küstengebiet, in dem ausschließlich Rutschungen oberhalb des Grundwasserhorizontes festgestellt wurden.

Gleitkreisuntersuchung II/1. Es wurde hier eine Gleitfläche gewählt, die stark gekrümmt ist und fast 20 m landeinwärts die Kliffhochfläche schneidet, also tief in

Es gelten die gleichen bodenphysikalischen Werte wie im ersten Fall. Die bei diesem Gleitflächenverlauf sich stark erhöhenden Tangentialkräfte bewirken ein Absinken der Sicherheit auf $\eta = 0,8$. Eine Standsicherheit ist demzufolge nicht vorhanden. Auch ein Wegfall der steilen Kliffkante und die Annahme eines gleichmäßig geböschten Kliffes ändert die Verhältnisse nur geringfügig, d. h., es ist keine Standsicherheit gewährleistet (Bild 79e).

Gleitkreisuntersuchung II/3. Erst bei Abböschung auf 30° zeigt das Kliff auch bei ungünstigstem Gleitflächenverlauf mit schwacher Krümmung und einem Verlauf fast parallel der Kliffkante eine Sicherheit von $\eta = 1,3$. Die Standsicherheit ist demnach in diesem Fall gerade noch vorhanden (Bild 79f), und zwar als Folge der wesentlich geringer gewordenen abschiebenden (Tangential-)Kräfte.

Ergebnis

Bei zusammenfassender Betrachtung aller Berechnungsergebnisse läßt sich die Standsicherheit des Steilufers im Gebiet des Groß- u. Klein-Klütz-Höved folgendermaßen beurteilen.

Steiluferabschnitte, die nur aus homogenem, nichtklüftigem Geschiebemergel und -lehm bestehen, können bei einem Wassergehalt in der Nähe der Ausrollgrenze infolge der hohen Kohäsion in diesem bindigen Lockergestein bis über 10m hohe senkrechte oder angenähert senkrechte Wände bilden. Darunter stellen sich in Abhängigkeit von der Gesamthöhe des Steilufers Böschungen mit einer Neigung zwischen 30 und 40° ein. Dabei hat die bei einem homogenen Kliff kleine und flach auslaufende Kliffhalde keinen wesentlichen Einfluß auf eine höhere Standsicherheit des Kliffs, da sie nur eine geringe Widerlagerwirkung ausübt.

Auch die Abschnitte der Steilküste mit wechsellagerndem Aufbau aus Geschiebemergel, Schluffen und Sanden zeigen, sofern man die Wirkungen des Grundwassers nicht mit in die Untersuchungen einbezieht, ähnliche Stabilitätsverhältnisse. Dabei ist die senkrechte stabile Wandhöhe unmittelbar unterhalb der Kliffkante bei Schluffen, entsprechend den geringeren Werten für die Kohäsion, bedeutend geringer als bei Geschiebelehm. Die Ursache dafür, daß sich auch bei mehrschichtigem Aufbau des Kliffs die Böschungsverhältnisse nicht wesentlich verändern, liegt darin, daß die bei den schluffigen Lockergesteinen geringere und bei den sandigen überhaupt nicht vorhandene Kohäsion durch höhere Werte für die innere Reibung — die bei Sanden bis auf $\mu = 0,65$ bis $0,70$ ansteigen kann — wieder kompensiert wird, sofern kein gespanntes Wasser mitwirkt. Erst wenn man die Wirkung des an der Grenze von nichtbindigen zum bindigen Lockergestein ausfließenden Grundwassers mit in die Untersuchung einbezieht, ergeben sich unter Umständen erhebliche und ungünstige Änderungen in der Frage der Standsicherheit der Böschungen. Die durch Grundwasserzirkulation aufgeweichte hangende Zone des Grundwasserstauers bildet dabei eine natürliche Schwächezone, die den Verlauf der Gleitflächen maßgebend bestimmt.

Es ist dabei von untergeordneter Bedeutung für die Gefährdung der hangenden Kliffteile, in welcher Höhe die grundwasserführende Schicht im Kliff verläuft. Ein

tieferes Austreten der Gleitflächen wird auch durch die an einem Ausgleichsteilufer mit Grundwasseraustritt vorhandene mächtige Halde aus abgerutschtem und niedergebroschenem Material im allgemeinen unmöglich gemacht. Die bei starkem Grundwasseraustritt und geringer Wirkung der Abrasion zu beobachtenden Staffelbrüche treten besonders dann auf, wenn durch Abbruchmassen das Grundwasser am Ausfluß gehindert und im Grundwasserhorizont gestaut wird. Dadurch muß es zu einer starken Verringerung und gegebenenfalls zur Aufhebung der in den Sanden vorhandenen Scherfestigkeit infolge An- und Rückstau des Grundwassers kommen, so daß mächtige Rutschkörper auf dem Grundwasserhorizont abgleiten.

Allgemein läßt sich an Hand dieser Untersuchungen sagen, daß die ungünstigsten Gleitkreise vor allem in der oberen Hälfte des Kliffs austreten und allgemein kleinere, flach schalenförmige Rutschkörper nur aus dem Bereich der Kliffkante zum Absturz bringen. Den wichtigsten Einfluß darauf haben im Kliff vorhandene Schwächezonen, wie z. B. Grundwasserhorizonte oder Kluftflächen. Damit wird ersichtlich, welche außerordentliche Bedeutung dem kontinuierlichen Grundwasserausfluß am Kliff als rutschungsauslösenden, für das Zurückverlegen der Kliffkante und den Landverlust verantwortlichen Faktor im Gebiet eines Ausgleichsteilufers zukommt.

3.85 Möglichkeiten der Kliffsicherung

Die Sicherung eines der marinen und klimatischen Abtragung ausgesetzten Steilküstengebietes gegen weitere Zerstörung läßt sich sowohl durch bautechnische als auch geotechnische Maßnahmen erreichen. Der heutige Stand der Technik gestattet es sogar, den Schutz einer Steilküste vollkommen und dauerhaft zu gestalten. Dazu sind jedoch Mittel erforderlich, die im allgemeinen in keinem Verhältnis zum volkswirtschaftlichen Wert der gesicherten Küstenstrecke stehen. Außerdem müßte ein vollkommener Küstenschutz die Sicherung der gesamten Küstenlänge berücksichtigen, da jeder technische Eingriff in den augenblicklichen Zustand auch eine Veränderung und Schädigung der daran anschließenden Küstenstrecken verursacht. Deshalb dienen die zur Zeit üblichen Maßnahmen im wesentlichen nur dazu, durch Anwendung billiger, zweckentsprechender und das Gleichgewicht der Landschaftseinheit Küste möglichst wenig störender Sicherungsmaßnahmen, den Rückgang einer Steilküste wenn nicht völlig zu verhindern, so doch wenigstens zu verzögern.

3.851

Bautechnische Maßnahmen

Bautechnische Maßnahmen zum Schutze einer Steilküstenstrecke beruhen im wesentlichen auf der Anlage von Bauwerken parallel (Längswerke) und winklig (Querwerke) zur Küste. Zu den Längswerken zählen Flechtwerke, Steindämme, Ufermauern und Deckwerke, zu den Querwerken alle Arten von Buhnen [39]. Eine Zwischenstellung nehmen flächenhafte Steinpackungen auf der Schorre ein.

Flachgeneigte und rauhe Deckwerke werden, da sie einen großen Teil der Wellenenergie aufzehren, gegenüber den senkrechten und damit dem vollen Anprall der Wellen ausgesetzten Ufermauern heute mehr und mehr bevorzugt (Bild 80).

Hinsichtlich der Ausführung und Anordnung von Bühnenbauten ist auch heute noch keine klare Tendenz zu erkennen. Längs- und Querwerken gemeinsam ist neben ihren hohen Anlagekosten³ der Eingriff in den augenblicklichen Zustand der Küste, der sich vor allem in einer Lee-Erosion bemerkbar macht, die für die an das Schutzbauwerk anschließende Küstenstrecke unheilvoll ist. Die Ursache dafür liegt im küstenparallel verlaufenden Küstenversatzstrom [40], der eine ausgeglichene Materialbilanz anstrebt. Wird in einem Küstenabschnitt mehr Material herantransportiert als abgeführt, so kommt es zu einer Anlandung; wird mehr durch Abrasion abtransportiert als herangeführt, so muß diese Unterbilanz durch ein Abbruchsteilufer ausgeglichen werden. Dazwischen liegen im allgemeinen Küstenstrecken, in denen eine ausgeglichene Materialbilanz vorhanden ist und weder eine marine Abtragung noch Anlandung

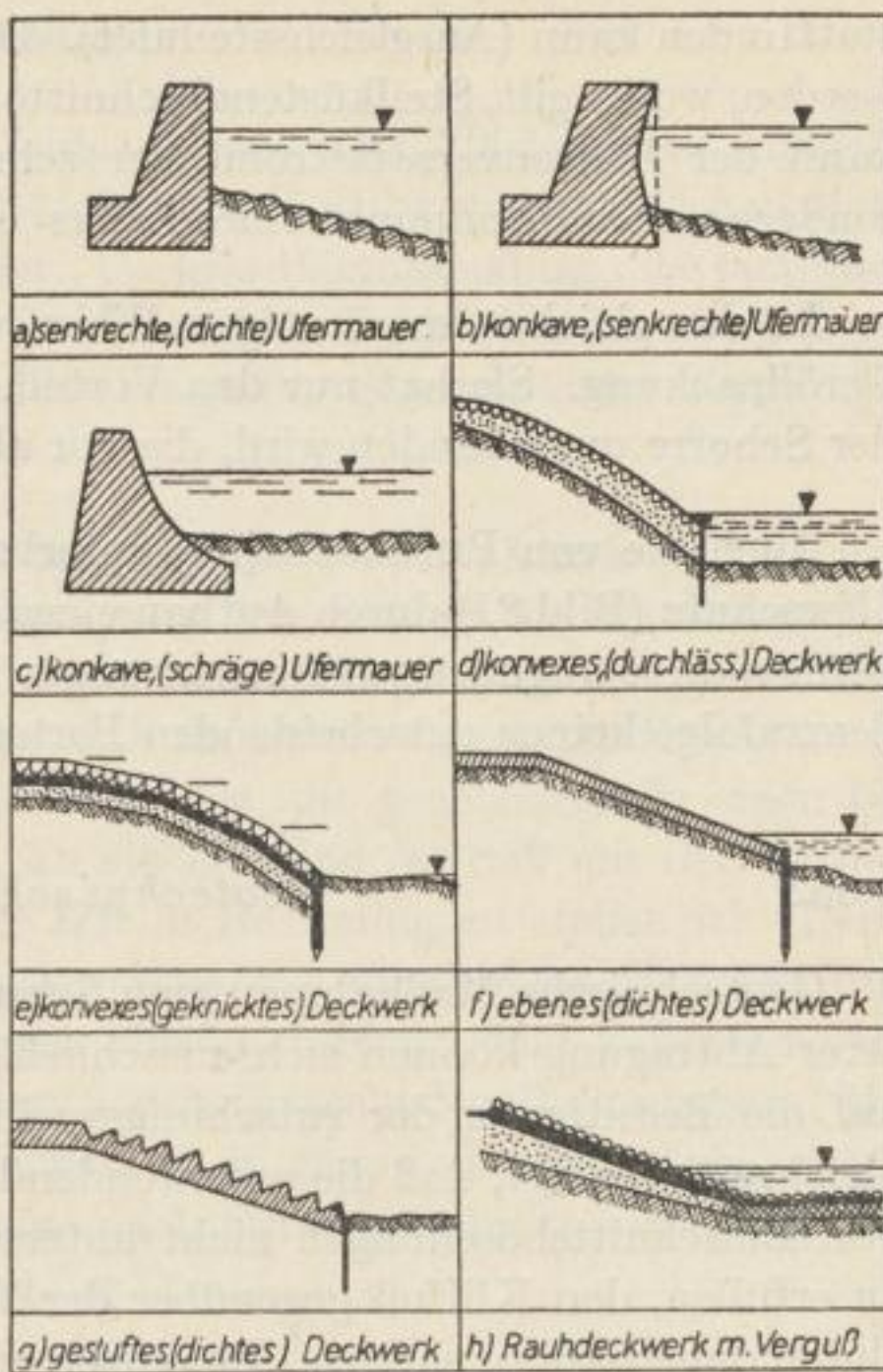


Bild 80. Ufermauern und Deckwerke (Prinzipskizzen)

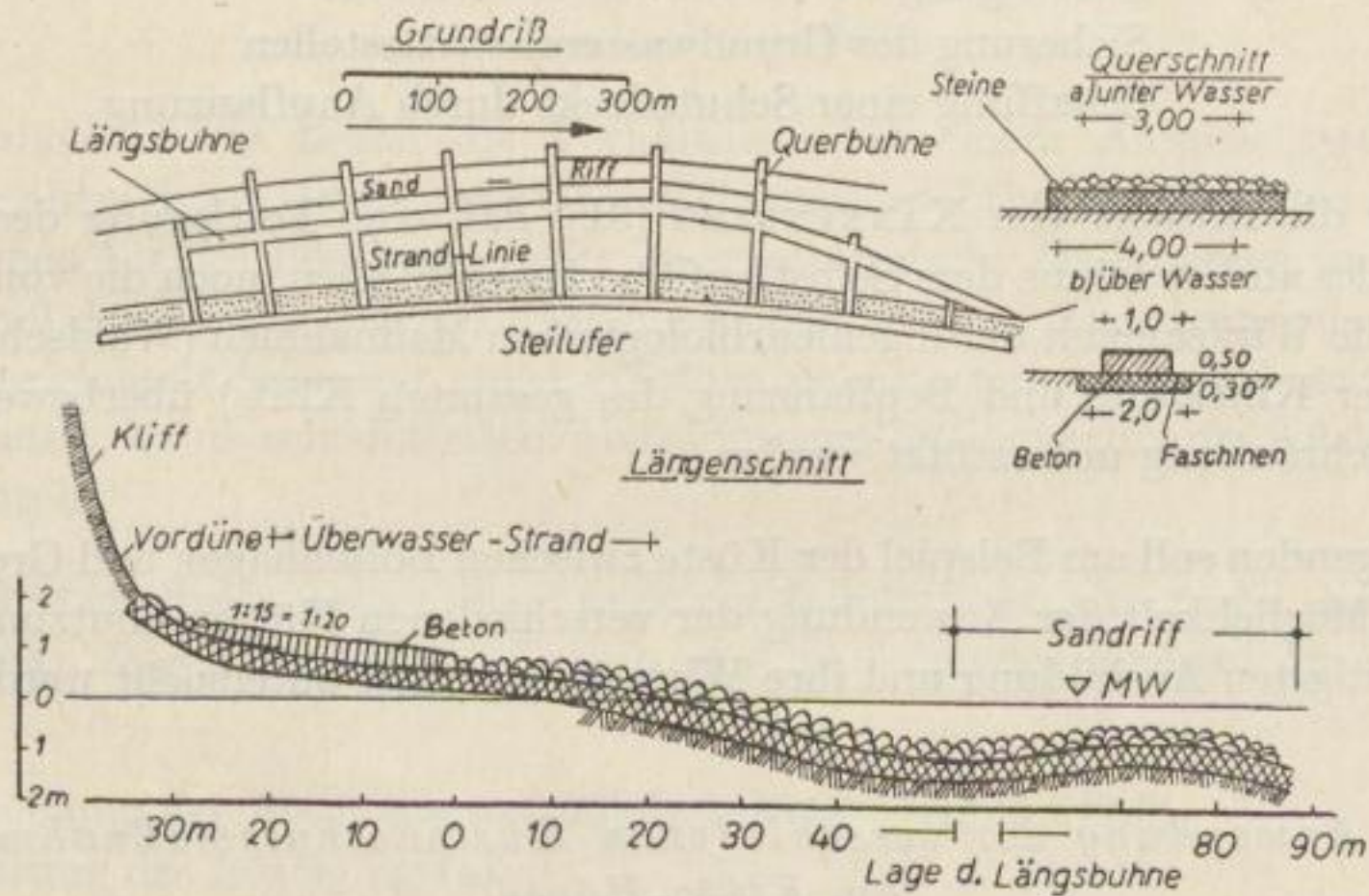


Bild 81. Flächenhafter Uferschutz (Prinzipskizze) nach PETERSEN

³ Preisindex 1950: 1 lfm. Ufermauer ca. 2000 DM, 1 lfm. Buhne 2400 DM und 2% jährl. Unterhaltungskosten, aus PETERSEN [39].

stattfinden kann (Ausgleichsteilufer). Da Küstenschutzbauten immer dort angelegt werden, wo es gilt, Steilküstenabschnitte mit starker mariner Abtragung zu sichern, kann der Küstenversatzstrom hier seine Untersättigung nicht mehr ausgleichen, sondern nur am Endpunkt eines Längs- oder Querwerkes (Lee-Erosion).

In der gleichen ungünstigen Weise wirkt auch die Anlage einer flächenhaften Geröllpackung. Sie hat nur den Vorteil, daß die zusätzlich auftretende Absandung der Schorre unterbunden wird, die vor allem bei Längswerken auftritt.

Auch die von PETERSEN [39] unterbreiteten Vorschläge für einen flächenhaften Uferschutz (Bild 81) durch Aufbau eines dichten Netzes aus Längs- und Querbunnen können diese ungünstigen Auswirkungen nicht unterbinden. Diese Maßnahme bringt demzufolge keinen entscheidenden Fortschritt.

3.852

Geotechnische Maßnahmen

Geotechnische Maßnahmen zum Schutz eines Steilküstengebietes gegenüber weiterer Abtragung können sich ausschließlich auf die Böschungssicherung und somit auf die Beseitigung der rutschungsauslösenden Faktoren beschränken. Damit ist gleichzeitig gesagt, daß die anzuwendenden Verfahren sich von denen zur Sicherung von Einschnittsböschungen nicht unterscheiden. Zusätzlich ist nur die Bedingung zu erfüllen, den Kliffuß gegenüber der Wirksamkeit von Hochwässern und Sturmfluten dauerhaft zu sichern. Im einzelnen muß die geotechnische Sicherung folgende Maßnahmen umfassen:

- Abschrägen der Kliffböschung
- Beseitigung des Sickerwassereinflusses
- Sicherung der Grundwasseraustrittsstellen
- Schaffung einer Schutzdecke durch Anpflanzung

Weder die Ansicht von KANNENBERG [31], daß eine Festlegung des Kliffußes genüge, alles andere könne dem Selbstlauf überlassen bleiben, noch die von v. BÜLOW [41], der die Wirksamkeit der ingenieurbiologischen Maßnahmen (Waldschutzstreifen parallel der Kliffkante und Bepflanzung des gesamten Kliffs) überbewertet, kann ohne Einschränkung unterstützt werden.

Im folgenden soll am Beispiel der Küste zwischen Boltenhagen und Grenze DDR/DBR die Möglichkeit der Anwendung der verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen, ihrer günstigsten Ausbildung und ihre Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

3.853

Anwendung der verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen am Klütz-Höved

Bei der Planung und Ausführung von Schutzmaßnahmen für ein Steilküstengebiet sollte man in erster Linie als wichtigste Faktoren die verschiedenen Kräfte berücksichtigen, die die Abtragung bewirken.

Abbruchssteilufer

Schutzmaßnahmen haben hier nur als Längs-, Quer- oder Flächenwerk Aussicht auf Erfolg, während eine Sicherung der Böschung mit Hilfe geotechnischer Maßnahmen erst von zweitrangiger Bedeutung ist. Da jede Baumaßnahme eine empfindliche Störung im augenblicklichen Zustand der Küstenlandschaft hervorruft, müssen möglicher Nutzen und zu erwartender Schaden sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.

Für das Untersuchungsgebiet bedeutet das, daß der wirtschaftliche Gewinn aus der zum Stillstand gebrachten marinen Abtragung den Kosten für die Anlage des Bauwerkes und seinen Auswirkungen auf benachbarte Küstenstrecken gegenübergestellt werden muß. Dabei ist festzustellen, daß im Gebiet des Klütz-Höved keine wichtigen baulichen Anlagen auf der Kliffhochfläche, die gegebenenfalls einen besonderen wirtschaftlichen Wert darstellen, zu sichern sind, so daß nur der Verlust an Ackerland mit einem m^2 -Preis von 0,25 DM in Rechnung zu stellen ist. Demgegenüber stehen die Anlagekosten des Bauwerkes mit mindestens 2000 DM/lfm. für einen infolge der Lee-Erosion sehr langen Küstenabschnitt und außerdem eine Unterbindung der Materialzufuhr zum Strand des Ostseebades Boltenhagen. Mit dieser ungünstigen Auswirkung für Boltenhagen ist durchaus zu rechnen, da sowohl bei östlichen als auch westlichen Winden eine nach Osten gerichtete Strömung entlang des Gr.- u. Kl.-Klütz-Höved vorhanden ist [42].

Ist der Schutz eines Abbruchssteilufers nicht zu umgehen, so ist einer flächenhaften Geröllpackung auf Schorre und Strand [40] der Vorzug zu geben.

Ausgleichsteilufer

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse bei einem Ausgleichsteilufer mit seinem vor allem durch Grund- und Oberflächenwasserabfluß verursachten Rückgang. Hier kommen für die Böschungssicherung geotechnische Maßnahmen in Frage, zusätzlich muß der Kliffuß gegen Abrasion gesichert werden. Dabei sind, da es sich bei einem Ausgleichsteilufer um einen Küstenabschnitt mit ausgeglichener Materialbilanz handelt, keine schädigenden Auswirkungen auf benachbarte Küstenstrecken zu befürchten.

Die Schutzmaßnahmen an den Ausgleichsteilufeln des Gr.- u. Kl.-Klütz-Höved müßten etwa folgenden Umfang haben und in folgender Reihenfolge ausgeführt werden:

- Abflachung der Böschung auf mindestens 30° (vgl. 3.842.3),
- Sicherung des Böschungsfußes,
- Abfangen des Sickerwassers durch Tiefenrigolen parallel der Kliffkante,
- Sicherung der Grundwasseraustrittsstellen durch Kieskeile,
- Fassung und Ableitung des Grundwassers,
- Bepflanzung der Böschung nach örtlichem Mutterbodenauftrag.

Das Abflachen der Böschung erfolgt heute am besten mit Flachbaggergeräten. Nach Auflockerungssprengungen, die bei anstehendem Geschiebelehm und Geschiebemergel empfehlenswert sind (vgl. 3.7), könnte man beispielsweise die hangenden Kliffteile mit schweren Planierraupen abschieben und am Fuße des Kliffs absetzen. Bei einer für die genannte Böschungshöhe und -neigung erforderlichen Transportweite von durchschnittlich 50 m sind die anfallenden Kosten auf etwa 2,50 DM/m³ zu veranschlagen.⁴

Der Kliffuß wird am vorteilhaftesten durch Anlage eines Deckwerkes bis ca. 5 m ü. NN. in Asphalt- oder Betonbauweise [43] auf etwa 1 m Kiessandunterlage zur Verhinderung von Frost- oder Sickerwasserschäden gesichert. Der von v. BÜLOW [41] vorgeschlagenen Ausführung eines nur wenige Jahre bis zum Vorhandensein eines Pflanzenschutzes wirksamen Holzlängswerkes kann nicht zugestimmt werden, da das Deckwerk eine störungsfreie Ableitung des an der Quelle gefaßten Grundwassers bis zum Strand gewährleisten muß.

Das auf der Kliffhochfläche einsickernde und den hangenden Teil der Böschung durchnässende und gefährdende Sickerwasser muß durch Rigolen parallel der Kliffkante, deren Tiefe sich nach den örtlichen Verhältnissen richtet, abgefangen und zum Strand abgeleitet werden. Eine Abführung in das Hinterland ist im allgemeinen unmöglich. Wirkungsvoll kann diese Maßnahme durch Anlegung eines Schutzwaldstreifens parallel der Küste unterstützt werden. Die Auswahl der tiefwurzelnden Pflanzen geschieht unter dem Gesichtspunkt einer möglichst hohen Pumpleistung.

Das Abfangen des am Kliff austretenden Grundwassers im Hinterland der Küste — beispielsweise durch Schluckbrunnen, wie es v. BÜLOW [41] vorschlägt — ist auch bei guter Kenntnis des ungefähren geologischen Aufbaues dieses Gebietes aus wirtschaftlichen Gründen undurchführbar. Außerdem ist damit keine Gewähr für ein vollkommenes Abfangen des Grundwassers gegeben. Eine wirksame Beseitigung dieser Gefahr ist nur durch Anlage von tief in den Hang eingreifenden und ihn dadurch gleichzeitig stabilisierenden Quersickern oder Kieskeilen möglich. Voraussetzung für diese Maßnahme ist eine zügige, keine Erosionsschäden verursachende und ohne Störung am Kliffuß austretende Wasserabführung. (Deckwerk!)

Erst nach Durchführung dieser wichtigsten Maßnahmen kann und soll eine Bepflanzung der Böschung und damit die ingenieurbioologische Sicherung erfolgen. Die Pflanzen sollen durch den sich entwickelnden Wurzelpanzer den Hang gegen Erosion sichern. Für diesen Zweck besonders in Steilküstengebieten geeignete Pflanzen wurden von v. BÜLOW [41] zusammengestellt.

3.854

Ergebnis

Die bisherigen Ausführungen zeigen, welche großen Schwierigkeiten technischer und vor allem finanzieller Art eine durchgreifende und dauerhafte Steilküstensiche-

⁴ Nach Angaben des VEB Bagger- und Förderarbeiten Dresden.

rung verursacht, denn die am Beispiel des Klütz-Höved gesammelten Erkenntnisse lassen sich in entsprechender Abwandlung auf alle Steilküsten der weiteren Umgebung anwenden.

Die Sicherung von Abbruchsteilufern sollte unter Berücksichtigung der schwerwiegenden Folgeerscheinungen auf angrenzende Küstengebiete und der hohen Anlage- und Unterhaltungskosten nur an volkswirtschaftlich und landschaftlich besonders wertvollen Objekten und im Gefahrenbereich größerer Landverluste durchgeführt werden.

An Ausgleichsteilufern sind zwar im allgemeinen keine ungünstigen Folgeerscheinungen zu erwarten, aber der Aufwand technischer und wirtschaftlicher Art steht auch hier in keinem Verhältnis zum Nutzeffekt. Das läßt sich an einem Beispiel ohne Schwierigkeit nachweisen. Allein das Abschieben der Böschung auf eine vertretbare Neigung von 30° verschlingt auf wenige hundert Meter Küstenlänge bereits dieselbe Summe, die dem Gesamtschaden im Gebiet des Gr.- u. Kl.-Klütz-Höved entspricht, der durch den Angriff des Meeres und der klimatischen Faktoren auf das Steilufer in den letzten 60 bis 80 Jahren und den dabei verursachten Landverlust entstanden ist! Ein Mehrfaches dieses Betrages wird zusätzlich noch für Deckwerk, Böschungssicherung und Anpflanzung verbraucht. Daraus kann man entnehmen, daß eine Sicherung auch von Ausgleichsteiluferstrecken volkswirtschaftlich nicht tragbar ist.

Auch die Aussicht, daß die Anwendung der noch relativ billigen ingenieurbiologischen Sicherungsmaßnahmen zum Schutze von Böschungen allein zum Ziele führen könnte, ist — wie die Praxis immer wieder zeigt — nicht haltbar. Ausführbar dürfte nur die Anlage eines Schutzwaldstreifens parallel der Kliffkante auf der Hochfläche des Steilufers sein.

3.9 Die Frostveränderlichkeit der untersuchten Lockergesteine

3.91 Grundlagen

Die Feststellung der Frostveränderlichkeit des Untergrundes und die unter Berücksichtigung klimatischer, morphologischer und verkehrstechnischer Gesichtspunkte erforderlichen Sicherungsmaßnahmen sind wichtige Aufgaben der Geotechnik des Straßenbaues [44]. Die Kenntnis der bodenphysikalischen Kennwerte bildet dabei für diese Arbeiten eine entscheidende Grundlage, da aus dem Korn- und Mineralaufbau eines Lockergesteines auf die Frostgefährdung geschlossen werden kann (vgl. 1.52).

Die Bedeutung des Frostproblem es gerade für den Straßenbau liegt vor allem darin begründet, daß Straßen im Gegensatz zu Hochbauten nicht frostfrei gegründet werden und im Winter infolge der Schneebeseitigung das Eindringen der Kälte in den Untergrund begünstigen. Die sich in frostveränderlichen Erdarten bildenden Eislinsen, deren Ausmaß vom Frostverlauf und der Wassernachschubmöglichkeit

abhängt, sind eine wesentliche Ursache hoher Wasseranreicherung unmittelbar unter der Straßendecke während der Tauperiode im Frühjahr. Infolge der dynamischen Wirkung des Verkehrs werden dabei erweichter Untergrund und Wasser miteinander verknüpft, so daß die Tragfähigkeit des Straßenfundamentes abnimmt oder auch ganz verloren geht. Bei entsprechender Belastung können Unterbau und Decke völlig zerstört werden [8, 45, 46].

Für die Zwecke der Praxis werden zur schnellen Festlegung der Frostveränderlichkeit der Gesteine sogenannte Frostkriterien verwendet. Die bekanntesten sind die von CASAGRANDE [47], SCHAIBLE [45] und KEIL [48], wobei das nach SCHAIBLE heute für die Beurteilung von Lockergesteinen am häufigsten angewendet wird. Seine Schwäche liegt — wie bei allen nur die Kornverteilung berücksichtigenden ‚Kornkriterien‘ — in der ausschließlichen Anwendung von Kornkennziffern, ohne den stark modifizierenden mineralchemischen Einfluß der Tonminerale zu berücksichtigen.

3.92 Feststellung der Frostveränderlichkeit

3.921 Kornkriterium SCHAIBLE

Mit Hilfe des Kornkriteriums nach SCHAIBLE sind erstmalig gewisse quantitative Angaben über die Frostveränderlichkeit eines Lockergesteines möglich, indem eine Trennung in einen ‚frostsicheren‘, einen ‚frostempfindlichen‘ und einen ‚frostgefährlichen‘ Kornbereich erfolgt. Die Voraussetzung dafür ist die Ermittlung der Höhe des in einem frostveränderlichen Lockergestein vorhandenen Kornanteiles von $<0,1$ mm, $<0,02$ mm und $<0,002$ mm Durchmesser (Bild 82).

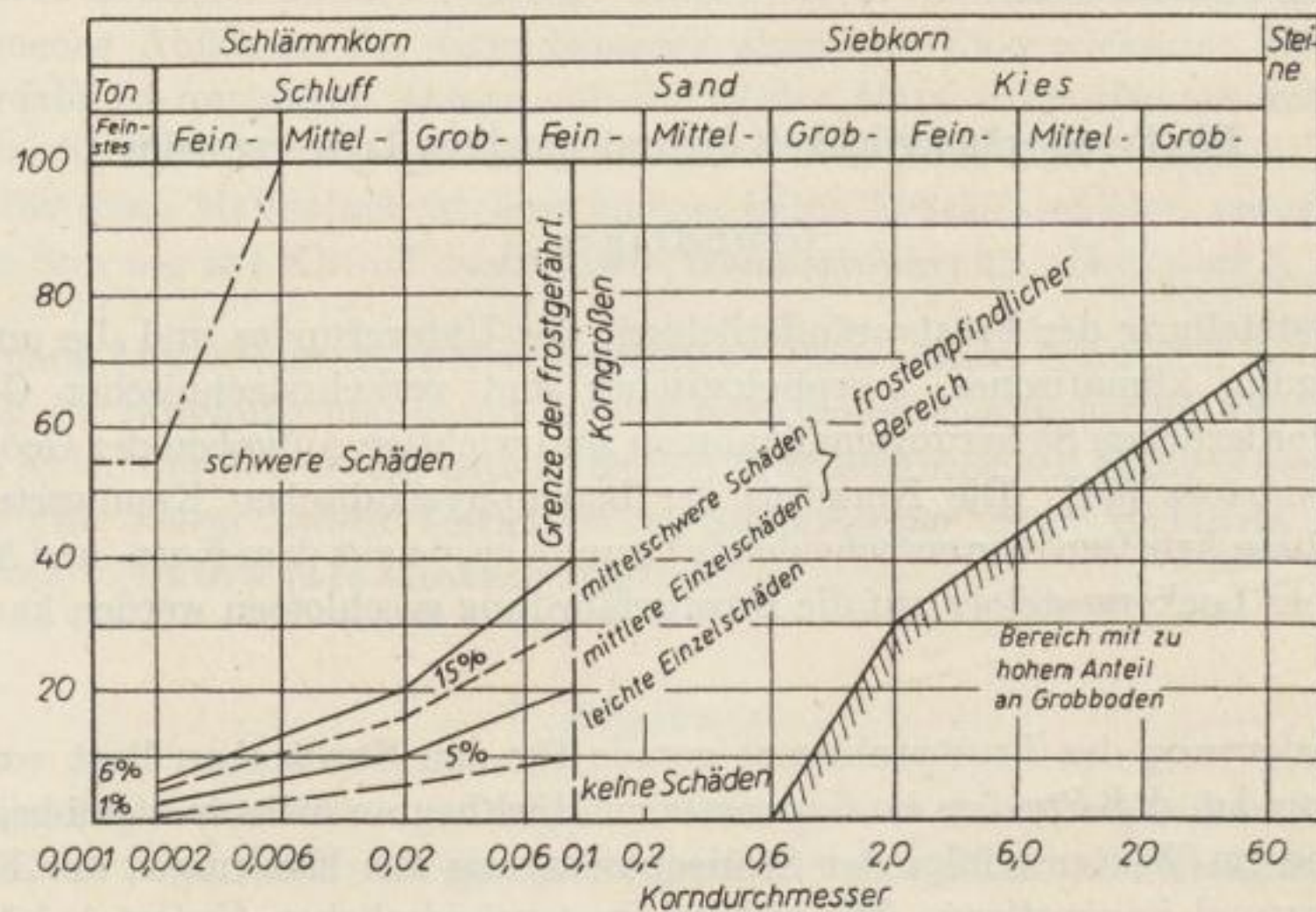


Bild 82. Grenzen des Frostkriteriums nach SCHAIBLE

Danach können die in der Arbeit untersuchten Lockergesteine Geschiebemergel, Geschiebelehm, Schluff und Feinsand folgendermaßen eingeteilt werden:

Der Geschiebemergel vom Klütz-Höved ist frostgefährlich. Die untersuchten Proben weisen einen Anteil zwischen 50 und 70% $<0,1$ mm Korngröße auf (vgl. Bild 25a).

Der Geschiebelehm vom Klütz-Höved ist frostgefährlich. Der Kornanteil $<0,1$ mm der untersuchten Proben liegt zwischen 55 und 75% (vgl. Bild 28a).

Die Schluffe des Klütz-Höved sind frostgefährlich. Ihr Anteil $<0,1$ mm Durchmesser erreicht eine Größe zwischen 70 und 100% (vgl. Bild 31a).

Die Feinsande des Klütz-Höved verhalten sich unterschiedlich. Der überwiegende Teil ist frostempfindlich oder frostgefährlich, nur wenige Proben liegen im frostsicheren Bereich. Diese Tatsache kommt im Kornanteil $<0,1$ mm Durchmesser, der zwischen 15 und 70% liegt, gut zum Ausdruck (vgl. Bild 33a).

Der Geschiebemergel von Altenburg ist frostgefährlich. Der Kornanteil $<0,1$ mm Durchmesser der untersuchten Proben liegt zwischen 40 und 65% (vgl. Bild 34).

Der Geschiebelehm von Altenburg ist ebenfalls frostgefährlich. Die untersuchten Proben weisen einen Kornanteil $<0,1$ mm Durchmesser zwischen 60 und 75% auf (vgl. Bild 37a).

Alle untersuchten Geschiebemergel- und Geschiebelehmproben liegen unterhalb der Korngröße von 0,1 mm Durchmesser vollständig innerhalb der als frostgefährlich gekennzeichneten Zone. Verschiedene Schluffproben berühren dagegen schon unterhalb 0,04 mm Durchmesser den frostempfindlichen und unterhalb 0,02 mm Durchmesser sogar den frostsicheren Bereich. Die Feinsande schneiden im Gegensatz dazu nur zwischen 0,1 und 0,06 mm Korngröße den frostgefährlichen bzw. frostempfindlichen Bereich an, um dann in den frostsicheren überzugehen. Der Bereich mit zu hohem Anteil an Grobkorn (vgl. Bild 82) wird von keiner Kornverteilungskurve der untersuchten Lockergesteine berührt.

Ein Vergleich mit dem von CASAGRANDE aufgestellten qualitativen Frostkriterium zeigt den Unterschied gegenüber dem auf der Untersuchung von rund 30000 km Straßen beruhenden Kriterium SCHAIBLE, indem z. B. die untersuchten gleichförmigen Feinsande mit ihrem Kornanteil $<0,02$ mm Durchmesser zwischen 0 und 10% als frostsicher gelten. Unberücksichtigt bleibt dabei der hohe Anteil an Körnungen zwischen 0,1 und 0,06 mm Durchmesser mit ihren für das Frostphänomen nicht zu unterschätzenden Haftwasserhüllen, die ja noch bei Korngrößen von 0,125 mm Durchmesser ein der Festsubstanz gleiches Volumen aufweisen.

Entsprechend den vorhandenen Angaben in der ‚Richtlinie zur Verhütung von Frostschäden an Straßen‘ [49] (vgl. Abb. 82) und den auf dem Kornkriterium SCHAIBLE beruhenden Erfahrungen, ist im Gebiet des Klütz-Höved und von Altenburg an auf Schluff-, Geschiebemergel- und Geschiebelehmuntergrund nicht frostsicher gegründeten Straßen — normale hydrologische und Frostverhältnisse vorausgesetzt

[50] — mit schweren Frostschäden zu rechnen. Bei den Feinsanden von Klütz-Höved sind — je nach dem Anteil $< 0,1$ mm Durchmesser schwere bis leichte Einzelschäden zu erwarten.

3.922

Frosthebungsversuche

Die an gestörten und auch ungestörten Proben der untersuchten Lockergesteine durchgeführten Frosthebungsversuche (vgl. 2.3) gestatten das mit Hilfe der Kornkriterien gewonnene Bild zu spezifizieren.

Die größten auf die Ausgangsprobenhöhe bezogenen relativen Hebungen zeigen die Schluffe. Mit zunehmendem Anteil an Ultraschluffkorn — und wie die mineralogischen Untersuchungen beweisen, damit gleichlaufend auch an Tonmineralen — verringern sich die Frosthebungen. Die Feinsande dagegen, die vor allem Körnungen zwischen 0,1 und 0,06 mm Durchmesser aufweisen und deshalb nur hier innerhalb des frostempfindlichen bzw. frostgefährlichen Bereiches liegen, unterhalb von 0,06 mm Durchmesser aber wieder im frostsicheren Bereich verlaufen, zeigen gegenüber allen anderen Lockergesteinen die geringeren Hebungen.

3.923

Ergebnis

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Kornkriterium und Frosthebungsversuch lassen den bedeutsamen Einfluß des unterschiedlichen Mineralaufbaues der Körnungen kleiner als 0,1 mm Durchmesser klar hervortreten. So kommt auch im Kornkriterium SCHAIBLE die mit zunehmendem Tonmineralgehalt der Erdarten (vgl. 3.12)

abnehmende Durchlässigkeit
Wassernachsaugeschwindigkeit
Eislinsenbildung
Frosthebung und damit auch
geringere Tragfähigkeitsminderung
beim Tauvorgang

nicht zum Ausdruck. Bei einem hohen Gehalt an Tonmineralen — und hier besonders an Montmorillonit — unterbindet das Quellvermögen dieser Minerale infolge ihres Gitteraufbaues und ihrer Hydratationskräfte das Nachströmen von Wasser aus der Umgebung in die Frostzone unterhalb von Decke und Unterbau. Ein Lockergestein, das dagegen vorwiegend aus Mineralen vom Quarztyp mit ausschließlich Haftwasserhüllen zusammengesetzt ist, zeigt diese die Frostgefährdung verringernde Erscheinung nicht oder nur in sehr geringem Maße. Diese Tatsache kommt andeutungsweise an den untersuchten Schluffen zum Ausdruck, die mehr Quarz als Geschiebemergel und Geschiebelehm in den feinen und feinsten Korngrößen führen und entsprechend auch etwas stärkere Frosthebungen zeigen. Nach dem Kornkriterium sind sie jedoch ebenso frostgefährlich wie Geschiebemergel und -lehm, was auch bei alleinigem Aufbau aus Quarz der Fall wäre!

Die dünnen Haftwasserhüllen der Körnungen im unteren Feinsandbereich (0,06 bis 0,1 mm Durchmesser) haben — auch wenn diese über 50% des Gesamtanteiles ausmachen — bemerkenswerterweise einen relativ geringen Einfluß auf die Eislinsenebildung und damit auf die Frostgefährdung, wie die Frosthebungsversuche an den Feinsanden vom Klütz-Höved zeigen. Nach dem Kornkriterium SCHAIBLE sind sie jedoch ebenfalls als frostgefährlich zumindest aber als frostempfindlich anzusprechen. Berücksichtigt man dagegen das Kornkriterium nach A. CASAGRANDE, dann müssen sie als frostsicher bezeichnet werden, was indessen den tatsächlichen Verhältnissen auch nicht voll entspricht.

Aus diesen wenigen Beispielen ergibt sich, daß der für eine Angabe der Höhe der Frostgefährdung entscheidende mineralchemische Einfluß der verschiedenen Minerale (Quarz/Kaolinit/Montmorillonit als typische Vertreter des unterschiedlichen Verhaltens gegenüber Wasser) in den Körnungen kleiner als 0,1 mm Durchmesser mit Hilfe dieser Kornkriterien nicht dargestellt werden kann. Ebenfalls nicht erfaßbar sind die in Lockergesteinen häufig vorhandenen Huminsäure- und Eisen/Manganhydroxydgelte, die ähnlich wie quellfähige Tonminerale wirken. Für eine eindeutige Klärung der Frostveränderlichkeit von Erdarten ist somit die Kenntnis der Wasserwerte erforderlich, die außerdem die Feststellung gestatten, ob das Lockergestein beim Auftauen schnell, d. h. schon bei geringer Wasserzugabe, in den bildsamen oder gar breiig-flüssigen Zustand übergeht, wie z. B. Schluff, oder nicht, wie z. B. Montmorillonit.

Die Ursache der ausschließlichen Benutzung von Kornkriterien zur Ermittlung des Grades der Frostveränderlichkeit eines Lockergesteines ist vor allem in der schnellen und einfachen Anwendung, aber auch in der Tatsache begründet, daß in Mitteleuropa die bindigen Verwitterungsböden im allgemeinen einen recht gleichmäßig mit der Kornfeinheit zunehmenden Gehalt an Tonmineralen der Kaolinit- oder Illitgruppe aufweisen. Tonminerale der hochquellfähigen Montmorillonitgruppe sind viel seltener verbreitet. Große Anteile an Humus oder Eisenhydroxyden, die die Frostgefahr erhöhen, verraten sich andererseits durch ihre auffällige schwarze oder rostbraune Färbung.

3.924

Vorschläge

Der die Frostgefährdung vermindernde Einfluß eines hohen Gehaltes an quellfähigen Tonmineralen wird in keinem bekannten Kornkriterium berücksichtigt. Auch wenn das Vorkommen des Lockergesteines ‚Ton‘ auf wenige eng begrenzte Gebiete beschränkt ist, sollte seine Bedeutung hinsichtlich der Frostveränderlichkeit, die im mitteleuropäischen Klima auf jeden Fall feststellbar ist, auch in den Kornkriterien zum Ausdruck kommen. Das könnte am einfachsten durch Abgrenzung einer weiteren ‚frostepfindlichen‘ Zone im Frostkriterium SCHAIBLE erfolgen, die etwa den Bereich mehr als 75% Körnungen kleiner als 0,004 mm Durchmesser und mehr als 50% Körnungen kleiner als 0,002 mm Durchmesser umfassen müßte (vgl. Bild 82 strichpunktierter Bereich und SCHEIDIG [51]).

Der genaue Verlauf muß selbstverständlich durch eine größere Versuchsreihe festgelegt werden, wie sie am Geotechnischen Laboratorium mit Tonen der bekanntesten Vorkommen aus dem Gebiet der DDR vorgesehen ist.

Mit dieser wünschenswerten Ergänzung des Kornkriteriums nach SCHAIBLE können seine Mängel hinsichtlich des wechselnden Mineralaufbaues der Körnungen $<0,1$ mm Durchmesser noch nicht völlig behoben werden. Es müßte deshalb versucht werden, zur Bestimmung der Frostveränderlichkeit einen leicht zu ermittelnden und die bekannten Mängel ausschließenden bodenphysikalischen Kennwert heranzuziehen. Dafür erscheint dem Verfasser nach seinen bisherigen Erfahrungen der

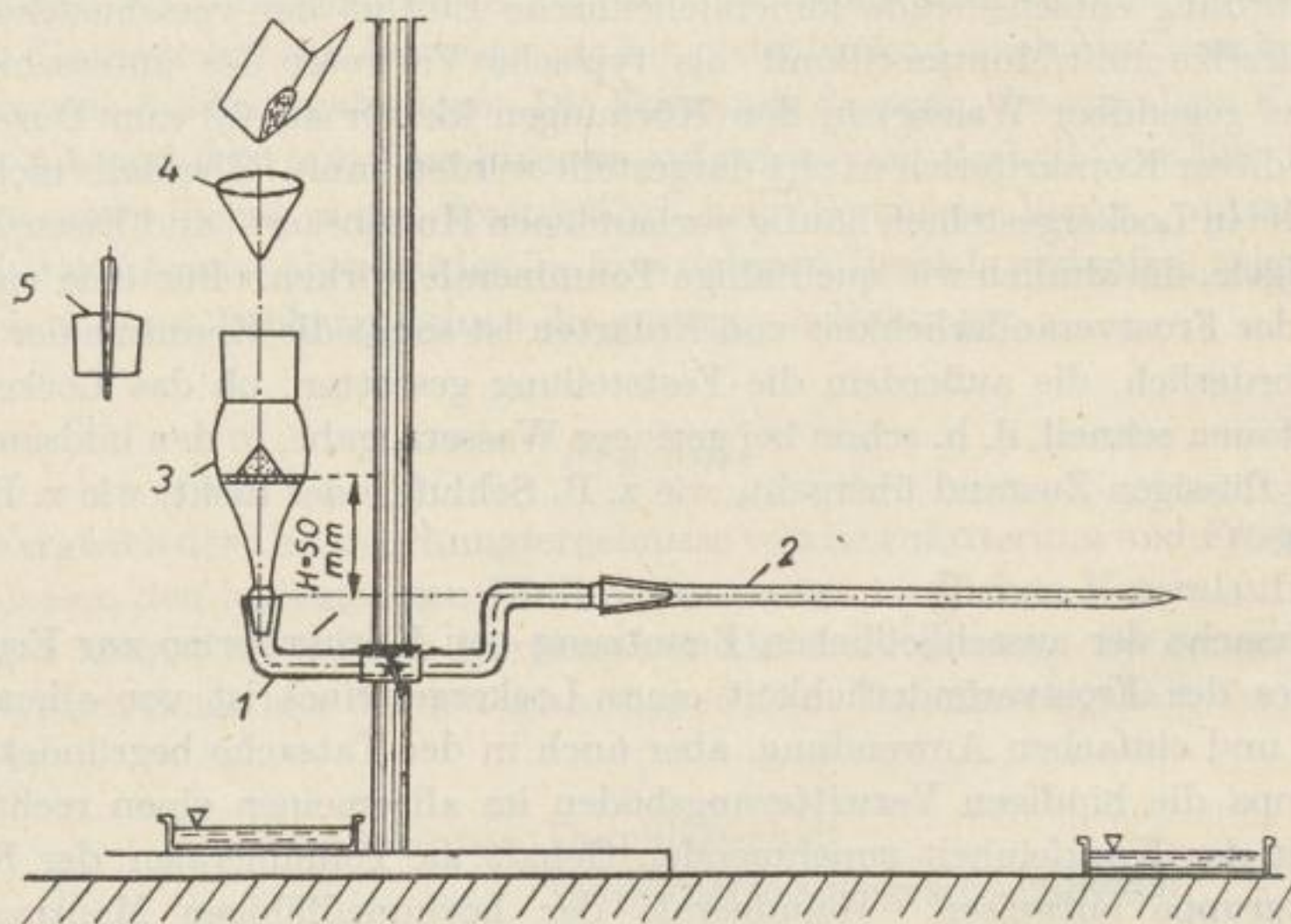


Bild 83. Verbessertes Enslingergerät nach NEFF zur Bestimmung des Wasserbindevermögens

verbesserte Enslinwert — Wasserbindevermögen w_b nach NEFF [52] — besonders geeignet. Bei diesem Verfahren werden die beim alten Enslingerät vorhandenen großen Versuchungenauigkeiten (vgl. 1.52) infolge der Kapillarwirkung bei hohem Quarzkorngehalt durch verbesserte Gerätekonstruktion, höhere Einwaage und Benutzung der Körnungen bis 2,0 mm Durchmesser weitestgehend ausgeschaltet. Die bereits für den Enslinwert bekannt gewordenen, aber oft durch Versuchungenauigkeiten überdeckten engen Beziehungen zu den wichtigsten bodenphysikalischen Kennwerten, wie Bildsamkeit, Durchlässigkeit, Zusammendrückbarkeit usw., und damit auch zu den spezifischen Bodeneigenschaften besitzen für das Wasserbindevermögen erhöhte Gültigkeit und müßten es auch erlauben, die Faktoren, die die Größe der Frostveränderlichkeit bestimmen, durch einen Versuch in einem für die praktischen Belange ausreichendem Maße festzulegen.

Bevor das Wasserbindevermögen zu einer exakten Bestimmung der Frostveränderlichkeit herangezogen werden kann, ist die Durchführung eines Versuchsprogrammes unumgänglich notwendig. Es könnte etwa folgenden Rahmen umspannen:

- | | | | |
|--|------|--------------------------------------|---------------|
| 1. Frosthebungsversuche | } an | a) Kornfraktionen $< 0,1$ mm | } Durchmesser |
| 2. Bestimmung der Kornverteilung | | b) Kornmischungen $< 2,0$ mm | |
| 3. Bestimmung der Bildsamkeit | | c) ungestörten bindigen Proben | |
| 4. Bestimmung der Durchlässigkeit | | d) sämtlichen an Frostschadenstellen | |
| 5. Bestimmung des Wasserbindevermögens | | entnommenen Proben | |

Aufbauend auf diesen grundlegenden Versuchen müßte es möglich sein, die Höhe der Frostveränderlichkeit mit Hilfe der unterschiedlichen Werte für das Wasserbindevermögen (w_b) quantitativ festzulegen. Beispielsweise könnte sich eine Skala folgender Art ergeben:

w_b	Frostveränderlichkeit	Hauptbestandteile
sehr niedrig ($< 20\%$)	frostsicher	Sande $> 0,1$ mm Durchmesser
niedrig (~ 20 bis 30%)	mäßig frostveränderlich	Feinsande $< 0,1$ mm Durchmesser
mittel (~ 30 bis 60%)	hochfrostveränderlich	Schluffkorn (quarzreich)
hoch (~ 60 bis 100%)	frostveränderlich	Schluff- und Ultraschluffkorn (kaolinreich)
sehr hoch ($> 100\%$)	frostsicher	Ultraschluffkorn (montmorillonithaltig)

Bei Ausführung des neuen Enslingerätes aus unzerbrechlichem Glas oder seiner Sicherung durch einen Blechmantel und Eichung der Meßkapillare in ‚Grade der Frostveränderlichkeit‘, was infolge der bei jedem Versuch gleichbleibenden Einwaage ohne weiteres möglich ist, könnte ein Gerät entwickelt werden, das auch für den robusten Baustellenbetrieb gut geeignet wäre.

In diesem Rahmen könnte gleichzeitig versucht werden, die von DÜCKER und KEIL (Tabelle 11) zusammengestellten Handprüfverfahren zur schnellen Abschätzung der Frostveränderlichkeit von Lockergesteinen zu ergänzen, indem beispielsweise eine Einteilung nach der Zerfallszeit unter Wasser („Wasserprüfung“) eine weitere Spezifizierung zulassen müßte.

3.93 Sicherungsmaßnahmen

3.931 Frostschutzschichten

Da die Frostsicherungsmaßnahmen im Straßenbau nicht allein von der Höhe der Frostveränderlichkeit des Untergrundes abhängen, sondern vor allem auch durch die örtlich unterschiedlichen geologischen, hydrologischen, morphologischen und geographischen Verhältnisse und nicht zuletzt durch die Art der Straßenkonstruktion

und die Höhe der Verkehrsdynamik beeinflußt werden, sind verbindliche Angaben über die zweckmäßige Dicke der Frostschutzschichten für jeden Einzelfall nicht möglich. Nur die Mindestdiefe des Erdbauplanums unter FOK kann unter Benutzung der Bemessungstabelle aus den Frostrichtlinien [49] für die untersuchten pleistozänen Lockergesteine angegeben werden. Sie muß bei Geschiebemergel, Geschiebelehm und Schluff mindestens 60 cm, bei schluffigem Feinsand mindestens 50 cm betragen.

Die besonderen Schwierigkeiten bei der Frostsicherung auf Ablagerungen der Grund- und Endmoräne liegen im häufigen Auftreten von Kies-, Sand- oder Schluffeinlagerungen begründet, die im allgemeinen für einen örtlich sehr hohen Wasseranschub zur Frostzone sorgen. Auch eine starke Klüftung und Feingliederung des Geschiebemergels und Geschiebelehmes sind oft die Ursache einer Wasserzirkulation im Untergrund, die sich ungünstig auf das Bauwerk Straße auswirken kann. Weiterhin konnte beobachtet werden, daß die in den pleistozänen Ablagerungen weitverbreiteten Wassertümpel (Sölle o. ä. [53]) oft eine örtliche Übersättigung des Straßenuntergrundes verursachen und damit häufig zu umfangreichen Schäden Veranlassung geben [46]. Auch seitliche Gräben können dann infolge des kapillaren Wasseranstieges den Straßenkörper nicht schützen.

3.932

Untergrundstabilisierung

Auch beim Vorhandensein einer Frostschutzschicht ist auf Geschiebemergel und Geschiebelehm — als Lockergesteine mit einem hohen Bindigkeitsgrad — im allgemeinen noch keine Dauersicherung erreicht, da das sogenannte Erdbauplanum durch das von allen Seiten, nicht nur während der Frost- und Tauperiode zudringende Wasser allmählich aufgeweicht wird. Dadurch kann es seiner Aufgabe als glatte, schwach geneigte Wasserableitungsbahn und vor allem als natürliches Fundament des Bauwerkes Straße nicht mehr gerecht werden. Die Ursache dafür ist der erhebliche Festigkeitssprung zwischen den künstlich aufgebauten Tragschichten und dem bildsamen Untergrund, der in einem stark unterschiedlichen Verformungsmaß (E_v) zum Ausdruck kommt [54]. Ein allmähliches und durch den Einfluß von Wasser ungestörtes Überleiten der Verkehrslasten auf den natürlichen unveränderten Untergrund ist deshalb eine der wichtigsten Aufgaben des neuzeitlichen Straßenbaues. Dazu sind besonders die immer mehr an Bedeutung gewinnenden verschiedenen Methoden der Stabilisierung (Verfestigung) geeignet [55]. Als eines der wirtschaftlichsten Verfahren dieser Art, das besondere Bedeutung für die Planumstabilisierung und damit gleichzeitig für die Schaffung tragfähiger und gegen Witterungseinflüsse unempfindlicher Baustellentransportwege hat, ist die ‚Kalkstabilisierung‘ anzusehen. Infolge der günstigen Rohstofflage auf diesem Gebiet, seiner einfachen keinen neuen umfangreichen Gerätepark erfordernden Anwendbarkeit und des geringen Kostenaufwandes erscheint dieses Verfahren auch für den Straßenbau in der Deutschen Demokratischen Republik besonders geeignet. Es sollten daher alle Anstrengungen unternommen werden, durch grundlegende Untersuchungen eine baldige Einführung in die Praxis vorzubereiten. Als Beitrag dazu ist die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung pleistozäner Lockergesteine durchgeführte Versuchsreihe zur Stabili-

sierung von weichsel- und elstereiszeitlichem Geschiebelehm mit Kalk anzusehen. Das Untersuchungsprogramm konnte sich dabei auf Geschiebelehm beschränken, da sein bodenphysikalisches Verhalten gegenüber dem des Geschiebemergels keine wesentlichen Abweichungen zeigt. Außerdem stellt die durchschnittlich 2 m mächtige Geschiebelehmzone in den weitaus meisten Fällen das Fundament der Straßen dar.

3.10 Die Stabilisierung von Geschiebelehm mit Kalk

3.101 Grundlagen

Man unterscheidet verschiedene Verfahren der sogenannten Bodenstabilisierung, und zwar vor allem die ‚Mechanische Stabilisierung‘, die ‚Stabilisierung mit Zement und bituminösen Bindemitteln‘ und die ‚Stabilisierung mit Kalk‘. Ersteres Verfahren, auch als ‚granulometrische Verfestigung‘ bezeichnet, dient besonders der Erhöhung der Reibungsfestigkeit eines Lockergesteines durch Zugabe von fehlenden Korngrößen, wodurch eine Verringerung des Hohlraumgehaltes und damit eine Vergrößerung der Berührungsflächen im Kornverband erreicht wird. Zement und bituminöse Bindemittel wirken dagegen als Stoffe, die die Kohäsion eines Lockergesteines irreversibel erhöhen oder überhaupt erst schaffen.

Eine Stabilisierung mit Kalk (vgl. 3.104) verursacht in erster Linie eine Gefügewandlung an einem bindigen Lockergestein. Hervorgerufen wird sie durch den Ionenaustausch, der bei der Kalkzugabe zwischen den Na-Ionen der Tone und den Ca-Ionen des Kalkes einsetzt, wodurch die vorhandenen Tonminerale wasserunempfindlicher werden, durch eine Koagulation (Zusammenballung) der bodenphysikalisch wichtigen feinsten Korngrößen (wirksame Korngruppe nach KEIL [8]) zu größeren weniger wasserempfindlichen Teilchen und durch eine Wasserumlagerung, wobei ein Teil des im Boden vorhandenen Wassers an den Kalk gebunden oder angelagert wird.

Außerdem setzt beim Vorhandensein von Tonerdesilikaten mit hohem Gehalt an löslicher Kieselsäure im Boden im Laufe der Zeit eine Kalksilikatbildung (‚hydraulische Verfestigung‘) ein [56 bis 59]. Daraus ergibt sich, daß die Stabilisierung mit Kalk besonders für eine Verbesserung stark bindiger Böden geeignet erscheint.

An der im folgenden erläuterten kurzen Versuchsreihe soll in erster Linie gezeigt werden, inwieweit auch bei einem geringen Aufwand an Untersuchungsmethoden ein Urteil über die Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit einer Stabilisierung von Geschiebelehm mit Kalk gefällt werden kann. Bewußt wurde deshalb auf die Durchführung von Versuchen verzichtet, die eine umfangreiche Geräteausrüstung voraussetzen, schwierig und nur mit einer großen Probemenge durchzuführen sind und deshalb auch in der Praxis selten angewandt werden können. Das Schwergewicht wurde vielmehr auf die einfachen Wasserwerte gelegt, die eine für praktische Zwecke ausreichende Aussage über die Veränderung der Tragfähigkeit zulassen müßten. Im

einzelnen wurden von den verschiedenen Boden-Kalk-Mischungen folgende bodenphysikalischen Kennwerte bestimmt:

Kornanteil < 0,06 mm Durchmesser	}	Bildsamkeit,
Ausrollgrenze		
Fließgrenze		
Breiwasserzahl	}	Durchlässigkeit u. Reibungsbeiwert
Einheitswasserzahl		
Enslinwert		
Zerfall bei Wasserlagerung		
Würfeldruckfestigkeit		

3.102

Verwendeter Kalk

Bunakalk. Bei dem verwendeten Bunakalk handelt es sich um ein Karbidkalkhydrat, das als Abfallprodukt bei der Karbidherstellung anfällt. Es hat folgende Zusammensetzung:

HCL-Unlösliches	0,4%
Kieselsäure	2,8%
Al- u. Fe-Oxyde	1,3%
Kalziumoxyd	68,6%
Magnesiumoxyd	0,4%
Schwefeltrioxyd	0,5%
Glühverlust	26,0%
	<u>100,0%</u>

Das Ergebnis der chemischen Analyse wurde von DAMW Magdeburg zur Verfügung gestellt.

Bornaer Kalk. Der vom VEB Kalkwerk Borna (Kreis Pirna) gelieferte Baukalk (Kalkhydrat) hat nach Angaben des DAMW Dresden folgende chemische Zusammensetzung:

HCL-Unlösliches	14,5%
Kieselsäure	6,7%
Al- u. Fe-Oxyde	8,2%
Kalziumoxyd	45,8%
Magnesiumoxyd	4,6%
Schwefeltrioxyd	0,8%
Glühverlust	18,8%
	<u>99,4%</u>

3.103 Der Einfluß von Kalk auf das bodenphysikalische Verhalten des Klützer und Altenburger Geschiebelehmes

Entsprechend den Literaturangaben [56], die in Abhängigkeit von der vorliegenden Bodenart eine Kalkzugabe zwischen 3 und 8% empfehlen, wurden Versuche

mit 4% 6% 8% 10% 12% 14% Bunakalk, was einem CaO-Gehalt von (2,76) (4,13) (5,52) (6,90) (8,27) (9,65) entspricht und

Tabelle 11. Handprüfverfahren zur Abschätzung der Frostveränderlichkeit von Lockergesteinen nach DÜCKER und KEIL

Frostveränderlichkeitsgrad	Kornprüfung ¹	Faltprüfung ²	Druckprüfung ³	Rollprüfung ⁴	Schüttelprüfung ⁵	Ritzprüfung ⁶	Wasserprüfung ⁷
frostsichere (frostunveränderliche Erdart)	Alle Korngrößen des Bodens sind ohne Schwierigkeit erkennbar	Der Bodenklumpen zerfällt beim Hochheben bzw. beim Fallenlassen aus einigen Zentimetern Höhe in Einzelkörner	Der Bodenklumpen zerfällt bereits bei geringstem Druck	Die Bodenprobe zerbröckelt sofort	Es tritt zum Teil Wasser an die Oberfläche, das aber nicht durch Druck zum Verschwinden gebracht werden kann	Der Boden bildet keine zusammenhängende Masse zur Aufnahme einer Ritzspur	Erdarten verursachen keine merkliche Trübung des Wassers beim Einfüllen in ein mit Wasser gefülltes Gefäß
mäßig frostveränderliche Erdart	Die einzelnen Korngrößen des Bodens lassen sich nicht mehr erkennen	Der Bodenklumpen bleibt zusammenhängend bzw. zerbricht in kleinere Einzelstücke	Der Bodenklumpen läßt sich nur sehr schwer oder überhaupt nicht zerdrücken	Die Bodenprobe läßt sich ohne Schwierigkeit zu „Würstchen“ ausrollen	Die Oberfläche der Bodenprobe wird durch Wasserstritt glänzend, durch Fingerdruck verschwindet das Wasser nicht, Bodenprobe reißt randlich nicht ein	Es entsteht eine glatte nur wenig mehligte Ritzspur, im feuchten Zustand der Probe zeigt die Ritzspur ein glänzendes Aussehen	Sie zerfallen als hasel- oder walnußgroße gleichmäßige dichte Bodenbrocken sehr langsam, sie ergeben bei einer Wasserlagerung von etwa 10 bis 15 Minuten keinerlei wesentliche Veränderung und trüben nur das Wasser unmittelbar im engsten Grenzbereich. Sie saugen Wasser langsam auf
stark frostveränderliche Erdart			Der Bodenklumpen läßt sich bei Anwendung von leichtem bis mäßigem Druck zerdrücken	Die Bodenprobe zerbröckelt sehr rasch, so daß die Prüfung nur mit Schwierigkeiten durchzuführen ist	Die Oberfläche der Bodenprobe wird glänzend; durch Fingerdruck verschwindet das Wasser, die Bodenoberfläche nimmt wieder ein mattes Aussehen an und reißt randlich ein	Es entsteht eine stark mehligte Ritzspur; im feuchten Zustand der Probe zeigt die Ritzspur ein mattes Aussehen	Sie saugen gierig Wasser auf, erweichen dabei stark und zerfallen innerhalb von wenigen Minuten im ungestörten oder gestörten Zustand fast vollständig und trüben das Wasser dabei am stärksten

¹ Zerreiße eine trockene Bodenprobe zwischen den Fingern, breite die Einzelteilchen auf einem Blatt schwarzen Papiers aus und stelle die Größe der Bodenkörner fest (erkennbar, nicht erkennbar).

² Bilde aus einer feuchten Bodenprobe einen walnußgroßen Klumpen, trockne ihn aus, hebe ihn mit einem Griff zwischen Daumen und Zeigefinger einige Zentimeter hoch, lasse ihn dann auf eine harte Oberfläche fallen. Beobachte den Zerfall des Klumpens.

³ Stelle, wie unter ²) beschrieben, einen ausgetrockneten Bodenklumpen her, und versuche, ihn zwischen Daumen und Zeigefinger zu zerdrücken. Ermittle den Festigkeitsgrad des Bodens.

⁴ Nimm eine feuchte Bodenprobe und rolle sie zwischen den Handflächen zu Drähten oder „Würstchen“ aus. Beobachte die leichte oder schwierige Ausführbarkeit des Versuches (plastischer oder bröcklicher Boden).

⁵ Bringe eine feuchte Bodenprobe in die Handfläche und bewege die offene Hand rasch hin und her. Wird die Oberfläche des Bodens infolge austretenden Wassers glänzend, so drücke mit dem Finger auf die Probe und beobachte die Veränderung in dem Aussehen der Oberfläche (Wechsel zwischen glänzend und matt).

⁶ Stelle eine trockene Bodenprobe her und ritze sie mit dem Messer oder dem Fingernagel. Beobachte den Zustand der Ritzspur und das Aussehen der abgeschabten Bodenmasse. Wiederhole den Versuch mit einer feuchten Bodenprobe und stelle das Aussehen der Ritzspur fest (matt oder glänzend).

⁷ Bringe erdfeuchte Probe in wassergefülltes Glas.



SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



mit	2%	4%	6%	8%	Bornaer Kalk, was einem CaO-Gehalt entspricht,
von	(0,92)	(1,84)	(2,76)	(3,68)	

durchgeführt.

Nach der Kalkzugabe wurden die Probemischungen in schwach feuchtem Zustand gut miteinander vermischt und sieben Tage stehengelassen. Erst nach dieser Reaktionszeit wurden die weiter oben aufgezählten Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse der im folgenden kurz erörterten Laboruntersuchungen sind in zwei Tabellen — getrennt nach Geschiebelehm Klütz und Altenburg — am Ende dieses Abschnittes zusammengestellt. Die eigentliche Auswertung und Deutung erfolgt zusammengefaßt im daran anschließenden Abschnitt.

Naßsiebung

Die Versuche, die durch die Kalkzugabe erreichte Krümelung von Feinstkorn und damit Kornvergrößerung mit Hilfe von Schlämmanalysen zu erfassen, scheiterten infolge Ausflockung im Schlämmszylinder. Aus diesem Grunde wurden die verschiedenen Boden-Kalkmischungen mit Hilfe eines gleichbleibenden Wasserstrahles durch ein Sieb von 0,06 mm Durchmesser gespült und damit die Änderung des Feinstkornanteiles überprüft.

Geschiebelehm Klütz. Mit steigender Bunakalkzugabe bis 12% nimmt der Kornanteil <0,06 mm Durchmesser ab, und zwar von 46 auf 29%. Bei weiterer Kalkzugabe vergrößert sich der Feinkornanteil wieder.

Die Zugabe von 2 und 4% Bornaer Kalk bewirkt einen Anstieg des Kornanteiles <0,06 mm Durchmesser gegenüber dem unstabilierten Geschiebelehm. Erst bei weiterer Kalkzugabe sinkt der Feinkornanteil von 46% auf 39% bei 8% Kalk.

Geschiebelehm Altenburg. Der Feinkornanteil, der beim Altenburger Material im Mittel bei etwa 50% liegt, ermäßigt sich bei steigender Bunakalkzugabe bis auf rund 15%.

Die Zugabe von Bornaer Kalk bewirkt ebenfalls eine stetige Abnahme des Kornanteiles <0,06 mm Durchmesser bis auf rund 30% bei 8% Kalkzugabe.

Ergebnis. Bereits mit Hilfe einer sorgfältig durchgeführten Naßsiebung lassen sich die bei Zugabe von Kalk einsetzenden Krümelungserscheinungen nachweisen.

Interessant ist dabei, daß der höhere Tonmineralgehalt des Altenburger Materiales bereits bei einer geringen Kalkzugabe kräftig anspricht und eine Koagulation sowohl bei Vorhandensein von Bunakalk als auch von Bornaer Kalk herbeiführt. Eine optimale Verringerung des Feinkornanteiles ist hier schon bei 6% Bunakalk festzustellen. Die Wirkung des Bornaer Kalkes ist, bezogen auf CaO-Gehalt, nicht so stark.

Beim Klützer Geschiebelehm ist eine wirksame Verringerung des Kornanteiles <0,06 mm Durchmesser erst bei 12% Bunakalk festzustellen, während das Reaktionsvermögen des Bornaer Kalkes auf Klützer Material sehr gering ist.

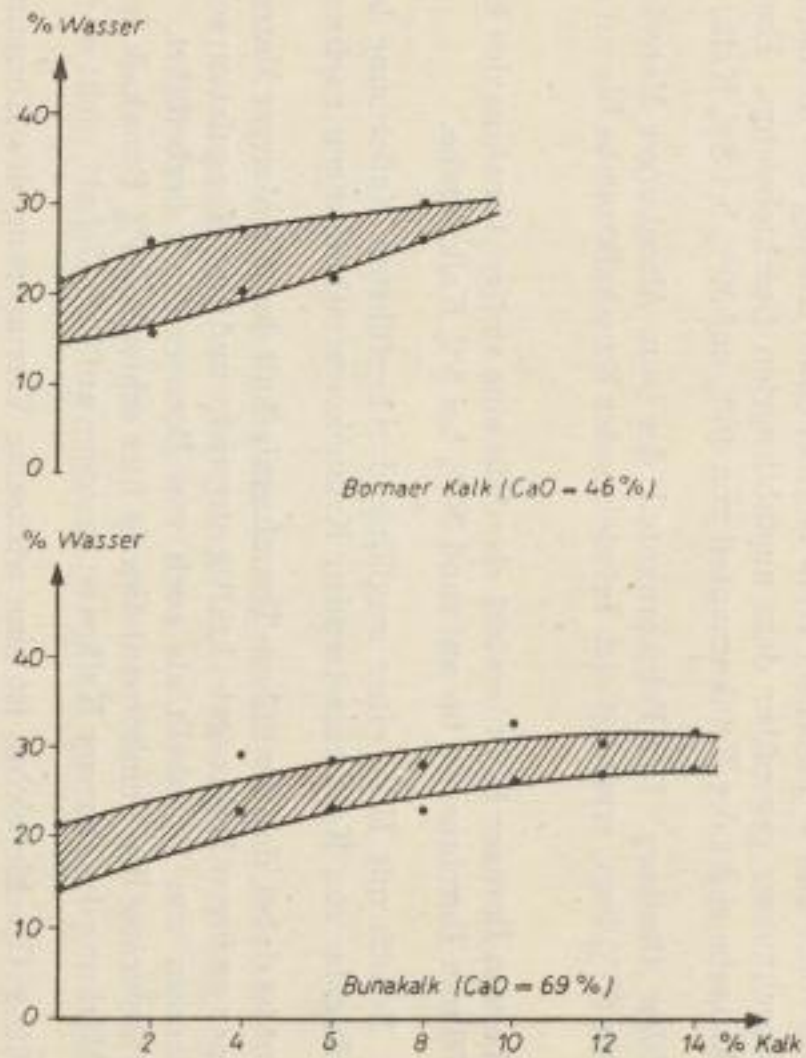


Bild 84. Darstellung der Wirkung einer wechselnden Kalkzugabe zu Geschiebelehm Klütz-Höved auf $w_a - w_l - w_{fa}$

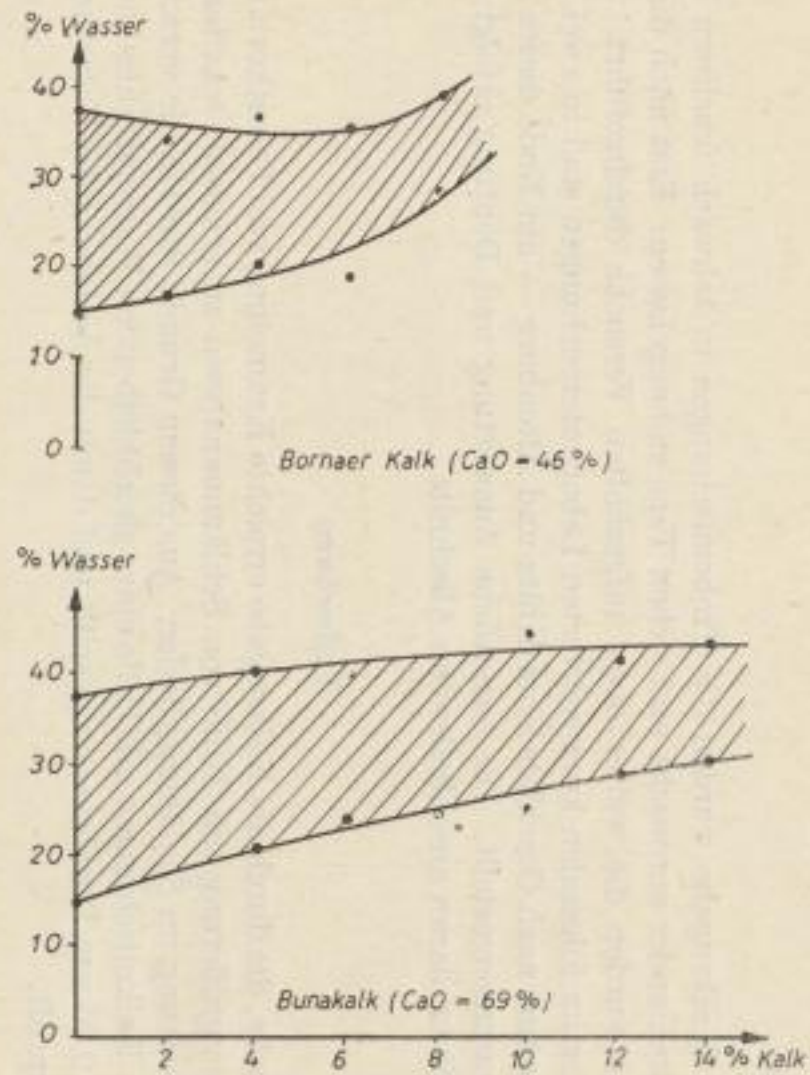


Bild 85. Darstellung der Wirkung einer wechselnden Kalkzugabe zu Geschiebelehm Altenburg auf $w_a - w_l - w_{fa}$

Ausrollgrenze

Geschiebelehm Klütz. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze nimmt bei Zugabe von Bunakalk stetig zu. Er steigt von 14% am nichtstabilisierten Geschiebelehm auf 27% bei einem Gehalt von 14% Bunakalk. Auch bei Verwendung von Bornaer Kalk ist dieses Verhalten zu erkennen. Schon bei 8% Bornaer Kalk hat das Gemisch eine Ausrollgrenze von 26% (Bild 84).

Geschiebelehm Altenburg. Die Ausrollgrenze des Geschiebelehmes (15%) erhöht sich bei Zugabe von Bunakalk stetig bis auf ca. 32%. Das gleiche Verhalten ist bei Zugabe von Bornaer Kalk festzustellen. Hier erreicht die Ausrollgrenze bereits bei einem Gehalt von 8% Bornaer Kalk einen Wert von 28% (Bild 85).

Ergebnis. Die Ausrollgrenze spricht auf die Zugabe von Kalk sehr gut an. Darin kommt die Wirkung der Wasseranlagerung von Kalk („innere Austrocknung“) des Systems Boden-Kalk besonders zum Ausdruck, wodurch eine bestimmte im System vorhandene Menge Wasser bodenphysikalisch nicht mehr wirksam werden kann.

Die Auswirkung der wechselnden Kalkzugaben ist auf die beiden untersuchten Geschiebelehme fast gleich. Als optimaler Kalkgehalt bei Betrachtung der Ausrollgrenze sind etwa 4 bis 6% Bunakalk und 8% Bornaer Kalk anzugeben.

Die besondere Bedeutung einer Erhöhung der Ausrollgrenze kommt vor allem darin zum Ausdruck, daß der im Erdbau gefährliche Prozeß eines Aufweichens des Untergrundes bei Regenfällen verzögert oder gar verhindert wird.

Fließgrenze

Geschiebelehm Klütz. Die Fließgrenze zeigt bei einer Erhöhung des Bunakalkgehaltes im Geschiebelehm Klütz kein stetiges Ansteigen. Eine gewisse ansteigende Tendenz ist allerdings zu erkennen, indem der Wassergehalt der Fließgrenze von rund 22% am unstabilierten Boden auf etwa 30% bei einem Kalkgehalt zwischen 10 und 14% zunimmt.

Mit Bornaer Kalk ist dagegen eine stetige Zunahme bis auf etwa 30% festzustellen.

Geschiebelehm Altenburg. Für Bunakalk liegen die Verhältnisse ähnlich wie beim Klützer Material. Die Tendenz einer Erhöhung der Fließgrenze ist indessen sehr schwach. Der Bornaer Kalk bewirkt dagegen sogar ein Absinken der Fließgrenze, die erst bei 8% Kalkzugabe wieder den gleichen Wert wie am Grundmaterial annimmt.

Ergebnis. Die Fließgrenze ist für eine Feststellung der Wirkung von Kalk auf Geschiebelehm nicht besonders geeignet, da mit zunehmendem Kalkgehalt keine gleichmäßige Veränderung der Fließgrenze verbunden ist, wie man eigentlich erwarten sollte. Die festgestellten Schwankungen können wohl nur darauf zurückgeführt werden, daß die Krümelbildung den bei hohem Wassergehalt einsetzenden Fließvorgang — infolge Aufhebung der Hydratationskräfte — unregelmäßig be-

einflußt. Weiterhin kann man an Hand der Versuchsergebnisse folgern, daß bei einer Überschreitung des optimalen Verhältnisses Boden: Kalk der nicht reagierende feinkörnige Kalkanteil eine Abnahme der Fließgrenze bewirkt.

Bildsamkeit

Entsprechend der erläuterten Schwankungen der Fließgrenze bei der Zugabe von Kalk, zeigt auch die Bildsamkeit — als Differenz von Fließgrenze und Ausrollgrenze — in den Einzelwerten gewisse Schwankungen. Grundsätzlich ist dabei jedoch zu erkennen, daß der bildsame Bereich im Geschiebelehm mit steigender Kalkzugabe nach oben rückt. Besonders deutlich ist das am Geschiebelehm Klütz zu erkennen. Der Geschiebelehm Altenburg ist hinsichtlich einer Veränderung der Bildsamkeit — offenbar infolge seines höheren Tonmineralgehaltes — wesentlich träger. Die geringen Zugaben von Bornaer Kalk zeigen das sehr deutlich. In der Tendenz ist auch bei allen Untersuchungen eine Abnahme der Bildsamkeit mit der Höhe der Kalkzugabe festzustellen.

Breiwasserzahl

Geschiebelehm Klütz. Mit zunehmendem Gehalt an Bunakalk steigt die Breiwasserzahl an, und zwar von ca. 0,33 beim reinen Geschiebelehm auf etwa 0,42 bei 10/12/14% Kalkzugabe. Das Optimum ist also offenbar bei 10% schon überschritten.

Auch eine Zugabe von Bornaer Kalk bewirkt eine gleichmäßige Erhöhung der Breiwasserzahl, die hier schon bei 8% Kalk einen Wert von 0,42 erreicht.

Geschiebelehm Altenburg. Sowohl Bunakalk als auch Bornaer Kalk bewirken einen gleichmäßigen Anstieg der Breiwasserzahl, im ersten Fall von 0,46 auf fast 0,72, im zweiten Falle bis fast 0,59.

Ergebnis. Die Wirkung der Kalkzugaben zeigen sich im Gegensatz zu den Ergebnissen bei der Fließgrenze in einem kontinuierlichen Anwachsen des Wertes für die Breiwasserzahl. Dabei ist auffällig, daß das Altenburger Material hier eine wesentlich stärkere Reaktion zeigt, und die Breiwasserzahl schon bei geringen Kalkzugaben stark ansteigt. Das Optimum liegt für den Klützer Geschiebelehm bei etwa 10% Bunakalk und 8% Bornaer Kalk. Beim Altenburger Material bei 6% Bunakalk und 8% Bornaer Kalk.

Einheitswasserzahl

Geschiebelehm Klütz. Die Zugabe von Kalk wirkt sich am Klützer Material in einer gleichmäßigen Erhöhung der Einheitswasserzahl aus. Mit Bunakalk steigt sie von 0,16 auf 0,29, mit Bornaer Kalk bis auf 0,28.

Geschiebelehm Altenburg. Auch beim Altenburger Material ist ein kontinuierlicher Anstieg der Breiwasserzahl — mit Ausnahme des Wertes für 12% Bunakalk — festzustellen. Mit Bunakalk nimmt w_1 von 0,23 auf 0,38 zu, mit Bornaer Kalk auf 0,24.

Ergebnis. Die Wirkung des Bunakalkes auf beide Geschiebelehme ist fast gleich, nur bei Bornaer Kalk zeigt der Klützer Geschiebelehm ein wesentlich höheres Ansteigen der Einheitswasserzahl. Das Optimum der Bunakalkzugabe liegt, gemessen an seinem Einfluß auf die Erhöhung von w_1 an beiden Geschiebelehmen bei rund 8%, bei Bornaer Kalk für das Klützer Material ebenfalls bei 8%, bei Altenburger Geschiebelehm ist das Optimum mit 8% noch nicht erreicht.

OHDEzahl w_0-w_1

Die OHDEzahl schwankt als Folge des nicht überall gleichmäßigen Anstieges der Brei- und Einheitswasserzahl unregelmäßig.

Maximales Wasseraufnahmevermögen (Enslinwert)

Das maximale Wasseraufnahmevermögen kann für die Auswertung der vorliegenden Versuchsreihe nicht herangezogen werden, da die Versuchsungenauigkeiten auffällig groß sind.

Wasserlagerungsversuche

Zur Durchführung der Wasserlagerungsversuche wurden Würfel von der Größe $5 \times 5 \times 5$ cm hergestellt. Um mit vergleichbaren Ausgangswerten arbeiten zu können, wurden alle Würfel bei einem Wassergehalt an der Ausrollgrenze in drei Schichten in die Form eingebaut und mit einem Stampfer etwa gleichmäßig verdichtet. Nach eintägiger Abbindezeit wurden die Würfel vorsichtig in wassergefüllte Gefäße eingebracht und aller zwei Stunden die Veränderungen festgestellt.

Geschiebelehm Klütz. Der nicht mit Kalk stabilisierte Würfel nimmt langsam Wasser auf, beginnt nach wenigen Stunden zu reißen, an den Kanten abzubröckeln und ist nach drei Tagen Wasserlagerung völlig zerfallen (Bild 86a). Die mit 4 bis 14% Bunakalk stabilisierten Würfel zeigen dagegen auch nach 28tägiger Wasserlagerung keinerlei Veränderung.



Bild 86a. Ergebnis einer 28 tägigen Wasserlagerung von Geschiebelehm Klütz + Bunakalk

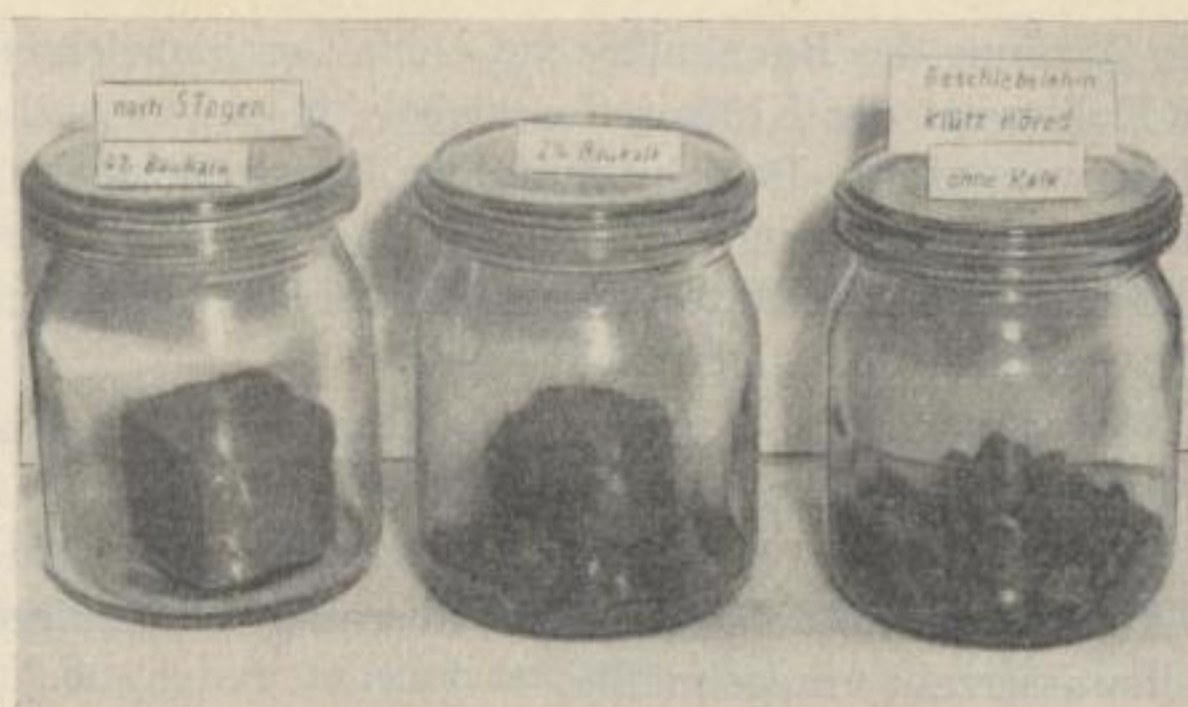


Bild 86 b. Ergebnis einer 28tägigen Wasserlagerung von Geschiebelehm Klütz + Bornaer Kalk

Die Zugabe von 2% Bornaer Kalk bewirkt andererseits noch keine volle Stabilität, was sich in einem allmählichen Abbröckeln an den Kanten und einem Zerfall bis auf einen stabilen Mittelteil bemerkbar macht (Bild 86 b). Bereits die Zugabe von mehr als 4% Bornaer Kalk verhindert dagegen den Zerfall der Probewürfel.

Geschiebelehm Altenburg. Die reine Geschiebelehmprobe ohne Kalk zeigt die gleichen Erscheinungen wie das Klützer Material und ist nach fünf Tagen völlig zerfallen. Alle mit Bunakalk stabilisierten Würfel sind dagegen dauerstabil (Bild 87 a), auch nach 28 Tagen konnten keinerlei Veränderungen an den Würfeln beobachtet werden.



Bild 87 a. Ergebnis einer 28tägigen Wasserlagerung von Geschiebelehm Altenburg + Bunakalk

Eine Zugabe von mehr als 8% Bornaer Kalk zum Altenburger Geschiebelehm bewirkt eine Dauerstabilität bei Wasserlagerung. Mit 2% Kalk zerfällt die Probe allmählich bis auf ein stabiles Mittelstück (Bild 87 b). Auch die Würfel mit 4 und 6% Bornaer Kalk zeigen bei Wasserlagerung noch keine völlige Stabilität, an denen sich bereits nach zwei Tagen schwache Risse vor allem an Kanten und Ecken bilden, die allerdings keinen Zerfall und kein Abbröckeln auslösen.

Ergebnis. Der höhere Tonmineralgehalt des Altenburger Geschiebelehmes wirkt sich in einem langsameren Zerfall der reinen Probe und in Ribbildung auch bei 4 und



Bild 87 b. Ergebnis einer 28tägigen Wasserlagerung von Geschiebelehm Altenburg + Bornaer Kalk

6% Bornaer Kalk aus. Mit 4% Bunakalk behandelte Proben lassen dagegen ausnahmslos Stabilität erkennen.

Würfeldruckfestigkeit

Nach 28tägiger Wasserlagerung wurden sämtliche stabilisierten Würfel unter einer 12-t-Presse abgedrückt.

Geschiebelehm Klütz. Bis zu einem Gehalt an 8% Bunakalk steigt die Würfeldruckfestigkeit kontinuierlich von 1,4 bis auf 3,0 kp/cm² an, bei 10% fällt sie stark ab und erreicht etwa bei 12 und 14% wieder das Maximum.

Die Versuche mit Bornaer Kalk zeigen einen allmählichen Anstieg der Würfeldruckfestigkeit von 1,0 kp/cm² bei 4% bis auf 2,2 kp/cm² bei 8% Kalkgehalt.

Geschiebelehm Altenburg. Die Zugabe von Bunakalk erhöht die Würfeldruckfestigkeit von 1,6 kp/cm² bei 4% bis auf 3,8 kp/cm² bei 10%, dann erfolgt ein Abfall auf 2,7 bzw. 2,9 kp/cm².

Die Entstehung von Rissen in den mit 4 und 6% stabilisierten Würfeln wirkt sich in einer sehr niedrigen Druckfestigkeit aus (0,4 und 0,6 kp/cm²), erst die Probe mit 8% Bornaer Kalk zeigt einen höheren Wert von 1,9 kp/cm².

Ergebnis. Die Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit ist für die Feststellung optimaler Kalkzugaben offenbar gut geeignet, was sich in der gleichmäßigen Erhöhung bei zunehmendem Kalkgehalt ausdrückt. Die Abnahme der Festigkeitswerte ab 10% Bunakalk bei Geschiebelehm Klütz und ab 12% bei Geschiebelehm Altenburg dürfte auf einen zu hohen Kalkgehalt schließen lassen, der mit dem Boden nicht mehr reagieren kann und deshalb nur als Feinkornanteil wirkt.

Durchlässigkeitskoeffizient aus w_0/w_1

Geschiebelehm Klütz. Die Durchlässigkeit des Materials wird mit zunehmendem Kalkgehalt größer. Bei Bunakalk erhöht sie sich bis auf $1 \cdot 10^{-6}$ cm/s, bei Bornaer

Tabelle 12. Bodenphysikalische Kennwerte. Geschiebelehm Klütz-Höved bei Zugabe von Kalk
 Bunakalk (CaO = 69%) Bornaer Kalk (CaO = 46%)

Kennwert	0% CaO	4% 2,76%	6% 4,13%	8% 5,52%	10% 6,9%	12% 8,27%	14% 9,65%	Ten- denz	2% 0,92%	4% 1,84%	6% 2,76%	8% 3,68%	Ten- denz
w_a	0,144	0,225	0,229	0,232	0,261	0,271	0,274	s	0,159	0,201	0,218	0,262	s
w_l	0,216	0,291	0,2825	0,280	0,326	0,302	0,315	—	0,264	0,268	0,284	0,2975	—
w_{fa}	0,072	0,066	0,0535	0,048	0,065	0,031	0,041	f	0,106	0,067	0,066	0,0355	f
w_0	0,327	0,348	0,358	0,287	0,423	0,420	0,424	s	0,341	0,354	0,391	0,415	s
w_1	0,159	0,215	0,245	0,260	0,271	0,290	0,291	s	0,155	0,188	0,201	0,276	s
w_{el}	0,168	0,113	0,133	0,127	0,152	0,130	0,133	—	0,186	0,166	0,190	0,139	—
$k \sim$ (OHDE)	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	s	$6 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-7}$	s
μ_0 (OHDE)	0,62	0,64	0,65	0,63	0,615	0,625	0,625	—	0,58	0,62	0,50	0,62	—
w_{max} %	73,7	76,7	74,1	86,4	97,8	81,4	92,7	—	97,1	78,6	85,0	92,7	s
<0,06mm %	46,0	45,2	45,2	39,5	40,5	29,1	41,7	—	48,0	47,6	44,3	39,1	f
Druck- festigkeit kp/cm ²	—	1,4	2,8	3,0	1,9	2,9	2,9	—	—	1,0	1,8	2,2	s

s = steigende Tendenz; f = fallende Tendenz

Tabelle 13. Bodenphysikalische Kennwerte. Geschiebelehm Altenburg bei Zugabe von Kalk
 Bunakalk (CaO = 69%) Bornaer Kalk (CaO = 46%)

Kennwert	0% CaO	4% 2,76%	6% 4,13%	8% 5,52%	10% 6,9%	12% 8,27%	14% 9,65%	Ten- denz	2% 0,92%	4% 1,84%	6% 2,76%	8% 3,68%	Ten- denz
w_a	0,153	0,209	0,242	0,253	0,255	0,288	0,307	s	0,170	0,205	0,193	0,284	s
w_f	0,382	0,405	0,403	0,426	0,450	0,419	0,439	—	0,340	0,369	0,352	0,391	—
w_{fa}	0,229	0,196	0,161	0,173	0,170	0,131	0,132	—	0,170	0,164	0,159	0,107	f
w_o	0,463	0,537	0,607	0,601	0,642	0,651	0,715	s	0,463	0,513	0,559	0,586	s
w_1	0,230	0,267	0,269	0,361	0,379	0,339	0,381	s	0,299	0,233	0,235	0,241	s
w_{o1}	0,233	0,270	0,388	0,240	0,263	0,312	0,334	—	0,234	0,280	0,324	0,345	s
$k \sim$ (OHDE)	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	—	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	—
μ_0 (OHDE)	0,55	0,52	0,48	0,54	0,52	0,50	0,48	—	0,55	0,52	0,49	0,47	f
w_{max} (%)	95,0	94,8	93,7	92,3	90,0	73,0	50,0	f	86,0	76,0	67,3	38,0	f
<0,06mm (%)	49,7	30,8	24,0	24,1	17,9	14,9	15,9	f	48,2	46,6	32,7	33,4	f
Druck- festigkeit kp/cm ²	—	1,6	2,8	2,7	3,8	2,7	2,9	—	—	0,4	0,6	1,9	s
s = steigende Tendenz; f = fallende Tendenz													

Die Stabilisierung von Geschiebelehm mit Kalk

Kalk bis auf $8 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Der Wert für das Ausgangsmaterial liegt bei etwa $3 \cdot 10^{-8}$ cm/s.

Geschiebelehm Altenburg. Am Geschiebelehm Altenburg läßt sich mit Hilfe von w_0/w_1 nur eine geringfügige Veränderung der Durchlässigkeit bei zunehmendem Kalkgehalt feststellen, die außerdem erst ab 8% Bunakalk wirksam wird und hier im Mittel bei etwa $1 \cdot 10^{-7}$ cm/s liegt.

Ergebnis. Die aus w_0/w_1 bestimmte Durchlässigkeit ist für eine Klärung der bei Kalkzugabe einsetzenden Reaktionen nur bedingt brauchbar. Es ist im wesentlichen nur eine Tendenz der Erhöhung der Durchlässigkeit bei zunehmendem Kalkgehalt erkennbar, die mit wachsendem Tonmineralgehalt in einer Probe offenbar immer schwächer wird.

Reibungsbeiwert aus w_0/w_1

Die Ermittlung des Reibungsbeiwertes aus den beiden OHDEZahlen ist für eine Klärung der Verhältnisse bei der Stabilisierung mit Kalk ohne Nutzen. Die festgestellten Werte schwanken außerordentlich unregelmäßig, so daß keine Abhängigkeiten erkennbar sind.

3.104

Schlußfolgerungen

Mineralchemische Veränderungen

Die Zugabe von Kalk auf die untersuchten Geschiebelehme macht sich in zweierlei Weise bodenphysikalisch bemerkbar. So wird der Feinkornanteil des bindigen Materials durch die bei der Kalkzugabe einsetzende Krümelbildung herabgesetzt, andererseits verursacht der Kalk ein Abbinden größerer Wassermengen, offenbar als Folge der hohen Absorptionsfähigkeit seiner großen spezifischen Oberfläche. Eine chemische Bindung des im Boden vorhandenen Wassers ist bei Zugabe von Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, 'gelöschter Kalk') nicht möglich. Dieses absorbierte Wasser wird im Trockenofen bei 105°C zwar ausgetrieben, ist aber trotzdem im bodenphysikalischen Sinne nicht wirksam.

Die Ursache der wichtigen Kornvergrößerung ist letztlich eine Folge des Ionenaustausches in den kolloiddispersen Tonmineral-Systemen innerhalb der bindigen Lockergesteine. Da artgleiche Bodenteilchen ein gleichnamiges elektrisches Potential aufweisen, stoßen sie sich ab und verhindern eine dauerhafte Zusammenballung. Bei Zugabe von Kalk reagieren die nun vorhandenen Ca-Ionen mit den durch die Tonminerale attrahierten Na- und H-Ionen. Es tritt ein Ionenaustausch ein, der eine Änderung des Teilchenpotentials hervorruft, die abstoßenden Kräfte verringert oder aufhebt und eine relativ stabile Zusammenballung auslöst. Außerdem kommt es nach einer gewissen Zeit noch zu einer Reaktion zwischen Kalk und der meist in bindigen Lockergesteinen in größerer oder kleinerer Menge vorhandenen kolloidalen Kieselsäure. Im Geschiebelehm als Verwitterungsboden ist mit einem Vorhanden-

sein dieser Moleküle und Molekülgruppen auf jeden Fall zu rechnen. Die dabei entstehenden Kalksilikate sind wasserbeständig und bilden das schwerzerstörbare Gerüst, das die Sekundärteilchen zusammenhält. Das ist auch die Ursache für eine Stabilität kalkverfestigter Erdarten bei Lagerung unter Wasser und deren höhere Druckfestigkeit gegenüber dem unverfestigten Boden.

Sind die in einem Lockergestein vorhandenen Tonminerale als Reaktionspartner des Kalkes aufgebraucht, so wirkt der darüber hinaus zugegebene Kalk nur noch als Feinkornanteil im bodenphysikalischen Sinne. Eine Folge dieser Erscheinung ist das bei höheren Kalkzugaben meist zu erkennende Nachlassen der Wirksamkeit.

Der höhere Tonmineralanteil des Altenburger Geschiebelehmes und das Vorhandensein von Illit (vgl. 3.12 und 3.4) macht sich in einer starken Veränderung der Kennwerte schon bei Zugaben von 4 bis 5% CaO bemerkbar. Im Gegensatz dazu zeigt der Klützer Geschiebelehm eine wesentliche Veränderung des bodenphysikalischen Verhaltens erst bei — im Mittel 6% — Kalkzugabe. Bei beiden Geschiebelehmen kommt gleichermaßen eine etwas stärkere Reaktion des Bornaer Kalkes (bezogen auf CaO) zum Ausdruck, was auf den Gehalt des Bunakalkes an Azetylen zurückgeführt wird, das bei Wasserzugabe langsam unter schwachem Brausen entweicht und die Krümelbildung und chemische Reaktion des Kalkes offenbar hinauszögert und z. T. verringert. Es ist auch anzunehmen, daß der wesentlich höhere SiO₂-Gehalt des Bornaer Kalkes ein Abbinden — im Sinne der Bildung von Puzzolanen — begünstigt.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Frage der Dauer des Reaktionsablaufes bei beiden Geschiebelehmen, der durch Ermittlung von w_a , w_0 und w_1 8 Std., 1, 2, 4 und 8 Tage nach der Zugabe von 10% Bunakalk überprüft wurde (Tabelle 14). Dabei ist zu erkennen, daß beim tonmineralarmen Klützer Geschiebe-

Tabelle 14. Wirkung einer 10%igen Bunakalkzugabe auf w_a — w_0 — w_1 von Geschiebelehm nach 8 Std., 1, 2, 4 und 8 Tagen

Zeit	Geschiebelehm Klütz			Geschiebelehm Altenburg		
	w_a	w_0	w_1	w_a	w_0	w_1
Vor Kalkzugabe	0,14	0,33	0,16	0,15	0,46	0,23
8 Std. nach Kalkzugabe	0,22	0,42	0,28	0,25	0,56	0,36
24 Std. nach Kalkzugabe	0,24	0,41	0,29	0,27	0,58	0,40
48 Std. nach Kalkzugabe	0,23	0,46	0,29	0,27	0,61	0,40
96 Std. nach Kalkzugabe	0,23	—	—	0,31	—	—
142 Std. nach Kalkzugabe	0,24	—	—	0,30	—	—

lehm die Umsetzung und Veränderung praktisch nach 8 Stunden abgeschlossen ist, während sie beim Altenburger Material zwar auch innerhalb 8 Stunden wesentliche Fortschritte macht, in den folgenden 8 Tagen aber weiter beträchtlich zunimmt. Daraus ist zu schließen, daß der die Umsetzungen einleitende Ionenaustausch Na⁺,

$H^+ \longleftrightarrow Ca^{++}$ bei einem höheren Tonmineralgehalt und beim Vorhandensein glimmerähnlicher Tonminerale erst nach und nach zur Wirkung kommt.

Einfluß der Kalkzugabe auf Scherfestigkeit, Zusammendrückbarkeit, Verdichtungswilligkeit und Frostveränderlichkeit

Es ist erforderlich, in dieser Auswertung der Versuchsreihe auch die wichtige Frage einer Änderung der Scherfestigkeit, Zusammendrückbarkeit, Verdichtungswilligkeit und Frostveränderlichkeit des Systems Boden-Kalk zu berühren. Die Ergebnisse der ermittelten Wasserwerte, die ja Rückschlüsse auf fast alle bodenmechanischen Kennwerte zulassen (vgl. 3.11), und die verschiedenen im Geotechnischen Laboratorium durchgeführten Untersuchungen [60, 61], gestatten auch zu diesem Problem eine Stellungnahme. Das etwa gleichmäßige Ansteigen der Ausroll- und Fließgrenze und eine gewisse dabei zu erkennende Verringerung der Bildsamkeit bei Kalkzugabe sind ein Ausdruck für die zunehmende Immunisierung der Tonminerale und die starke Zunahme eines sich gegenüber Wasser ähnlich wie Quarz verhaltenden Feinkornes (vgl. 1.52). Diese Immunisierung der Tonminerale muß sich auch auf eine Erhöhung der Reibungsfestigkeit und eine Abnahme der Setzungsempfindlichkeit, d. h. eine Vergrößerung der Steifeziffer auswirken. Die zu erwartende Abnahme der Kohäsion wird durch eine gleichlaufende Verkittung wieder ausgeglichen. Bemerkenswert ist dabei, daß die Verkittung bei Kalkzugabe nicht nur im Feinkornbereich ($< 0,06$ mm Durchmesser), sondern auch in allen Fraktionen des Sandkornes (0,06 mm bis 2,0 mm Durchmesser) wirksam ist, wie durch Untersuchungen unter dem Binokular bestätigt werden konnte. Diese Veränderung ist ebenfalls eine Ursache für das Ansteigen der Scherfestigkeit und die Verringerung und Zusammendrückbarkeit, wodurch die Tragfähigkeit verbessert wird.

Entsprechend der Immunisierung des Tonmineralgehaltes und der Kornvergrößerung durch Zusammenballung und Verkittung bei Kalkzugabe müßte auch gegenüber der unstabilierten Erdart eine Erhöhung der Proctordichte (γ_p) und eine Verringerung des günstigsten Wassergehaltes (w_p) eintreten. Diese Annahme konnte bei keiner der Untersuchungen [60, 61, 62] bestätigt werden. Es ist vielmehr eindeutig das Gegenteil der Fall: mit zunehmendem Kalkgehalt in einem bindigen Boden verringert sich kontinuierlich die Proctordichte und erhöht sich der günstigste Wassergehalt. Die Änderung von w_p in einem mit 5% Kalk stabilisiertem Boden beträgt dabei nur wenige Prozente, so daß aus den Ergebnissen der Proctorversuche mit dem unstabilierten Material bereits mit einer für die praktischen Beläge hinreichenden Genauigkeit auf den günstigsten Wassergehalt des stabilisierten Bodens geschlossen werden kann. Für die untersuchten Erdarten ist bei einer optimalen Kalkzugabe von 4 bis 5% für Geschiebelehm Altenburg und von 6% für Geschiebelehm Klütz mit einem Anstieg des günstigsten Wassergehaltes auf etwa 15% zu rechnen. Als Ursache für die bodenphysikalisch unerwartete Verringerung von γ_p und den Anstieg von w_p kann nur ein großer bleibender Luftporenraum infolge der bimssteinähnlichen Gefügeentwicklung durch die Verkittung und die starke Wasseranlagerungsfähigkeit des Kalkes als Folge seiner großen spezifischen Oberfläche angesehen werden.

Hinsichtlich der Frage der Frostveränderlichkeit läßt sich an Hand der bisherigen Erkenntnisse sagen, daß die Kornvergrößerung durch Kalkzugabe eine Abnahme der Frostveränderlichkeit erwarten läßt, sofern dabei auch das aus Quarz bestehende Feinkorn $< 0,06$ mm Durchmesser in ausreichendem Maße durch die Verkittung ausgeschaltet wird. Bleibt der feinkörnige Quarz erhalten, so kann durch die bei der Kalkzugabe erreichte Erhöhung der Durchlässigkeit eine Verstärkung der Frostgefährdung eintreten. Auch durch eine zu hohe Zugabe an Kalk, der nicht mehr reagieren kann und deshalb eine Erhöhung des Feinkorngehaltes im Boden verursacht, wird die Frostgefahr verstärkt.

Abschließend läßt sich sagen, daß mit Hilfe der einfachen Wasserwerte ein ausreichender Überblick über die Möglichkeit und Wirtschaftlichkeit der Stabilisierung einer Erdart mit Kalk gewonnen werden kann, der gleichzeitig Schlüsse hinsichtlich der Verbesserung der Tragfähigkeit zuläßt.

Literatur

- [1] KLENGEL: Lagerungsverhältnisse des Pleistozäns in der Steilküste des Gr.- u. Kl.-Klützhöved. Unveröff. Diplomarbeit Bergakademie Freiberg 1955.
- [2] KLENGEL: Ingenieurgeologische Betrachtungen zum Abtrag des Altenburger Eisenbahntunnels. Zeitschr. f. Angew. Geol. 10 (1960).
- [3] GRAHMANN: Grundriß der Quartärgeologie Sachsens. Leipzig 1934.
- [4] HOFFMANN: Über die Grundlagen der Plastizität. Mitteilg. der Deutschen Keramischen Gesellschaft 2 (1949).
- [5] SCHROEDER: Die Struktur der Tonminerale. Wiss. Zeitschr. d. Univ. Rostock 4 (1954/55) H. 4.
- [6] HOFFMANN/GIESE: Das Kationenaustauschvermögen der Tone. Mitteilg. der Deutschen Keramischen Gesellschaft.
- [7] SCHÄTZER: Keramik. Berlin 1954: VEB Verlag Technik.
- [8] KEIL: Geotechnik. Halle 1959: VEB W. Knapp-Verlag.
- [9] SCHULTZE/MUHS: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1950: Springer-Verlag.
- [10] CASAGRANDE: Notes of the design of the liquid limit device. Geotechnique H. 6 (1958).
- [11] SKEMPTON: The Colloidal Activity of Clays. Proceedings Intern. Conf. Soil Mechanics. Aug. 1953 I, 1—4.
- [12] OHDE: Neue Erdstoff-Kennwerte. Die Bautechnik 11 (1950).
- [13] STEIN: Universalprüfgerät für Lockergesteine. Wiss. Zeitschr. der HfV. Dresden, 4 (1956) Heft 2/3.
- [14] KLENGEL: Laboruntersuchungen zur Feststellung der Frostveränderlichkeit von Locker- und Felsgesteinen. Zeitschr. f. Angew. Geologie H. 8 (1958).
- [15] ILLIES: Die Schrägschichtung in fluviatilen und litoralen Sedimenten. Mitt. a. d. Geol. Staatsinst. Hamburg 19 (1949).
- [16] SIEDECK u. DÜCKER: 15 Jahre Baugrunduntersuchungen im Hamburger Raum. Eigenverlag Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Grundbau, Hamburg 1949.
- [17] BENDEL: Ingenieurgeologie. Bd. I/II, 2. Aufl. Wien 1949: Springer-Verlag.
- [18] KLENGEL: Beobachtungen zur Stratigraphie des Pleistozäns an der Steilküste des Kl. Klützhöved. Die Bergakademie 6 (1954).
- [19] DÜCKER: Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und Errichtung eines Uferschutzwerkes. Die Küste 2 (1952).
- [20] RICHTER: Die Eiszeit in Norddeutschland. Berlin 1937: Verlag Borntraeger.
- [21] VON KLEBELSBERG: Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie I. Wien 1948: Springer-Verlag.
- [22] GRIPP: Die Entstehung der Lübecker Bucht und des Brodtener Ufers. Die Küste 2 (1952).
- [23] OTTO: Sedimentpetrographische Untersuchungen an der inneren Lübecker Bucht. Die Küste 2 (1952).
- [24] SEIFERT: Der Aufbau und die geologische Entwicklung des Brodtener Ufers und der angrenzenden Niederungen. Die Küste 2 (1952).
- [25] SPETHMANN: Studien an den Flanken des Brodtener Ufers. Die Küste 2 (1952).
- [26] VIETE: Kritische Bemerkungen zur Bestimmung der pleistozänen Inlandeismächtigkeit m. Hilfe v. Drucksetzungsmessungen. Eiszeitalter und Gegenwart 8 (1957).
- [27] DÜCKER: Ein Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Mächtigkeit des diluvialen Inlandeises. Mitt. geolog. Staatsinst. Hamburg 20 (1951) S. 3.

- [28] NEUMANN & JACOB: Drucksetzungsversuche mit Weichbraunkohlen. Zeitschr. f. Angew. Geologie 2 (Berlin 1956) S. 307.
- [29] MATSCHAK: Die geologische Vorbelastung von Deckgebirgs- und Liegendschichten in einigen Lausitzer und mitteldeutschen Braunkohlentagebauen. Die Bergakademie 10 (1959).
- [30] v. BÜLOW: Allgem. Küstendynamik und Küstenschutz. Beiheft Geologie 10 (1954).
- [31] KANNENBERG: Die Steilufer der Schleswig-Holsteinischen Ostseeküste. Schriften d. Geograph. Inst. d. Univers. Kiel Bd. XIV H. 1 (1951).
- [32] ZANDER: Die rezenten Änderungen der mecklenburgischen Küste. Mitt. d. Geogr. Ges. Rostock 1934 Beiheft 1.
- [33] KOLP: Sturmflutgefährdung der deutsch. Ostseeküste zwischen Trave und Swine. Seehydrograph. Dienst der DDR. Hydrometeorolog. Institut Stralsund 1955.
- [34] ROGGE & MIEHLKE: Verlauf und Auswirkung der Sturmflut v. 13. 1. 57 an der meckl. Küste. Zeitschr. f. Angew. Geologie H. 8/9 (1957).
- [35] v. BÜLOW: Trauf und Kliff. Wiss. Zeitschr. d. Univ. Rostock 3, H. 1.
- [36] ROGGE: Der Einfluß der Badegäste und der Jugend auf unsere Küste und seine Folgen. Meckl. Monatshefte 2 (1957).
- [37] OHDE: Die Berechnung der Standsicherheit von Böschungen und Staudämmen. Bautechnik-Archiv, H. 8 (1952), Berlin: Verl. W. Ernst u. Sohn.
- [38] FELLENIUS: Erdstatische Berechnungen. 4. Aufl., Berlin 1948. Berlin: Verlag W. Ernst u. Sohn.
- [39] PETERSEN: Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste. Die Küste 2 (1952).
- [40] GRIESSEIER & VOLLBRECHT: Über einige neuere Gesichtspunkte in der Küstenforschung. Forschungen und Fortschritte 29, H. 1 u. 2.
- [41] v. BÜLOW: Der Einsatz biologischer Hilfen im Küstenschutz. Wasserwirtschaft/Wassertechnik 2 (1958).
- [42] DIETRICH & WEIDEMANN: Strömungsverhältnisse in der Lübecker Bucht. Die Küste 2 (1952).
- [43] ZITSCHER: Möglichkeiten und Grenzen in der konstruktiven Anwendung von Asphaltbauweisen bei Küstenschutzwerken. Mitt. d. Hannoversch. Versuchsanst. für Grund- und Wasserb. Franziusinst. der TH Hannover.
- [44] KEIL: Baugrund u. Straße. Berlin 1950: Verlag Straßen- u. Tiefbau.
- [45] SCHAIBLE: Frost- und Tauschäden an Verkehrswegen und ihre Bekämpfung. Berlin 1957: Verl. W. Ernst u. Sohn.
- [46] KLENGEL: Frostschäden an Straßen, Auftreten, Ursachen, Bekämpfung. Straßentechnik 12 (1959) 1, 2 (1960).
- [47] CASAGRANDE: Bodenuntersuchungen im Dienste des neuzeitl. Straßenbaues. Der Straßenbau 25, Heft 3 (1934).
- [48] KEIL: Die Frostgefährlichkeit geschichteter Gesteine. Die Straße, 1. Juniheft 1937.
- [49] Richtlinien zur Verhütung von Frostschäden an Straßen. Verfüg. u. Mitt. d. Min. f. Verkehrswesen 5 (1959).
- [50] KEIL: Der Einfluß d. Wassers f. d. Frosthebung i. Untergrund. Die Bautechnik 6 (1956).
- [51] SCHEIDIG: Das Kriterium für die Frostgefährlichkeit von Erdstoffen im Straßenbau. Die Bautechnik (1934) S. 484.
- [52] NEFF: Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes. Die Bautechnik 11 (1959).
- [53] v. BÜLOW: Abriß der Geologie von Mecklenburg. Verlag Volk u. Wissen.
- [54] SIEDECK/VOSS: Beurteilung der Tragfähigkeit schwerbelasteter Straßen durch den Plattendruckversuch. Berlin 1956: Verl. W. Ernst u. Sohn.

- [55] KEIL in NEUMANN: Neuzeitlicher Straßenbau. Springer-Verl. 1959.
- [56] BRAND: Die Bodenstabilisierung mit Kalk. Straße u. Autobahn **10** (1958).
- [57] BUCHHOLZ: Bodenverfestigung im Straßenbau. Straßen- und Tiefbau **5** (1959).
- [58] KOPPE: Über die Bodenverfestigung. Straßen- und Tiefbau **8** (1958).
- [59] WINTERKORN: Bodenstabilisierung. Straßen- und Tiefbau **3** (1959).
- [60] FRITZSCHE/KLENGEL: Untersuchungen zur Stabilisierung von Verwitterungslehm mit Kalk von der F 242 km 17,0—17,5 im Rahmen des Versuchsstraßenbaues. Unveröff. Gutachten Institut f. Geotechnik.
- [61] FLOSS: Stabilisierung von Ton-Schluffmischungen mit Bunakalk. Unveröff. Diplomarbeit — Institut für Geotechnik, Hochsch. f. Verkehrswesen Dresden.
- [62] BRAND: Die Verbesserung der technologischen Eigenschaften von Schluffböden für den Erdbau. Straßen- und Tiefbau **5** (1959).

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

Reihe C Geowissenschaften

C 79 Lagerstättenkunde

Vorträge des XI. Berg- und Hüttenmännischen Tages,
21. bis 23. Mai 1959 in Freiberg

Format 17 × 24 cm — 227 Seiten — 68 Bilder — DM 20,—
Erschienen April 1960

BORCHERT: Geosynklinale Lagerstätten, was dazu gehört und was nicht dazu gehört, sowie deren Beziehungen zu Geotektonik und Magmatismus — SMIRNOW: Über die möglichen exhalativen und exhalativ-sedimentären Kiesvorkommen in der Sowjetunion — DIMITROV: Magmatismus und Erzbildung im Erzgebiet von Panagjuriste — HENTSCHEL: Zur Frage der Bildung des Eisenerzes vom Lahn-Dill-Typ — SZÁDECZKY/KARDOSS: Zur Verteilung der Elemente in den sedimentären und magmatischen Sulfiderzen — ALEKSIEV: Sedimentäre Manganerze des Oligozäns bei Varna-Bulgarien — ATANASOV: Eisenerzführender Jura in Bulgarien — MINČEVA-STEFANOVA: Zur Entstehung der Blei-Zink-Lagerstätte Sedmoislenicium Westbalkan — PANTÓ: Wege und Umwege der Erforschung eines erzführenden Vulkangebietes (Börzsöny Gebirge, Ungarn) — LEBEDEW: Über die Gesetzmäßigkeiten der Isomorphiebeziehungen in Mineralen magmatischer Genese — LEBEDEW: Die energetische Theorie A. E. Fersmans und ihre Entwicklung in einem Vierteljahrhundert — EKIERT: Neue Anschauungen über die Herkunft des in den Sedimenten des unteren Zechsteins auftretenden Kupfers — BAUMANN: Gangarchiv des Freiburger Lagerstättenbezirkes (Zentralteil).

C 80 Geologie

Vorträge des XI. Berg- und Hüttenmännischen Tages,
21. bis 23. Mai 1959 in Freiberg

Format 17 × 24 cm — 192 Seiten — 137 Bilder — 18 Tabellen — DM 17,—
Erschienen Februar 1960

SCHWARZBACH: Präquartäre Tillite in Europa und Nordamerika — VIETE: Über die Genese der glazigenen Deformationen der mitteldeutschen Braunkohlen und die Möglichkeit ihrer Vorhersage in neuen Grubenfeldern — WAGENBRETH: Neue quartärgeologische Beobachtungen im Tagebau Profen bei Zeitz — KÖSTER: Zur experimentellen Darstellung glazialer Stauchungszonen — LUDWIG: Stratigraphische Methodik an gestauchten Pleistozänprofilen — MILDE: Ergebnisse hydrogeologischer Untersuchungen im Raum künftiger Braunkohlentagebaue der Lausitz und der östlichen Mark Brandenburg — PFLUG: Versuch einer tektonischen Deutung der tertiären Sedimentationsräume NW-Deutschlands — KUHLE: Kristalltonsteine, die in Kohlenflözen als vulkanische Elemente zu betrachten sind, als leitführende Horizonte bei der Parallelstellung der Flöze im ober-schlesischen Kohlenbecken — TRÖGER: Die epirogenetische und orogenetische Entwicklung im Paläozoikum (Ordovicium — Unterkarbon) des Vogtlandes — RÖSLER/SCHMIDT: Die Lederschiefergerölle der Bohrung Beulwitz 4 bei Saalfeld (Thüringen) — JORDAN: Zur Taxonomie und Biostratigraphie devonischer Ostracoden Thüringens und des Harzes — SCHMIDT: Zum Problem variszischer Störungen der Elbtalzone.

A K A D E M I E - V E R L A G · B E R L I N

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

C 78

GEOLOGIE

GÜNTER VIETE

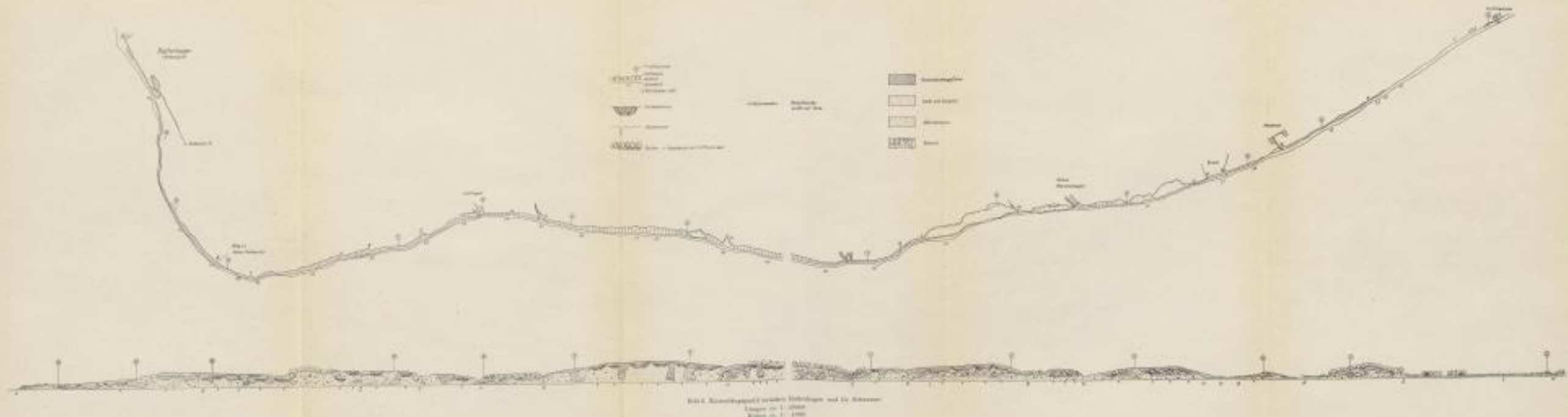
Zur Entstehung der glazigenen Lagerungsstörungen unter besonderer Berücksichtigung der Flözdeformationen im mitteldeutschen Raum

Format 17×24 cm — 257 Seiten — 9 Bilder — 30 Tafeln — 18 Beilagen
5 Tabellen — DM 23,—

Erschienen Mai 1960

Nach einem Überblick der Entwicklung unserer Kenntnisse über die in Nord- und Mittelddeutschland verbreiteten, durch den Belastungsdruck und die Bewegung der pleistozänen Inlandseismassen an ihren Rändern verursachten Lagerungsstörungen quartärer, tertiärer (Braunkohlen!) und z. T. auch kretazischer Sedimente werden die bisher beobachteten Störungsformen kurz beschrieben und erläutert und anschließend eingehend die verschiedenen bei der Genesis dieser Deformationen mitwirkenden Faktoren, wie Mächtigkeit und Schutführung des Eises; Art, Geschwindigkeit und Tiefenreichweite der Eisbewegung; Einfluß der bodenphysikalischen Eigenschaften unter besonderer Berücksichtigung der kaltzeitlichen Bodengefrorenis; Vorhandensein von oberflächlichen oder im Untergrund verborgenen Hindernissen für die Eisbewegung, behandelt. In den folgenden „Regionalen Betrachtungen“ werden die im Raum Gräfenhainichen-Schmiedeberg, Bitterfeld-Torgau-Belgern-Leipzig sowie im rißeiszeitlichen Gebiet zwischen der Elbe und Senftenberg vorkommenden glazigenen Schichtstörungen unter Hervorhebung der Flözdeformationen analysiert, und es wird versucht, sie genetisch zu deuten.

A K A D E M I E - V E R L A G . B E R L I N



SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG





SLUB

Wir führen Wissen.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
FREIBERG



2013222

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

C 82

GEOLOGIE

ALOIS SCHREIBER

Das Rotliegende des Flechtinger Höhenzuges

Format 17×24 cm — 132 Seiten — 72 Bilder — 2 Anlagen — DM 12,—

Erschienen Februar 1960

Auf Grund von feinstratigraphischen Aufnahmen wurde vom Verfasser ein detailliertes Profil der bisher noch wenig bearbeiteten Gesteine zwischen Kulm und Zechstein erarbeitet. Sie bestehen aus neun Serien, die z. T. noch in Folgen und Serien untergliedert werden. Auf die Eruptiv-Serie (älterer Porphyrit, Quarzporphyr und Tuffe, jüngerer Porphyrit) an der Basis folgen vorwiegend feinklastische Ablagerungen, die Bebertaler Schichten. Die mächtigen Konglomerate und Sandsteine sind den Hornburger Schichten im östlichen Harzvorland sehr ähnlich und werden unter demselben Namen zusammengefaßt. Die obersten Sedimente haben große Ähnlichkeiten mit den Eislebener Schichten und werden deshalb ebenso benannt. Im mittleren Flechtinger Höhenzug wurden mächtige Gesteine abgelagert, dagegen waren die Gegenden von Oebisfelde und Dessau Schwellengebiete.

A K A D E M I E - V E R L A G · B E R L I N