

DIE BAUTECHNIK

19. Jahrgang

BERLIN, 2. Mai 1941

Heft 19

Alle Rechte vorbehalten.

Die Quellfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung.

Von Professor Dr. Kurd Endell, Berlin.

(Mitteilung aus dem Laboratorium für bauwissenschaftliche Technologie der Technischen Hochschule Berlin.)

Die Quellfähigkeit sogenannter bindiger, d. h. Ton enthaltender Böden spielt bei allen Fragen der Baugrundforschung eine erhebliche Rolle. Rutschungen und Setzungen, Bodenhebungen durch Frost und Auftauen, Abdichtungen unter Verwendung quellfähiger Tone, sie alle beruhen auf bestimmten Eigenschaften des Wasserbindevermögens von Tonen im Boden. Die früheren Begriffsbestimmungen für Tone waren nicht nur im Bauwesen gänzlich unzureichend, sondern auch auf anderen Gebieten angewandten Wissens, wie z. B. in der landwirtschaftlichen Chemie, in der Keramik und anderen Fachgebieten. Dies hängt damit zusammen, daß die Tontellchen im allgemeinen unterhalb der Grenzen liegen, die im Lichtmikroskop sichtbar gemacht werden können, also im kolloiden Gebiet, etwa unter 1μ .

Die Grenzfläche weniger Hundertteile der kolloidalen Bestandteile eines Bodens, ja schon weniger Bruchteile von Hundertteilen, ist danach um ein Vielfaches größer als die Grenzfläche des ganzen Restes. Die Einschätzung des Kolloidanteils des Bodens als wesentlichen Träger alles Bodengeschehens und seiner wichtigsten Eigenschaften ist durchaus berechtigt, weil ja nur an Grenzflächen, ohne weitere Zertrümmerung der Masse, Umsetzungen oder zusätzliche Wasserbindungen sich abspielen können.

Erst die bewußte Anwendung der in der Kolloidchemie gewonnenen Erkenntnisse, der Röntgentechnik und zuletzt der elektronenmikroskopischen Untersuchungsverfahren haben eine gewisse Klarheit in die Chemie der Tone und damit auch in ihre für die Bautechnik wichtigste Eigenschaft, die vom Gefüge abhängige Quellfähigkeit gebracht. Bevor daher auf die Zusammenhänge zwischen Quellfähigkeit der Tonminerale und bodenphysikalischen Eigenschaften bindiger Böden sowie ihre bautechnische Bedeutung näher eingegangen werden kann, erscheint es notwendig, den heutigen Stand der Erkenntnis über die Natur der Tone kurz zusammenzufassen.

1. Stand der Erkenntnisse über die Quellfähigkeit von Tonen, ihre innere Ursache und Bestimmung.

a) Die Natur der Tone.

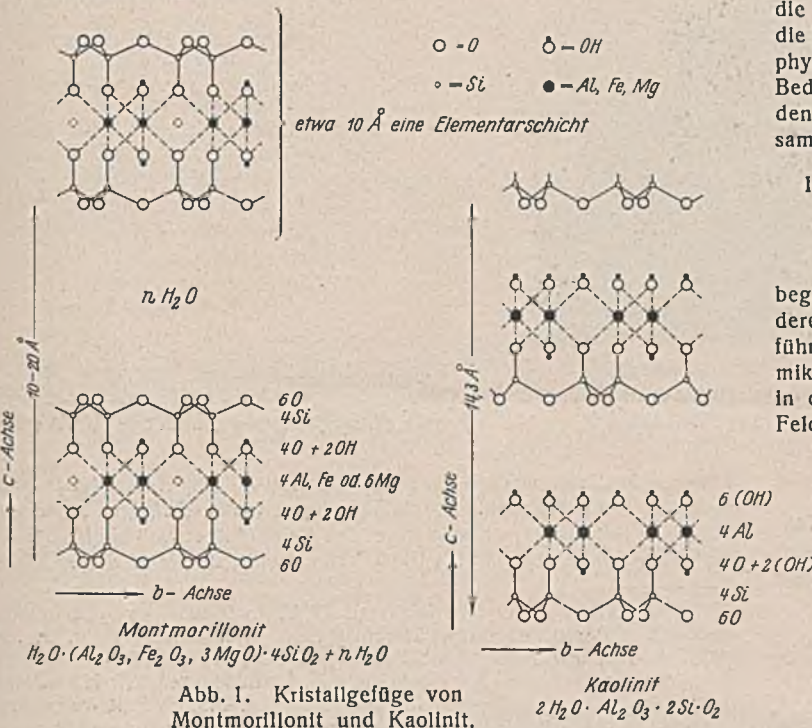
Die bodenkundliche Forschung hat sich lange Zeit hindurch damit begnügt, den durch Schlämmen zu gewinnenden Anteil feinsten Teilchen, deren Größe feiner als 2μ ist, als Ton zu bezeichnen. Als durch Einführen der Röntgenprüfung die Korngröße kleiner als 2μ , die das Lichtmikroskop nicht mehr auflöst, näher untersucht werden konnte, wurden in diesen feinen Teilen völlig unbindige Bodenminerale, wie Quarz, Feldspat und Kalkspat, die kleiner als 2μ waren, nachgewiesen. Besonders in kalten Gegenden, deren mittlere Jahrestemperatur etwa bei $+5^\circ \text{C}$ liegt, findet die Zersetzung granitischer Gesteine derart statt, daß neben einem geringen Anteil echten Tonminerals auch unbindige Minerale wie Quarz und Feldspat in erheblichen Mengen in dem Anteil kleiner als 2μ vorkommen. Röntgenbilduntersuchungen von steifen Lehmen, besonders aus Schweden und Kanada, haben dies gezeigt.

Chemisch sind Tonminerale wasserhaltige Aluminiumsilikate, die in Blättchenform ausgebildet sind und in Schichten gittern kristallisieren.

Mit Hilfe von Röntgen-Feingefügeuntersuchungen hat man in Tonböden aller Länder folgende Tonminerale bestimmt²⁾:

Mineral	Kristallgitter	Chemische Formel
Kaolinit	starr	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Montmorillonit (das Mineral der Bentonite)	ziehharmonikaartig ausweitbar	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} +$ $n \text{H}_2\text{O}$ oder $[\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot \text{Al}_4$ $\cdot (\text{OH})_4] + n \text{H}_2\text{O}$
Glimmerartige Tonminerale	starr	etwa $[\text{Si}_7\text{AlO}_{20} \cdot \text{Al}_4 \cdot (\text{OH})_4] \text{K}$

Die aus Feingefügeuntersuchungen sich ergebenden Gitter des Montmorillonits und Kaolinit zeigt Abb. 1. Beide Gitter werden aufgebaut



Wie außerordentlich die Grenzfläche (die Summe der Oberflächen) mit dem Grade der Zerkleinerung des Stoffes sich vermehrt, zeigt die nachstehende Zahlentafel 1¹⁾.

Zahlentafel 1. Gränzflächenwachstum eines Würfels bei zunehmender Zertellung.

Seitenlänge	Anzahl der Würfel	Gesamt-oberfläche		
1 cm	1	6 cm ²		
1 mm	10 ³	60 "		
Grenze zwischen Fein- und Mehlsand 0,1 "	10 ⁶	600 "		
0,01 "	10 ⁹	6 000 "		
Bereich der Kolloide	sichtbares Licht	1 μ	10 ¹²	6 m ²
		0,1 μ	10 ¹⁵	60 "
		0,01 μ	10 ¹⁸	600 "
		1 m μ	10 ²¹	6 000 "
1 Ångström 1 Å = 0,1 m μ	Röntgen- oder Elektronenstrahlen	10 ²⁴	60 000 "	

¹⁾ Wo. Ostwald, Die Welt der vernachlässigten Dimensionen, 4. Aufl., S. 98. Dresden 1920, Steinkopf. — Vgl. auch P. Vageler, Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens, S. 18, Anm. 4. Berlin 1932, Springer.

²⁾ S. B. Hendricks und W. F. Fry, The results of X-ray and microscopical examinations of soil colloids. Soil Science 30 (1930), S. 447. — W. P. Kelley, W. H. Dore und S. M. Brown, The nature of the base exchange material of Bentonite, soils and zeolites, as revealed by chemical investigations and X-ray analysis. Soil Science 31 (1931), S. 25. — K. Endell, U. Hofmann und D. Wilm, Über die Natur der keramischen Tone. Ber. dtsh. keram. Ges. 14 (1933), S. 407. — Dieselben, Über die eindimensionale Quellung des Montmorillonits. Z. Kristallogr. 86 (1933), S. 340. — Dieselben, Röntgenographische und kolloidchemische Untersuchungen über Tone. Z. angew. Chem. 47 (1934), S. 539. — E. Maegdefrau und U. Hofmann, Glimmerartige Minerale als Tonsubstanzen. Z. Kristallogr. A 98 (1937), S. 31. — Ferner zusammenfassende Arbeiten aus neuerer Zeit, W. Noll, Fortschritte in der Erkenntnis der Tonminerale. Ber. dtsh. keram. Ges. 19 (1938), S. 176. — C. W. Correns, Die Tone. Geol. Rundschau 1938, S. 201.

von Schichtpaketen aus je einer Aluminiumhydroxidschichtebene, die beim Kaolinit nur nach unten, beim Montmorillonit nach oben und unten über O-Atome mit einer Silizium-Sauerstoff-Schicht verbunden ist.

Der Aufbau des Montmorillonits entspricht der idealen Zusammensetzung $[Si_3O_{20} \cdot Al_4 \cdot (OH)_4] + n H_2O$, der z. B. der Bentonit von Geisenheim nahekommt. Doch zeigen viele Bentonite mehr oder weniger beträchtliche Unterschiede; z. B. können statt Al-Ionen Mg- oder Fe-Ionen in das Gitter eingebaut sein.

Zwischen die Schichtebenenpakete des Montmorillonits vermag unter Aufweitung des Gitters Wasser einzudringen. Bei auf 100° erhitztem Montmorillonit mißt der Schichtebenenabstand $\sim 10 \text{ \AA}$, bei feuchtem unter Umständen 30 \AA).

Das Gitter des Montmorillonits ist also gewissermaßen ziehharmonikaartig aufweitbar. Ein Teil der Quellfähigkeit ist durch das ins Innere eindringende Wasser bedingt. Wie später gezeigt wird, kann bereits heute gelegentlich eine Aufweitung bis in einzelne Elementarschichten der Kristalle durch elektronenmikroskopische Aufnahme unmittelbar sichtbar gemacht werden. Demgegenüber ist das Gitter des Kaolinitis starr. Der feste Abstand zwischen zwei Schichtebenen beträgt hier nur $2,8 \text{ \AA}$.

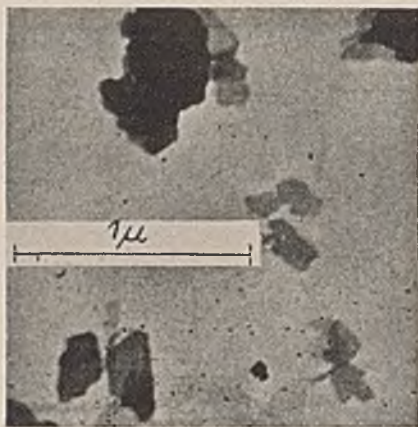


Abb. 2. Spargauer Feinkaoлин, auf Folie eingetrocknet. Die runden schwarzen Punkte sind kolloides Silber, sie geben die Möglichkeit, das Bild scharf einzustellen. Vergrößerung 1:30 000.



Abb. 3. Deutscher Ca-Bentonit, eingetrocknetes Ultrazentrifugat. Vergrößerung 1:37 000.

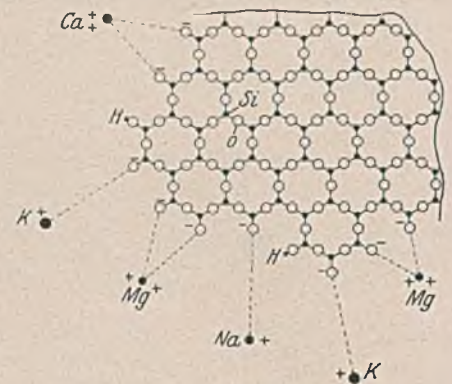


Abb. 5. Aufsicht auf die Ecke einer Si-O-Schichtebene des Kaolinitkristalls mit durch freie Wertigkeiten gebundenen Kationen.

Von untergeordneter Bedeutung für den Baugrund sind das Tonmineral Halloysit sowie Hydrate, wie Hydrargillit und Eisenhydroxyde; nicht bestimmbar mit Röntgenstrahlen sind die wohl meist amorphen Humuskolloide.

³⁾ $1 \text{ \AA} = 1 \text{ \AA}ngstr\ddot{o}m = 10^{-8} \text{ cm} = 0,1 \text{ m}\mu$. $1 \text{ m}\mu = 0,000\,001 \text{ mm}$.



Abb. 4. Freil in den Strahlengang hineinragendes Randstück von amerikanischem Na-Bentonit mit feinsten, an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegenden, zum Teil etwa $1 \text{ m}\mu$ dicken Blättchen. An der mit A gekennzeichneten Stelle wird zum ersten Male ein einzelnes Elementarschichtpaket sichtbar. Vergrößerung 1:60 000.

Unmittelbare Aufnahmen feinsten Tonteilchen, d. h. von Ultrazentrifugaten, im Elektronenmikroskop⁴⁾ haben den Unterschied in der Dicke zwischen den Kaolinit- und Montmorillonitkristallen erkennen lassen. Kaolinite sind meist sehr kennzeichnend als Plättchen ausgebildet. Sie sind bisher nur bis zu einer Mindestdicke von $20 \text{ m}\mu$ und einer etwa 5- bis 25mal so großen Längen- oder Breitenausdehnung bekanntgeworden, dagegen sind die Montmorillonitkristalle so fein, daß die Aufweitung bis zu einer Elementarschicht des Kristalls, d. h. $1 \text{ m}\mu = 10 \text{ \AA}$ gehen kann. Das Verhältnis von Dicke zur größten Längenausdehnung der Plättchen beträgt bei ihnen etwa 1:100 bis 1:300. Die natürlichen, mit Natrium gesättigten amerikanischen Bentonite zeichnen sich durch Blättchenform aus, während die deutschen Bentonite ein viel feineres aufgerauhtes Gefüge aufweisen. Drei Aufnahmen im Universal-Elektronenmikroskop von Ardenne (Abb. 2, 3 u. 4) (1:30 000, 1:37 000 und 1:60 000) mögen dies erläutern.

Wie kolloidchemische Untersuchungen gezeigt haben, sind alle Tonteilchen dadurch gekennzeichnet, daß sie entsprechend ihrer Feinheit eine sehr große freie Oberfläche haben. An dieser sind sehr kleine Mengen austauschfähiger Kationen, z. B. Kalzium, Natrium, Kalium, Magnesium, durch die Oberflächenkräfte (adsorptiv) gebunden, wie es in Abb. 5 in der Ecke der Si-O-Schichtebene eines Kaolinitkristalls dargestellt ist. Diese Kationen, die mengenmäßig chemisch oder elektro-

chemisch bestimmt werden können, werden in Milliäquivalent für je 100 g trockenen Ton angegeben. Die Summe dieser austauschfähigen Ionen wird als S-Wert bezeichnet; er beträgt bei den Kaoliniten etwa 3 bis 15, bei den Bentoniten meist etwa 80 bis 100⁵⁾. Die chemische Natur dieser an der

⁴⁾ W. Eitel, H. O. Müller und O. E. Radczewsky, Übermikroskopische Untersuchungen an Tonmineralien. Ber. dtsh. keram. Ges. 20 (1939), S. 166, und Naturwiss. 28 (1940), S. 303, 367 u. 397. — M. v. Ardenne, K. Endell und U. Hofmann, Untersuchungen feinsten Fraktionen von Bentoniten und Tonböden mit dem Universal-Elektronenmikroskop. Ber. dtsh. keram. Ges. 21 (1940), S. 209/27. — Jo. Endell, Über die Bedeutung des Elektronenmikroskops für den Feinstbau von Tonen. Keramische Rundschau 1941, S. 23 bis 26 und TZ 1941, S. 69 bis 72.

⁵⁾ P. Vageler, Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens. Berlin 1932, Springer. — K. Endell, H. Fendius und U. Hofmann, Basenaustauschfähigkeit von Tonen und Formgebungsprobleme in der Keramik (Gießen, Drehen, Pressen). Ber. dtsh. keram. Ges. 15 (1934), S. 595. — F. Alten und B. Kurmies, Die physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten beim Kationenaustausch in Mineralböden. — A. Jakob, U. Hofmann, Loofmann und E. Maegdefrau, Chemische und röntgenographische Untersuchungen über die mineralische Sorptionssubstanz im Boden. Z. angew. Chem. 48 (1935), S. 504, und Beihfte Nr. 21 (1935). — E. Blanck, Handbuch der Bodenlehre. 1. Ergbd., Abschn. 2: Chemische Beschaffenheit des Bodens (Chemische und chemisch-physikalische Vorgänge im Boden) von K. Scheffer und P. Schachtschabel, S. 275 bis 358. Berlin 1939, Springer.

Oberfläche sitzenden austauschfähig gebundenen Ionen, die ein sehr verschiedenes Wasserbindungsvermögen haben, bedingt die Quellfähigkeit der Tone. Ein zusätzlicher Betrag der Quellung tritt noch bei den Montmorillonittonen (Bentoniten) auf, weil ein Teil des Wassers in die ziehharmonikaartig ausweitbaren Urschichten des Kristalls eintreten kann.

Je nach der Natur der austauschfähig gebundenen Kationen zeigen tonhaltige Böden einen ganz verschiedenen Aufbau. Die Krümelung oder die feine Aufteilung der Tonteilchen hängt von der Art der gebundenen Kationen ab. Zwei Grenzfälle zeigen Abb. 6 u. 7.



Abb. 6. Krümelgefüge von Tonböden, eine Wirkung von Al-, Fe-, Ca-Ionen auf Ton.
Abb. 7. Einzelkorngefüge von Na-Ton.
Abb. 6 u. 7 nach P allmann.

Tonteilchen, die mit zweiwertigen Kationen (in erster Linie Kalzium oder mit dreiwertigen Kationen (besonders Aluminium oder Eisen) abgesättigt sind, sind gut gekrümelt, d. h. mehrere Einzelkörner sind zusammengelagert (Abb. 6). Dadurch wird der Umlauf des Wassers und der Luft im Boden gefördert. Man kann auch bewußt durch Austausch des Kalziums gegen Aluminium diese Zusammenballung noch fördern, da Aluminium noch stärker ausfüllend wirkt als Kalzium. Es gelingt jedoch nicht, die Lösung praktisch an die Tonteilchen heranzubringen. Dazu müssen elektrochemische Verfahren, über die später berichtet wird, herangezogen werden.

Sind dagegen die Tonteilchen mit einwertigen Kationen, besonders Na gesättigt, so haben die bindigen Tonböden Einzelkorngefüge (Abb. 7). Darin kann sich das Wasser nur sehr schlecht bewegen. Wird der hochquellfähige Bentonit mit Na abgesättigt, so dient er als Dichtungsmittel, worüber später im praktischen Teil dieser Arbeit berichtet werden wird.

b) Unmittelbare Bestimmung der Quellfähigkeit im Enslin-Gerät.

Entscheidend für die Quellfähigkeit der Tone und beispielsweise bei künstlichen Giebereisanden mit Ton als Bindemittel für ihr durch die Quellfähigkeit bedingtes Einbindevermögen und somit für ihre Grün- und Trockenfestigkeit ist ihr Wasserhaushalt, d. h. ihr Wasseraufnahmevermögen, ihre Ansaugeschwindigkeit und die Dicke und Druckverhältnisse der verdichteten Wasserhüllen um die Tonteilchen. Die Dicke der die Tonteilchen umlagernden hygroscopischen Wasserhüllen ist keineswegs allein durch die Korngröße bestimmt, sondern, wie bereits gesagt wurde, durch die chemischen Kräfte der gebundenen Ionen.

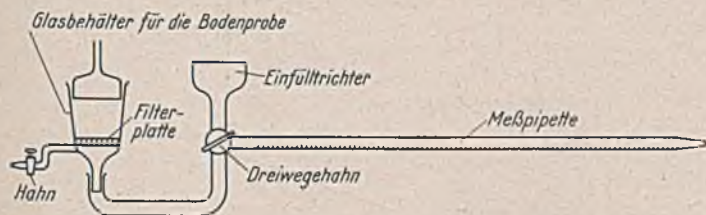


Abb. 8. Vorrichtung zum Messen der Flüssigkeitsaufnahme quellbarer Stoffe (Enslin-Gerät).

Ein einfacher Versuch im Enslin-Gerät (Abb. 8) zeigt, daß die Geschwindigkeit und Sättigung der Wasseraufnahme bei Tonen gleichen Kornaufbaues sehr verschieden sein kann. Bei diesem Gerät saugt die Tonprobe im Trichter Wasser von der Meßpipette über das U-förmige Rohr und das Glasfilter kapillar an. Menge und Geschwindigkeit der Wasseraufnahme werden an den Teilstrichen der Pipette abgelesen. Zur praktischen Handhabung des Enslin-Versuchs sei darauf hingewiesen, daß bei dem hochquellfähigen Na-Bentonit-Ton nur 50 mg, beim Ca-Bentonit- oder Kaolinit-Ton 0,3 g auf die Filterplatte möglichst gleichmäßig aufgebracht werden müssen. Spätestens nach 2 Stunden ist der Wasserwert abzulesen. Weitere Angaben über die Handhabung des Geräts und der durch Probeaufgabe und Feuchtigkeit der Probe im

Anlieferungszustand entstehenden Fehlerquellen sind an anderer Stelle eingehend behandelt⁹⁾.

Die von verschiedenen Tonmineralen aufgenommenen Wassermengen sind nach den Messungen mit dem Enslin-Gerät in Zahlentafel 2 zusammengestellt, vgl. auch Abb. 9.

Zahlentafel 2.

Im Enslin-Gerät gemessene aufgenommene Wassermengen und Teilchengrößen kristallisierter Bodenminerale.

Kristallisiertes Bodenmineral	Aufgenommene Wassermenge W_{∞} bezogen auf Trockengewicht %	Teilchengröße in μ
Na-Bentonit	600—700	100% < 2
Mineralgemenge { 1:1	260	etwa 90% < 2
Quarz/Na-Bentonit { 7:3	160	85% < 2
{ 9:1	75	80% < 2
Ca-Bentonit	200—300	100% < 2
Kaolin	90	70% < 2
Quarzmehl	29	2—10
Spergauer Silbersand	27	überwiegend 100—300

Das meiste Wasser nimmt Na-Bentonit auf. Quarzzusatz drückt das Wasseraufnahmevermögen herab. Entscheidend ist aber der Unterschied innerhalb der einzelnen Tonminerale.

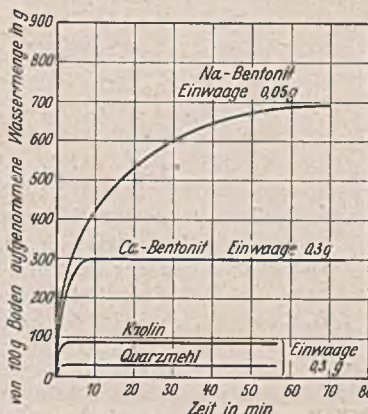


Abb. 9. Wasseraufnahme im Enslin-Gerät von Na- und Ca-Bentonit, Kaolin und Quarzmehl.

Die erheblichen Unterschiede dieser Wasseraufnahme im Endzustand innerhalb der einzelnen Tonminerale, der nicht bindigen Mineralien, des im Boden vorkommenden Humus sowie der Zemente zeigt Abb. 10.

Abb. 11 u. 12 zeigen, daß Quarzzusatz das Wasseraufnahmevermögen eines Tonminerals, sei es im Enslin-Gerät oder als Wassergehalt bei der Fließgrenze ermittelt, wesentlich herabdrückt, und zwar bei grobem Sand in stärkerem Maße als bei Quarzmehl. Aber auch hier ist der Unterschied innerhalb der einzelnen Tonminerale entscheidend.

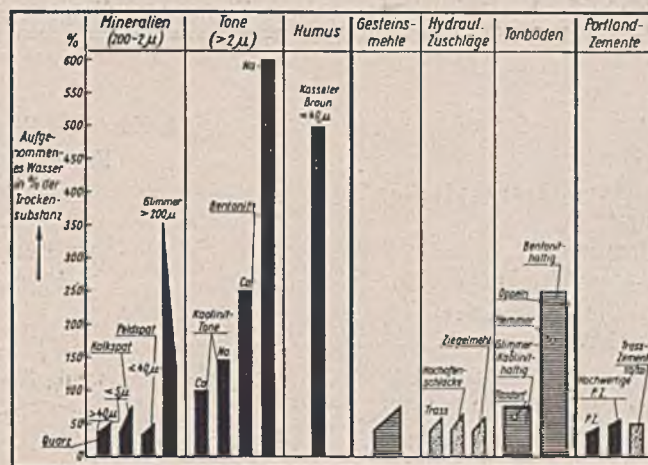


Abb. 10. Wasseraufnahme von Gesteinsmehlen, Tonen und Zementen.

Aus Abb. 13 erkennt man, daß Kaolin unter den Tonmineralen das geringste Wasseraufnahmevermögen, jedoch die größte Ansaugeschwindigkeit hat.

Der Einfluß der Korngröße tritt bei Vorhandensein eines Tonminerals immer mehr zurück. Dementsprechend nimmt die Zeit (Abb. 13) bis zum Erreichen des Endzustandes der angesaugten Wassermengen mit wachsendem Gehalt an Quarz ab, wobei die Abnahme durch grobe Korn-

⁹⁾ K. Endell, W. Loos, H. Meischeider, V. Berg, Über Zusammenhänge zwischen Wasserhaushalt der Tonminerale und bodenphysikalischen Eigenschaften bindiger Böden. Veröffentlichungen des Instituts der Deutschen Forschungsgesellschaft f. Bodenmechanik (Degebo) an der Techn. Hochschule Berlin, Heft 5. Berlin 1938, Springer. (Doktorarbeit H. Meischeider.)

größen infolge der größeren Poren und der damit verbundenen größeren Durchlässigkeit des Gemisches beschleunigt wird. Demzufolge ist der Wasserhaushalt der bindigen Böden, d. h. das Wasseraufnahmevermögen, die Dicke der Wasserhüllen, die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme und endlich die Druckverhältnisse in diesen Wasserhüllen nicht nur von der Größe der feinsten Teilchen, son-

Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, daß die im Enslin-Gerät im Endzustand aufgenommene Wassermenge von 0,3 bei Quarz bis zum 7fachen Wert des Rauminhalts der festen Masse bei Na-Bentonit ansteigt. Damit erklären sich auch die Beziehungen, wie sie in Abb. 11 dargestellt sind, nach der der Na-Bentonit gegenüber den anderen Tonmineralen infolge seiner stärkeren Wasserbindfähigkeit bei den gleichen Anteilen von Quarzbeimengungen die größten

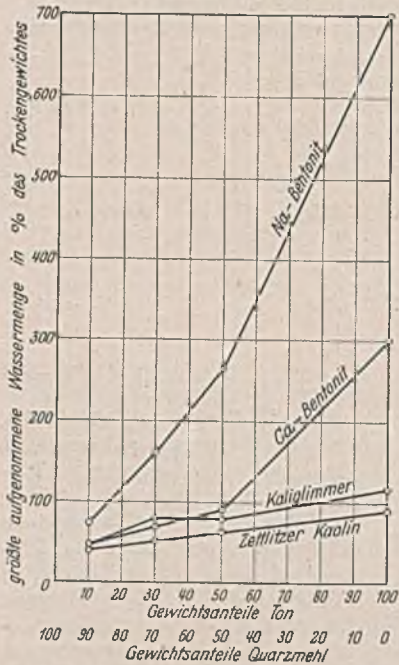


Abb. 11. Abhängigkeit der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge.

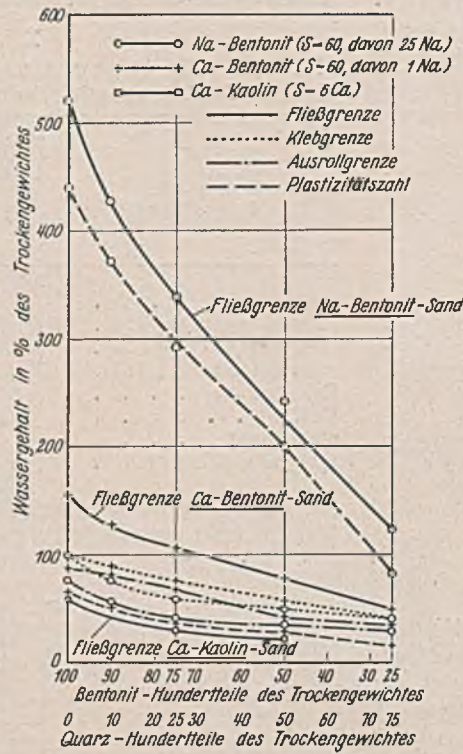


Abb. 12. Fließgrenzen, Klebgrenzen, Ausrollgrenzen und Plastizitätszahlen nach Atterberg von Mischungen aus Bentonit und feinstem Sand (< 5 μ), ermittelt im Gerät nach A. Casagrande. (S ist die Summe der austauschfähigen Ionen.)

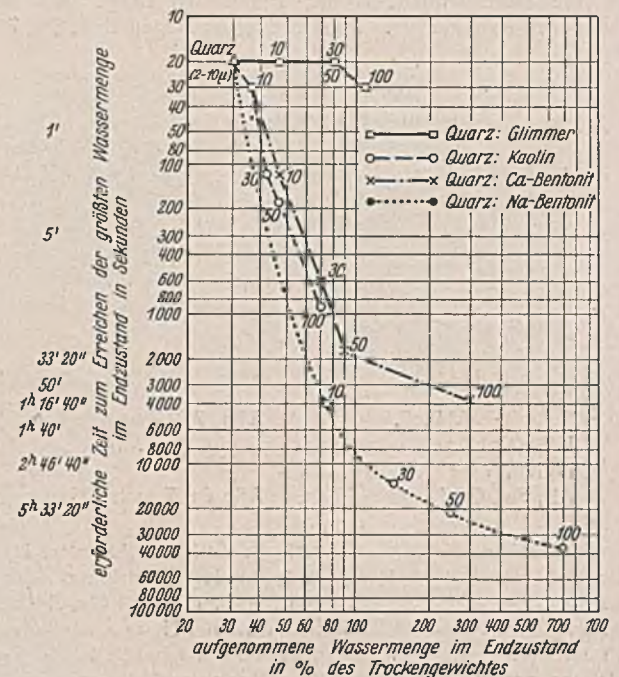


Abb. 13. Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens und der Ansaugeschwindigkeit von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge.

dern vielmehr von dem Verhältnis des Quarzanteils zu den Tonmineralen bestimmt.

Einen Überblick über diese Verhältnisse gibt Abb. 14, in der die gegenseitigen Größenverhältnisse der Tone und Quarzbeimengungen von etwa 1 μ (die Korngröße des feinen Quarzes dürfte durchschnittlich höher liegen) sowie die Dicke der sie umgebenden Wasserhüllen dargestellt ist.

im Endzustand aufgenommene Wassermenge ergibt. Infolge seiner stark quellenden Wirkung genügen somit nur geringe Beimengungen von Na-Bentonit, um die Durchlässigkeit des Gemisches auf ein außerordentlich geringes Maß herabzudrücken.

Die wichtigsten Eigenschaften der Tonminerale sind in Zahlentafel 3 nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Zahlentafel 3. Einteilung der reinen Tone nach Kristallgitter, Teilchenform, chemischen Eigenschaften und Quellfähigkeit.

Gruppe	Tone			
	I. Kaoline (Kaolinitone)		II. Bentonite	
Kristallgitter	Kaolinit, starr		Montmorillonit zlehharmonikaartig ausweitbar	
Elektronenmikroskopischer Befund	Dicke $\approx 20 \text{ m } \mu$ Länge oder Breite $> 100 \text{ m } \mu$		Dicke $\approx 1 \text{ m } \mu$ $> 100 \text{ m } \mu$	
Chemische Natur der Außenhaut	wenig 3—15		sehr viel 80—100	
a) Menge der austauschfähigen gebundenen Kationen in Milliäquivalent/100 g Ton	Ca (natürlich vorkommend) (Kaoline)	wenig Na (künstlich hergestellt)	Ca (Ca-Bentonit) (natürlich vorkommend)	$\frac{1}{2}$ bis $\frac{2}{3}$ Na, Rest Ca. (Na-Bentonit) natürlich vorkommend und durch Basenaustausch künstlich herstellbar
b) Art				
Quellfähigkeit				
Im Enslin-Gerät im Endzustand bestimmte Wasseraufnahme in g Wasser je 100 g bei 110° getrockneten Tons	60—100	etwa 150	200—300	600—700
Bildung eines thixotropen Gels mit Wasser im Verhältnis Ton zu Wasser	etwa 1:1	etwa 1:2	etwa 1:3	etwa 1:10 bis 1:20

Außerdem wurden in keramischen Tönen, Zementmergeln und Tonböden von vier Kontinenten durch Röntgenbilder noch ein oder mehrere, früher unbekannte glimmerartige Tonminerale häufig gefunden, die in ihren Eigenschaften etwa zwischen dem Kaolinit und Montmorillonit stehen. Die Verbreitung dieser glimmerartigen Tonminerale ist sehr groß. [E. Maegdefrau und U. Hofmann, Z. Kristallogr. A 98/31 (1937)].

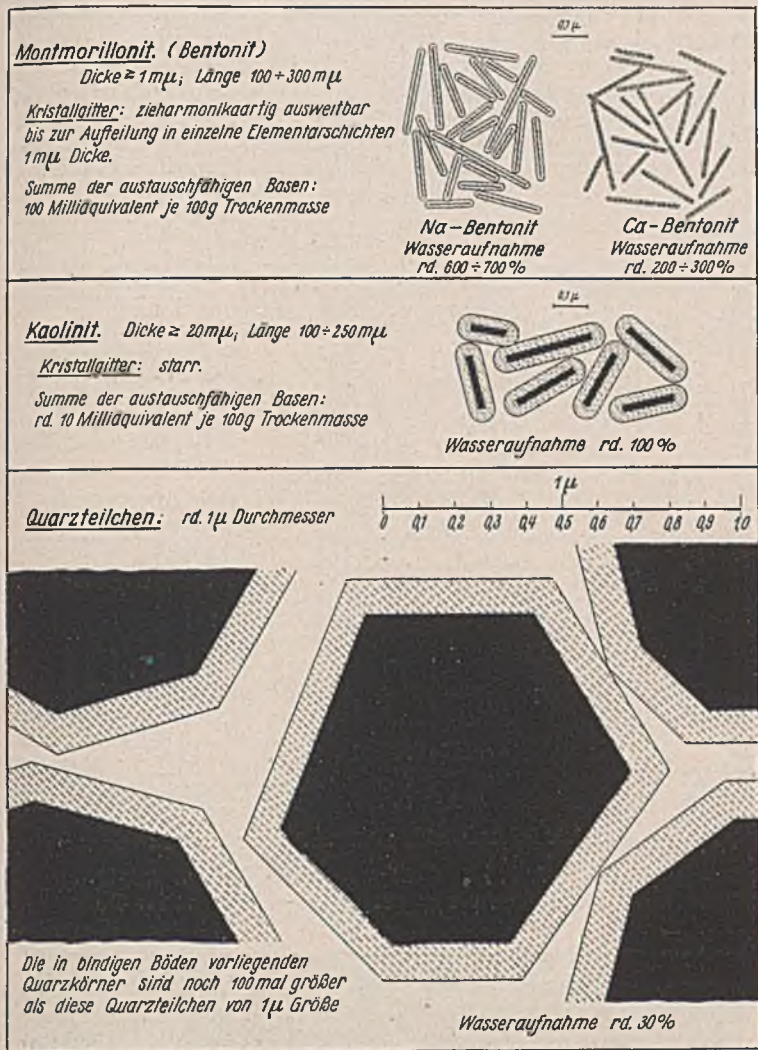


Abb. 14. Darstellung der Teilchenform und der gebundenen Wassermengen von Montmorillonit, Kaolinit und Quarz.

II. Zusammenhänge zwischen Quellfähigkeit der Tonmineralien und bodenphysikalischen Eigenschaften.

Bereits bei dem ersten Versuch, der in Gemeinschaft mit der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau in Berlin von dem Verfasser und seinen Mitarbeitern U. Hofmann und D. Wilm⁷⁾ ausgeführt wurde, ergaben sich deutlich Zusammenhänge zwischen der Quellfähigkeit bindiger Böden und den bodenphysikalischen Eigenschaften. Aber erst planmäßige Arbeiten des Verfassers an Modellstoffen, d. h. an Ton-Quarz-Gemischen, gemeinsam mit der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik⁸⁾ haben weitere Erkenntnisse in dieser Richtung gebracht, über deren Ergebnisse nachstehend berichtet werden soll.

Die Abhängigkeit des Quellvermögens von der Natur des Tonminerals und seiner Mischungen mit feinem Quarz ist in den bodenphysikalischen Kennziffern zu erkennen, wie im Reibungsbeiwert $tg \varphi$, der Durchlässigkeit k_0 und der Verdichtungsziffer a . Die Abb. 15, 16 und 17 zeigen eine eindeutige Gesetzmäßigkeit innerhalb der einzelnen Mischungsverhältnisse.

Die Durchlässigkeit nimmt einmal mit steigendem Gehalt an nicht quellfähigen Bestandteilen zu. Dies erklärt sich durch Auflockerung und Vergrößerung des Porenraumes, die durch eine Zunahme des Quarzgehalts erreicht werden. Zum anderen nimmt die Durchlässigkeit ab vom Glimmer beginnend über Kaolin zum Na-Bentonit bei gleichem Mischungsverhältnis mit Quarz. Diese Erscheinung ist durch das verschiedene Quellvermögen der einzelnen Tonminerale zu erklären, wodurch

⁷⁾ R. Selfert, J. Ehrenberg, B. Tiedemann, K. Endell, U. Hofmann, D. Wilm, Bestehen Zusammenhänge zwischen Rutschneigung und Chemie von Tonböden? Mittlg. Preuß. Versuchsanst. Wasserbau u. Schiffbau. Berlin 1935, Heft 20.

⁸⁾ K. Endell, W. Loos, H. Breth, Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Bd. 16. Berlin 1936, Volk u. Reich Verlag. (Doktorarbeit H. Breth.)— Vgl. die ausgezeichnete, die Ergebnisse besonders der landwirtschaftlichen Chemie zusammenfassende Arbeit von J. Alten und B. Kurmies, Physikalische Beschaffenheit des Wassers. Das statische und dynamische Verhalten des Wassers in Böden. In E. Blanck, Handbuch der Bodenlehre, 1. Ergbd., 2. Abschn., S. 151 bis 239. Berlin 1939, Springer.

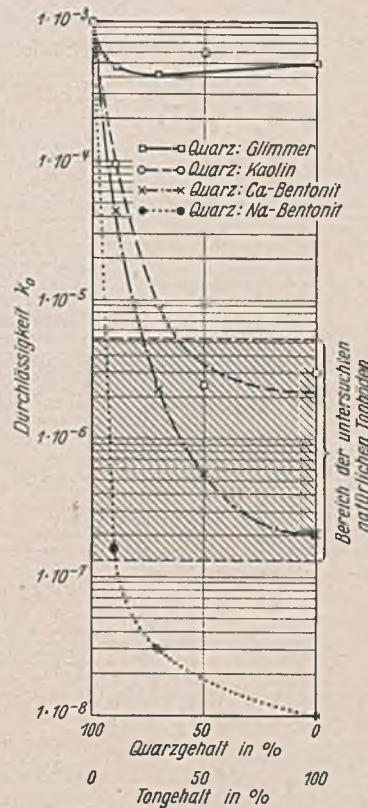


Abb. 15. Abhängigkeit der Durchlässigkeit k_0 (gemessen bei $1,5 \text{ kg/cm}^2$ Auflast) vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

Die Menge des im Enslin-Gerät angesaugten Wassers entspricht einem Sonderfall, bei dem wenig Wasser auf viel Ton einwirkt. Anders verhalten sich die Tone, wenn Wasser im Überschuß vorhanden ist. Der Grad des Zerfalls hängt auch in diesem Fall weitgehend von dem Kristallgitter des Tonminerals und der Art und Menge der austauschfähigen Basen ab. Einige Hinweise sind seinerzeit von dem Verfasser gebracht worden (Abb. 20⁹⁾).

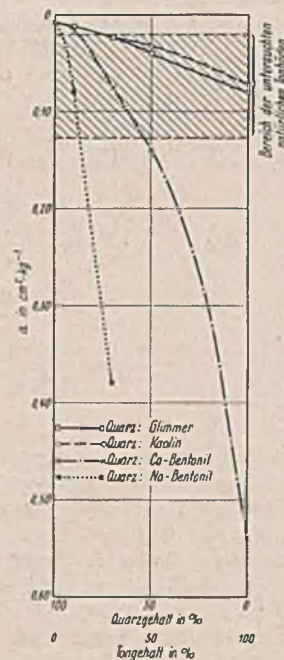


Abb. 16. Abhängigkeit der Verdichtungsziffer a (gemessen bei einer Laststeigerung von $1,5$ auf $2,0 \text{ kg/cm}^2$) vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

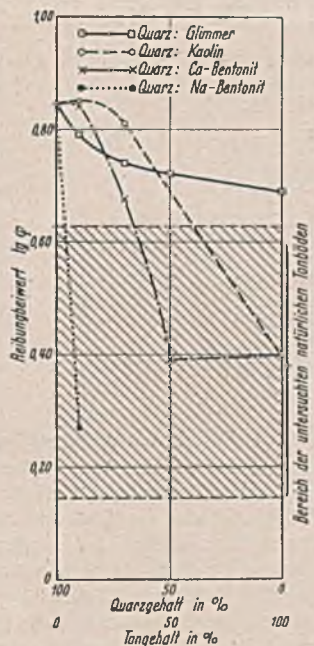


Abb. 17. Abhängigkeit des Reibungswertes $tg \varphi$ vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

Die Art und Geschwindigkeit der Quellung ist eingehend von H. Breth⁹⁾ in einem Aerometer verfolgt worden. Wegen weiterer Einzelheiten muß auf diese Arbeit verwiesen werden.

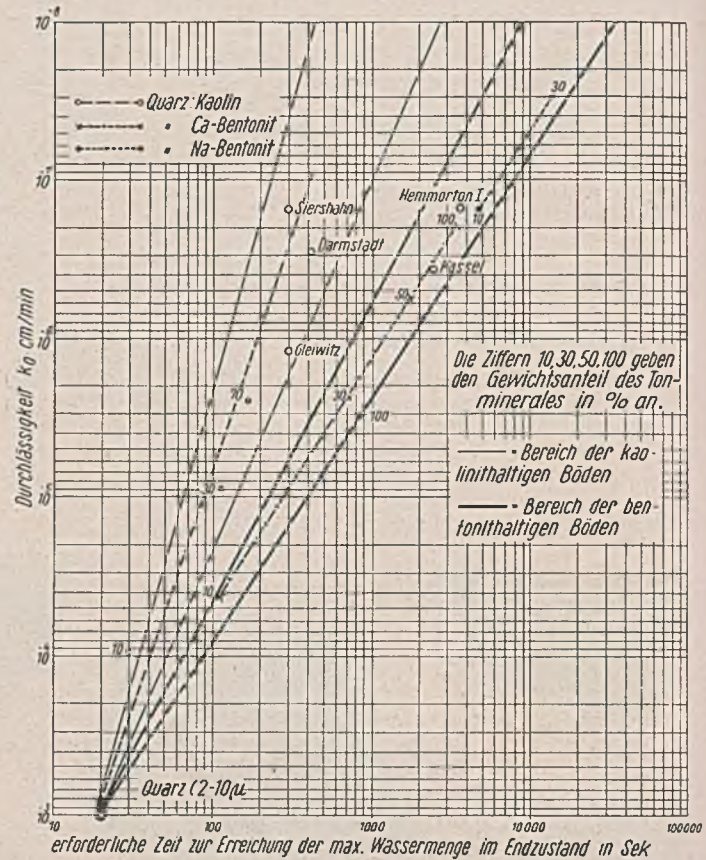
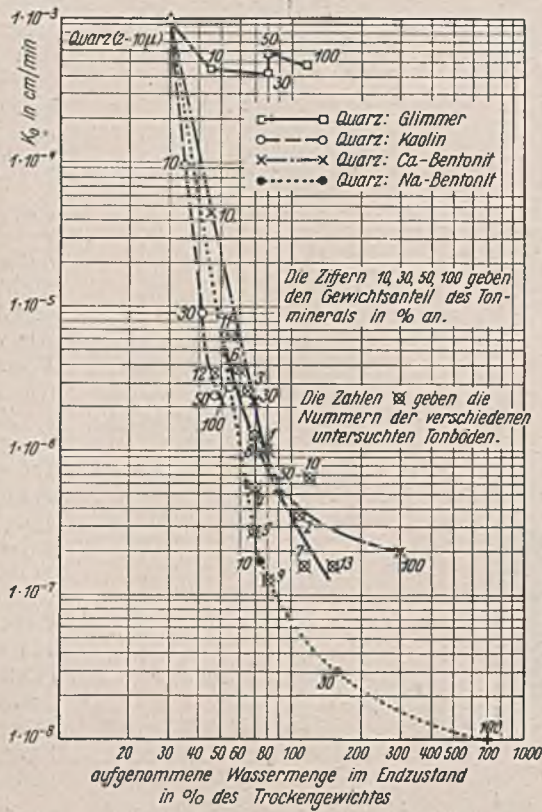
⁹⁾ K. Endell, Beitrag zur chemischen Erforschung und Behandlung von Tonböden. Bautechn. 1935, S. 226.

die Zähigkeit (Viskosität) der gebundenen Wassermenge geändert und damit der Widerstand gegen den Durchgang des Wassers vergrößert wird. Die Folge ist eine Verringerung der Filtergeschwindigkeit.

Die entsprechenden Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten wurden bei dem Reibungsbeiwert (Abb. 16) und der Verdichtungsziffer (Abb. 17) festgestellt. Auch hier bewirkt der Zusatz von Na-Bentonit die stärkste Verminderung des Winkels der inneren Reibung und die stärkste Zunahme der Zusammen-drückungsfähigkeit. Durch diese Tatsachen ist eindeutig bewiesen, daß eine Beziehung zwischen dem Quellvermögen und den bodenphysikalischen Kennziffern der Tonminerale besteht. Erhärtert wird diese Beziehung noch durch die Abhängigkeit der Kennziffern von der im Endzustand im Enslin-Gerät aufgenommenen Wassermenge sowie der dazu erforderlichen Zeit, wie sie für die Durchlässigkeit k_0 in Abb. 18 u. 19 dargestellt ist.

Die Menge des im Enslin-Gerät angesaugten Wassers entspricht einem Sonderfall, bei dem wenig Wasser auf viel Ton einwirkt. Anders verhalten sich die Tone, wenn Wasser im Überschuß vorhanden ist. Der Grad des Zerfalls hängt auch in diesem Fall weitgehend von dem Kristallgitter des Tonminerals und der Art und Menge der austauschfähigen Basen ab. Einige Hinweise sind seinerzeit von dem Verfasser gebracht worden (Abb. 20⁹⁾).

Über die Druckverhältnisse in den Wasserhüllen um die Tontellchen ist verhältnismäßig wenig Sicheres bekannt. Vom Standpunkt der Bautechnik ist am wichtigsten die Frage, bei welchem Druck das Wasser aus Tonmineralien oder Ton-Quarzmischungen abgepreßt wird. Aus den Druck-Porenzifferlinien hatte bereits H. Meischer¹⁰⁾ die Unterschiede der Setzungen für Quarzmehl und im Verhältnis 7:3 gemengte Gemische von Quarzmehl mit Kaolin, Ca- und Na-Bentonit untersucht (Abb. 21). Da die Porenziffer als Verhältnis der Hohlräume (hier mit Wasser gesättigt) zu den festen Teilen auch ein Maß für den Wassergehalt¹⁰⁾ ist, so geht auch aus diesem Schaubild eindeutig die verschiedene Wasserblindung der einzelnen Gemenge hervor. Ein beliebiger waagerechter Schnitt zeigt, welche Wassermengen bei dem entsprechenden Druck abgepreßt werden.



Zahlentafel 4. Kennzeichnende Eigenschaften der zerfallenden Tone der Abb. 20.

Nr.	Bezeichnung	Tonmineral	Bel-mengung	Anmachewasser In % des Trockengewichts	S-Wert in Milliäquivalent je 100 g Trockenmasse	Na-Wert
1	geschlämmter unplastischer Kaolin	Kaolinit	10—20% Quarz	30	4	0
2	plastischer Westerwälder Ton	Kaolinit	etwa 10% Quarz	45	10	0
3	Bentonit	Montmorillonit	< 5% Quarz	100	100	1
4	Meeresablagerung aus der Gegend von Hamburg, Na-Ton	Montmorillonit	< 5% Quarz	60	26	6

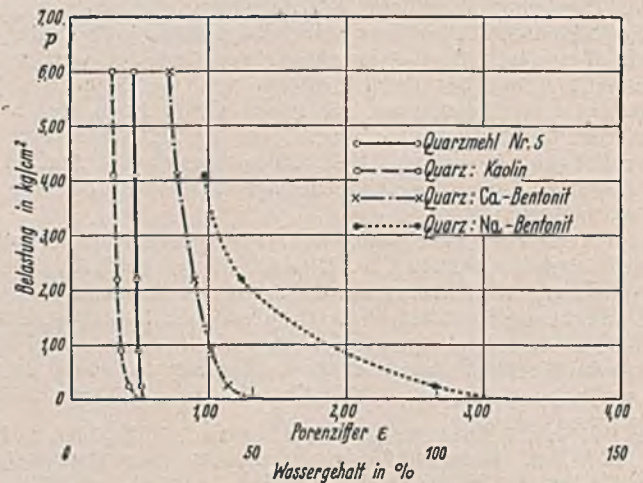


Abb. 20. Zerfallen verschiedener Tone und Böden nach 15 min Lagerung in Leitungswasser (vgl. Zahlentafel 4).

H. Breth⁹⁾ hat sich bemüht, im Tonboden den größten Kapillardruck zu messen. Er ging dabei von folgenden Überlegungen aus. Durch die Veränderungen der Dicke der um die Tontellchen gelagerten Wasserhüllen ist das Quellen und Schrumpfen der Böden bedingt. Eine Veränderung der Dicke der Wasserhüllen kann durch Änderung des mechanischen Drucks, durch Änderung des Kapillardrucks und durch Änderung des Porenwasserdrucks hervorgerufen werden. Durch mechanischen Druck wird zunächst das freie ungebundene Wasser aus den Poren gepreßt; schließlich geben auch die verdichteten Wasserhüllen ihr Wasser ab, wodurch Schrumpfung eintritt. Der gleiche Vorgang vollzieht sich, wenn der voll mit Wasser gesättigte Boden der Verdunstung unterworfen wird. Diese beiden einander entsprechenden Erscheinungen, Verdichtung durch mechanischen Druck und Schrumpfung durch Verdunstung, brachte Breth in Beziehung, um die Kapillarkraft des Bodens zu bestimmen.

Bei einem vollkommen mit Wasser gesättigten Boden nimmt mit fortschreitender Verdunstung der Porenraum ab. Bis zum Beginn der

¹⁰⁾ Der Wassergehalt als Verhältnis des Gewichts des in einer bestimmten Bodenmenge enthaltenen Wassers zu dem Trockengewicht ihrer festen Teile von der Wichte γ_s ist $w = \frac{1 \cdot n}{\gamma_s (1 - n)} = \frac{n}{\gamma_s}$, wenn n der Anteil des Porenraumes am Gesamtrauminhalt ist.



Restschrumpfung ist er gleich dem im Boden verbleibenden Wassergehalt. Beim Abreißen der Kapillaren ist der Porenraum nur noch teilweise mit Wasser gefüllt. Aus der fortlaufenden Bestimmung des Porenraumes, aus dem jeweiligen Wassergehalt und der Ermittlung des Inhalts des Probekörpers läßt sich der Zeitpunkt des Abreißen der Kapillaren bestimmen.

Diese Versuche wurden wie folgt durchgeführt. Ein geformter Probekörper von 2,5 cm Durchm. und 4 cm Höhe mit einem der Fließgrenze

entsprechenden Wassergehalt wurde der Verdunstung bei Zimmertemperatur überlassen. In gewissen Zeitabständen wurde das Gewicht und der Rauminhalt des Probekörpers durch Eintauchen in Quecksilber bestimmt, woraus sich die Porenziffer berechnen läßt. In dem Augenblick, in dem die Kapillaren abreißen, wird die aus dem Wassergehalt ermittelte Porenziffer zu klein. Man erhält in diesem Zeitpunkt, in dem die Restschumpfung beginnt, die Porenziffer, die dem Knickpunkt der Schumpfungslinie (Abb. 22 links) entspricht.

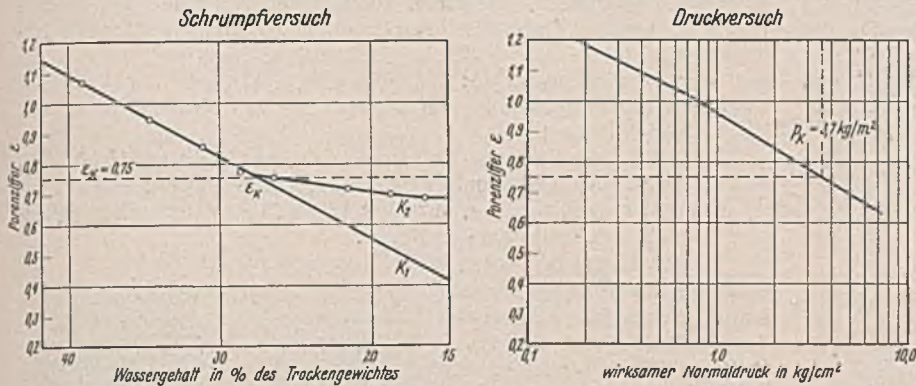


Abb. 22. Ermittlung des größten Kapillardruckes durch Schrumpf- und Druckversuch.

Der gleiche Boden mit dem Wassergehalt der Fließgrenze wurde in einer Höhe von 10 mm in ein Verdichtungsgerät eingebracht und langsam steigernd belastet. Die der jeweiligen Belastung entsprechende Porenziffer wurde in einer Druck-Porenziffer-Linie (Abb. 22, rechts) aufgetragen. Aus ihr ist der Druck zu entnehmen, dem die gleiche Porenziffer, wie sie beim Schrumpfungsversuch gefunden wurde, entspricht. Dieser Druck wird der Kapillarkraft gleichgesetzt, er entspricht dem „größten“ Kapillardruck.

Wie Abb. 23 u. 24 zeigen, ist der nach diesem Verfahren bestimmte Größtwert der Kapillarkraft genau wie die anderen bodenphysikalischen Kennziffern von der chemischen Natur des Tonminerals und damit vom Enslin-Wert abhängig.

Zusammenfassend ist also festzuhalten, daß alle wichtigen bodenphysikalischen Eigenschaften, wie Reibungsbeiwert, Verdichtungsziffer, Durchlässigkeit, Größtwert des Kapillardruckes, Zerfallserscheinungen in wäßrigen Lösungen in starkem Maße durch den Anteil an Quarz und die Art und Menge der jeweiligen Tonminerale beeinflusst werden. Davon hängt das Quellvermögen im Wasser ab, das bequem nach aufgenommener Wassermenge und Geschwindigkeit der Aufnahme im Enslin-Gerät ermittelt werden kann. Soweit natürliche Böden untersucht sind, lassen sie sich gut in die Reihe der künstlichen Tonmineral-Quarz-Gemenge

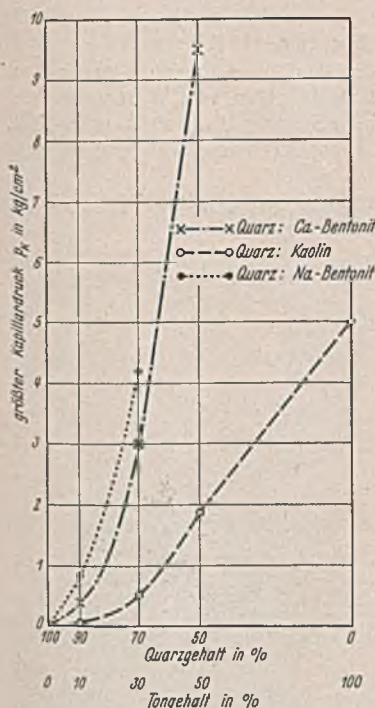


Abb. 23.

Abhängigkeit des Größtwertes des Kapillardruckes p_K vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

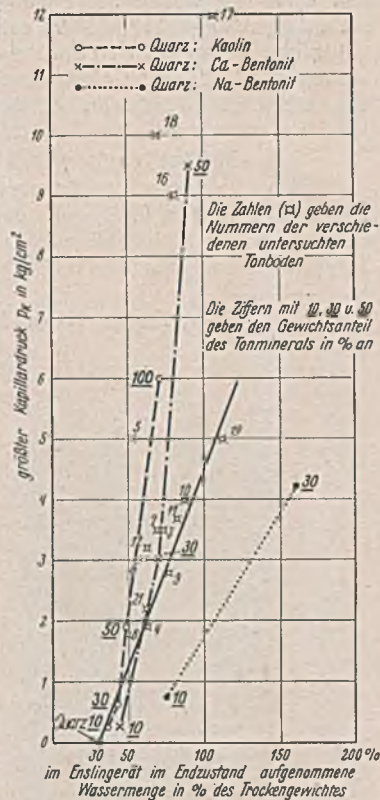


Abb. 24. Abhängigkeit des Größtwertes des Kapillardruckes p_K von der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge bei den Gemengen und bei natürlichen Tonböden.

einfügen. Streuungen sind bedingt durch die Schwierigkeiten der mengenmäßigen Mineralbestimmungen in Tonen, die erst in neuester Zeit durch Photometrierung der Interferenzen ihrer Röntgenbilder versucht wurden¹¹⁾.

III. Praktische Anwendung auf bautechnischem Gebiet.

Wenn auch die vorliegenden Untersuchungen eine klare Abhängigkeit aller bodenphysikalischen, auf dem Quellvermögen der Tone beruhenden Eigenschaften von der chemischen Natur der Tonminerale gezeigt haben, so ist es im Grundbau doch nur selten möglich, den Mineralaufbau einer Tonbodenprobe, der auch noch häufig im Gelände wechselt, eindeutig festzustellen. Darauf beruht die bedauerliche Tatsache, daß die im Prüfraum gewonnene Kenntnis bisher in der Bautechnik nur wenig Anwendung fand. Neue Erkenntnisse brauchen im übrigen auch immer eine gewisse Zeit, bevor sie Allgemeingut des Praktikers werden. Im vorliegenden Fall kommt noch die Schwierigkeit hinzu, den mengenmäßigen Mineralaufbau eines Tonbodens auf einfachem Wege zu erkennen.

Bei dieser Sachlage ist es nicht zu verwundern, daß bisher praktische Anwendungen nur auf einigen Teilgebieten vorliegen, und zwar auf dem Gebiet der Frosteinwirkung auf bindige Böden, der elektrochemischen Bodenverfestigung und der Anwendung von Na-Bentonit als Dichtungsmittel im Straßen- und Grundbau. Die wesentlichsten Ergebnisse auf diesen Gebieten werden nachstehend gebracht.

a) Frosteinwirkung auf bindige Böden.

A. Dücker¹²⁾ hat in der Arbeitsgruppe Untergrundforschung der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen beim Generalinspektor für das deutsche Straßenwesen eine große Anzahl wertvoller Arbeiten durchgeführt, um die Frosteinwirkung auf bindige und auch nichtbindige Böden zu erforschen. Er ging von den gleichen Modellstoffen aus, die den Arbeiten von H. Meischeder⁹⁾ und H. Breth⁹⁾ zugrunde lagen. Er stellte künstliche Tonböden her und untersuchte den zeitlichen Frosthebungsverlauf in einem geeigneten Eisschrank. Wegen der verwendeten Geräte muß auf die genannte Quelle verwiesen werden.

¹¹⁾ E. Maegdefrau und U. Hofmann, Quantitative Bestimmung der Mineralien im Ton auf röntgenographischem Wege. Ber. d. D. Keram. Ges. 21, (1941), S. 383, und Die Straße 1940, Heft 3/4, S. 68.

¹²⁾ A. Dücker, Untersuchungen über die Frostgefährlichkeit nicht bindiger Böden. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Bd. 17. Berlin 1939, Volk u. Reich Verlag. — A. Dücker, Frosteinwirkung auf bindige Böden. Straßenbaujahrbuch 1939/40, S. 111. Berlin 1940, Volk u. Reich Verlag.

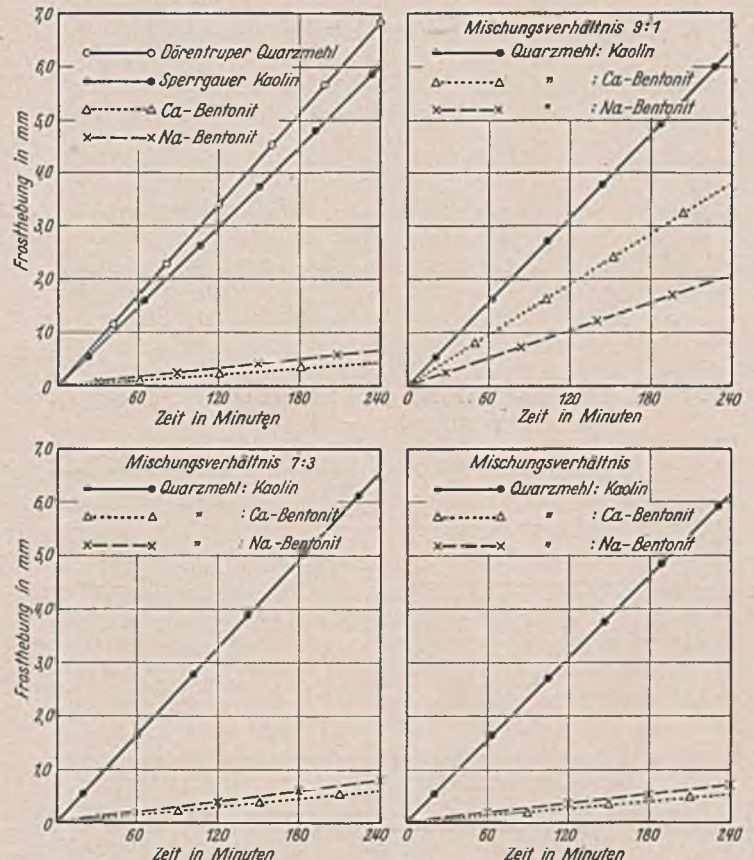


Abb. 25. Zeitlicher Frosthebungsverlauf bei einer Temperatur von -15°C von Quarzmehl-Tongemischen in Abhängigkeit von der Menge und Art des Tonminerals.

Abb. 25 zeigt den zeitlichen Frosthebungsverlauf von Quarz, Spergauer Kaolin, Ca- und Na-Bentonit sowie Mischungen von Quarzmehlen mit diesen Tonen im Verhältnis 9:1, 7:3 und 1:1. Die stärkste Frosthebung zeigt Quarzmehl, danach folgt Kaolin, die geringste zeigen die Bentonite. Die Frosthebungen sind von den während des Gefrierens zusätzlich aufgenommen Wassermengen abhängig, die kapillar aus tieferen Schichten angesogen werden.

Im Schrifttum über Bodenfrost begegnet man häufig dem Hinweis, daß für die unterschiedlichen Frosthebungen, d. h. für die während des Gefrierens zusätzlich zum Frostbereich geförderten Wassermengen die Durchlässigkeit des Bodens verantwortlich zu machen ist. Kögler und Scheidig¹³⁾ stellten das sogenannte „Freiberger Frostmerkmal“ auf, dessen Gültigkeit durch die von A. Dücker durchgeführten Versuche in Frage gestellt wird.

Abb. 26 zeigt die Abhängigkeit der Frosthebung von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge, Abb. 27 die Beziehung zwischen Frosthebung und Durchlässigkeit und Abb. 28 die Beziehung zwischen Frosthebung und Enslin-Wert.

Aus diesen Darstellungen geht eindeutig hervor, daß von einer allgemeinen Abhängigkeit der Frosthebung von der Durchlässigkeit kaum gesprochen werden kann. Bestimmend für den Frosthebungsbetrag ist und bleibt der Tonmineralgehalt des Bodens. Nur innerhalb der einzelnen Tonmineralgruppen läßt sich eine gewisse Beeinflussung der Frosthebung von der Durchlässigkeit

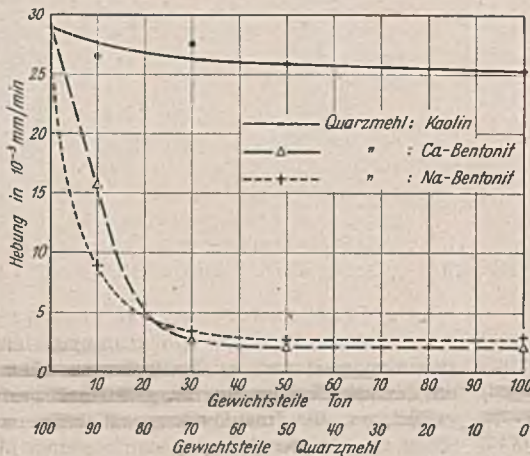


Abb. 26. Abhängigkeit der Frosthebung von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge (Temperatur -15° C).

¹³⁾ Kögler, A. Scheidig, H. Leussink, Beiträge zur Frostfrage im Straßenbau. Bodenmechanik und neuzeitlicher Straßenbau. Schriftenreihe der Straße, Heft 3, S. 32 bis 41. Berlin 1936, Volk u. Reich Verlag.

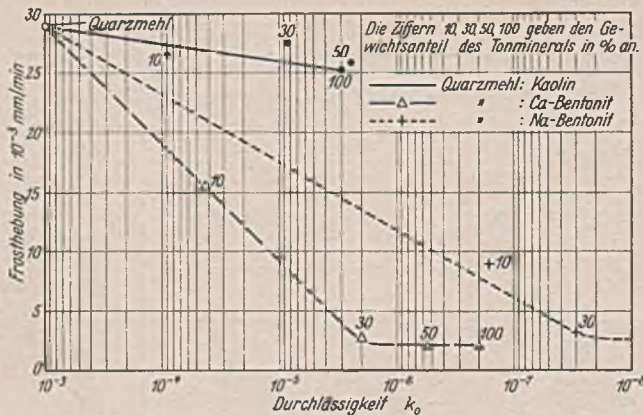


Abb. 27. Beziehung zwischen Frosthebung und Durchlässigkeit (Temperatur -15° C).

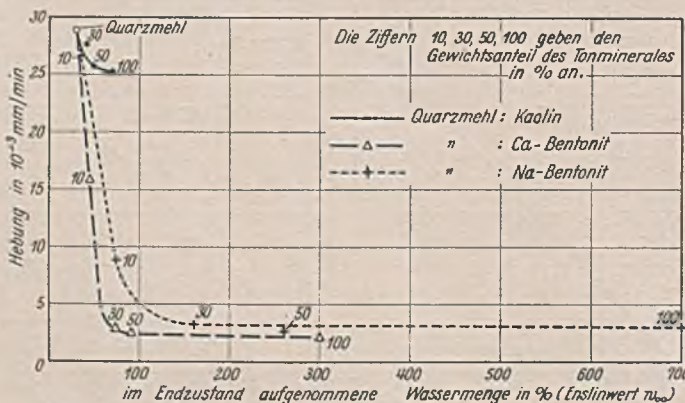


Abb. 28. Beziehung zwischen Frosthebung und Enslin-Wert (Temperatur -15° C).

des Bodens ableiten. Es ergeben sich für die Frosthebung von Tonböden zwei Bereiche:

1. Der von der Durchlässigkeit mehr oder weniger unbeeinflusste Bereich der kaolinithaltigen Böden;
2. der von der Durchlässigkeit beherrschte Bereich der bentonithaltigen Böden.

Aus Abb. 28 geht hervor, daß eine unmittelbare Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmevermögen und der Frosthebung nur innerhalb der einzelnen Quarzmehl-Tonmineral-Mischungen vorhanden ist, indem mit zunehmendem Enslin-Wert der Frosthebungsbetrag gesetzmäßig abnimmt.

Man kann unterscheiden:

1. stark frosthebende, im wesentlichen aus Kaolinit bestehende bindige Böden;
2. mehr oder weniger frosthebende, aus höchstens 15 bis 25% Montmorillonit (Bentonit) bestehende bindige Böden;
3. nicht frosthebende, aus über 15 bis 25% Montmorillonit (Bentonit) bestehende bindige Böden.

Je nach den Tonmineralen sind die Erscheinungsformen der die Frosthebung bedingenden Eislinsen und die Eisschichtenbildung verschieden. Beim Kaolinit (Abb. 29) entstehen deutlich Schichten, während beim Na-Bentonit (Abb. 30) sich ein Vieleckgefüge bildet.

Wohl zu unterscheiden ist zwischen Frosthebung und Frostgefährlichkeit. Auch die Vieleck-eisschichtenbildung beim Bentonit ergibt einen frostempfindlichen Boden im Straßenbau, der nicht als frostsicher angesprochen werden kann. Er zeigt zwar eine geringe Frosthebung; beim andauernden Auftauen und wieder Gefrieren entsteht aber ein von zahlreichen Spalten und feinen Haarrissen durchzogener Boden, der frostgefährlich ist. Beobachtungen in der Natur lassen darauf schließen, daß dazu nur wenige Jahre nötig sind. Dücker schließt aus seinen planmäßigen Versuchen, daß für den Straßenbau alle Tonböden, gleichgültig ob sie Kaolinit oder Montmorillonit als wesentliches Tonmineral enthalten, als frostgefährlich angesprochen und mit einer Frostschuttschicht versehen werden müssen.

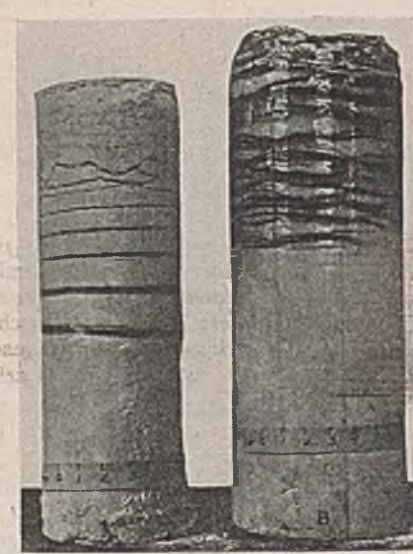


Abb. 29. Eislinsenbildung in einem kaolinithaltigen Boden nach Taber¹⁴⁾.

b) Elektrochemische Bodenverfestigung.

Seit vielen Jahren bemüht man sich, Tonböden tragfähig zu machen. Bekanntlich werden Fließsande durch Einspritzen von Wasserglas und Salzlösungen verfestigt, wobei SiO_2 oder Silikate, die verkittend wirken, ausgeschieden werden (Joosten-Verfahren). Da Tonschichten, wenigstens

¹⁴⁾ St. Taber, Frost heaving. Journal of Geology, Bd. 37 (1929), Nr. 5.

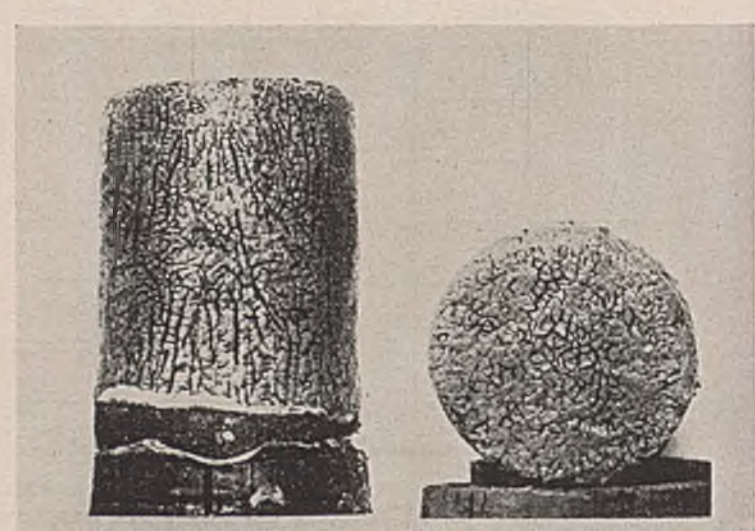


Abb. 30. Vieleckgefüge beim Gefrieren von Na-Bentonit.

wenn sie Montmorillonit enthalten, wasserundurchlässig sind, können Lösungen in sie nicht eingespritzt werden. L. Casagrande wandte als erster „Elektrizität gegen Ton“ an, um auch Tonböden zu verfestigen. Das Verfahren⁹⁾ beruht darauf, daß in den zu behandelnden Tonböden in geeigneten Abständen Metallelektroden eingebracht und durch Gleichstrom die einzelnen Tonteilchen elektrochemisch umgeladen werden. Die Verfestigung kommt wahrscheinlich zum größten Teil durch diese Umladung der Tonteilchen unter dem Spannungsgefälle des elektrischen Stromes zustande. Der elektrisch behandelte Tonboden hat, wie Versuche gezeigt haben, seine Quellung verloren, wodurch eine Erhöhung der Mantelreibung besonders von schwimmenden Pfahlgründungen erreicht wird. Versuche von L. Erlenbach¹⁵⁾ und L. Casagrande¹⁶⁾ haben gezeigt, daß in solchen Fällen bei geringem Stromverbrauch die Mantelreibung für einen Pfahl von 8 t auf 36 t erhöht werden kann¹⁷⁾.

Die Anwendung dieses in einzelnen Fällen sicher aussichtsreichen Verfahrens ist wegen der Kriegsverhältnisse über einige Großversuche nicht hinausgekommen, es wird aber sicher in Zukunft steigende Verbreitung finden.

c) Na-Bentonit als Dichtungsmittel im Straßen- und Grundbau.

Bei ungestörter Lagerung ist gequollener Na-Bentonit völlig wasserundurchlässig. Diese Eigenschaft ermöglicht die Ausführung von Fugendichtungen in Straßendecken (Abb. 31).

Na-Bentonit ist entweder in reiner Form oder in Mischung mit Sand zur Dichtung einer Reihe weiterer Ingenieurbauten zur Anwendung gekommen, so z. B. beim Probekasten für die Elbehochbrücke in Hamburg, für die Abdichtung der Hinterfüllung von Stützmauern usw. Es ist auch angeregt worden, Na-Bentonit mit Sand im Mischungsverhältnis 1:10 zur Dichtung unterirdischer Großraumbehälter zu verwenden. Dadurch wird eine außerordentlich schnelle und billige Herstellung der Behälter gewährleistet, unter Fortfall der insbesondere gegen ungleichmäßige Setzungen sehr empfindlichen Betonwandungen.

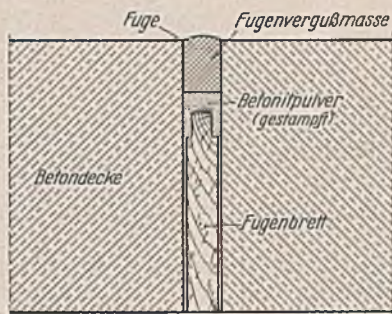


Abb. 31. Fugendichtung mit hochquellfähigem Bentonit.

Gleichzeitig wird durch die Bentonit- und Sandmischung eine vollkommene Dichtung gewährleistet, was bei Betonwandungen sehr großer Behälter nur mit sehr schwerer Bewehrung und auch dann nicht immer gewährleistet erscheint. Bei der schweren Aufgabe der Wasserbeschaffung und vor allem der Wasserspeicherung in den Kolonien, z. B. in Afrika, wird man möglicherweise auf diese Eigenschaften von Bentonit-Sand-Mischungen, die wasserundurchlässig sind und Setzungsschwierigkeiten vermeiden, zurückgreifen. Schließlich wird man allgemein bei der Auswahl der Dichtungsböden für Talsperren, Sperrdämme, Deiche, für über dem Grundwasser liegende Strecken der Schiffahrtskanäle, der Zubringer für Wasser-

¹⁵⁾ L. Erlenbach, Anwendung der elektrochemischen Verfestigung von schwimmenden Pfahlgründungen. Bautechn. 1936, S. 257.

¹⁶⁾ L. Casagrande, Die elektrochemische Bodenverfestigung. Bautechn. 1939, S. 228.

¹⁷⁾ L. Casagrande, Großversuch zur Erhöhung der Tragfähigkeit von schwimmenden Pfahlgründungen durch elektrochemische Behandlung. Bautechn. 1937, S. 14; — vgl. a. C. Kumutat, Über die elektrochemische Bodenverfestigung nach dem Verfahren von L. Casagrande. Angew. Chemie 53 (1940), S. 168.

kraftwerke und Bewässerungsanlagen, sowie für Kanäle und Leitungen aller Art, die gegen Wasserverluste geschützt werden müssen, die oben geschilderten Ergebnisse der Forschung immer mehr berücksichtigen müssen. Man wird so Tondichtungen aller Art sicherer und wirtschaftlicher ausbilden können, als es bisher möglich war.

Ausblick.

Durch das Vorhergehende ist nachgewiesen, daß die Natur der Tonminerale für eine Reihe von Bauweisen im Straßenbau und im Tiefbau von wesentlicher Bedeutung ist. An einigen Beispielen konnte gezeigt werden, daß sich hier eine Entwicklung abbahnt, die, wenn sie auch erst im Anfang steht, doch schon heute immer mehr an Bedeutung gewinnt und dem Bauingenieur auf so manche bisher ungelöste Frage eine befriedigende Antwort geben kann. Allerdings wird es erforderlich sein, daß die Forschung in enger Zusammenarbeit zwischen dem Bauingenieur (Erdbaumechaniker) und dem Bodenchemiker noch mehr zu Worte kommt, als es bisher der Fall gewesen ist. Unter anderem werden in nächster Zeit folgende wichtige chemisch-physikalische Wechselbeziehungen der hauptsächlichsten Bodenarten geklärt werden müssen:

1. Untersuchung der Verwitterungserscheinungen und insbesondere der Verwitterungsgeschwindigkeit einzelner Bodenarten in Abhängigkeit vom Klima (der mittleren Jahrestemperatur des Bodens, der Regenmenge usw.) und Untersuchung der Möglichkeit ihrer Beeinflussung zum Zwecke besserer Gewinnbarkeit und Verwendbarkeit im Erdbau.
2. Einfluß der häufig hochquellfähigen organischen Bodenteile auf bodenphysikalische Kennziffern und Wasserhaushalt sowie Abgrenzung dieses Einflusses gegenüber den Tonmineralen.
3. Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes der Böden von der Natur der Tonminerale und der Humuskolloide. Untersuchung brauchbarer Möglichkeiten zur Erhöhung des Reibungswinkels, etwa mit Hilfe elektrochemischer Einflüsse. Entwicklung eines einfachen Verfahrens zur Beurteilung des Reibungsbeiwertes auf der Baustelle.
4. Einfluß der Tonminerale und der Humuskolloide sowie allgemein chemischer Einflüsse auf das Maß der Frostgefährlichkeit von Böden. Erforschung der Möglichkeit, ob die Frostgefährlichkeit auf einfache Weise mit chemischen oder elektrochemischen Mitteln herabgesetzt werden kann.
5. Untersuchung der chemisch-physikalischen Wechselbeziehungen bei der elektrochemischen Verfestigung von Böden. Solange die grundsätzlichen Zusammenhänge nicht geklärt sind, besteht trotz einzelner guter Erfolge keine Möglichkeit einer allgemein erfolgreichen Anwendung in der Praxis.
6. Wechselwirkung zwischen Tonanteil, Humuskolloiden und Zement in wässriger Lösung und ihr Einfluß auf zementverfestigte Straßen. Besonders im Hinblick auf den kolonialen Straßenbau ist die Erforschung dieser Zusammenhänge dringlich.
7. Durchführung von Modellversuchen von Bentonit und Bentonitmischungen mit Sand für Dichtungszwecke und Prüfung der Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis. Besonders wird man prüfen müssen, ob man ganz allgemein eine Verbesserung der Tondichtungen erzielen kann, die bei Talsperren, Sperrdämmen, Deichen, bei Dichtungsstrecken von Schiffahrts-, Kraft- und Bewässerungskanälen, bei Stauanlagen, Behältern usw. angewendet werden. Bei allen diesen Bauten hat man auf die Art des Einbringens des Dichtungsbodens immer großes Gewicht gelegt, bei der Auswahl des Bodens aber bisher die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Bodenkunde nicht genügend berücksichtigt. —

Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Professor Dr.-Ing. L. Casagrande in Berlin für die Durchsicht dieser Arbeit sowie die Möglichkeit fruchtbarer Aussprache über die vorliegenden Fragen herzlich zu danken.

Alle Rechte vorbehalten.

Der Betriebswirkungsgrad von Wasserhaltungspumpen auf Baustellen.

Von Dipl.-Ing. Ernst Wetzel VDI in Frankfurt a. M.

Die Kosten der Wasserhaltung sind bei Bauten mit tiefen Gründungen recht beachtlich. Ein wesentlicher Teil entfällt auf den elektrischen Strom für die Antriebsmotoren¹⁾. Die zu fördernden Wassermengen betragen oft mehrere hundert Liter in der Sekunde. Bei einem großen Schleusenbau aus letzter Zeit waren beispielsweise bei gewöhnlichem Wasserstand bis zu 1000 l/sek und bei Hochwasser beinahe doppelt so viel zu pumpen²⁾. Aber auch die kleinen Baustellen mit Wasserhaltung dürfen nicht übersehen werden, da ihre Zahl recht groß ist und die fachmännische Überwachung des Pumpenbetriebes hier meist fehlt, worauf oft schon das Nichtvorhandensein eines Druck- und Unterdruckmessers hinweist. Selbst dann, wenn die reinen Strom- oder Brennstoffkosten für die Wasserhaltung gegenüber den übrigen Gründungskosten des Bauwerks geringfügig sind, muß man die Pumpenanlage mit möglichst gutem

Wirkungsgrad betreiben, um den elektrischen Strom oder den Brennstoff nicht zu vergeuden. Einen ausführlichen Bericht über den Wirkungsgrad der großen Wasserhaltungsanlage für den Bau der Doppelschleuse in Wesermünde-Geestemünde geben Arp und Dettmers¹⁾. Ähnliche Veröffentlichungen aus neuerer Zeit, insbesondere über die Anwendung von Unterwasserpumpen, liegen nicht vor.

Die Nutzleistung N_0 einer Pumpe ist durch die Wassermenge Q (l/sek) und die Förderhöhe H (m) gegeben und beträgt:

$$N_0 = QH \text{ kg m/sek} \quad \text{oder} \quad N_0 = \frac{QH}{102} \text{ kW.}$$

Läuft der Pumpenbetrieb beispielsweise 24 Stunden und ist q die in dieser Zeit geförderte Wassermenge in m^3 , so ist die in 24 Stunden geleistete Nutzarbeit

$$A_0 = 1000 q H \text{ kgm} \quad \text{oder} \quad A_0 = \frac{qH}{367} \text{ kWh.}$$

¹⁾ Z. f. Bauwes. 1926, Ing.-Bautell, H. 7/9 u. 10/12, S. 77 u. 105.

²⁾ Z. d. VdI 1940, H. 13, S. 227.

Da die dem Pumpenmotor zugeführte elektrische Arbeit vom Elektrizitätszähler ebenfalls in kWh gemessen wird, kann man den Gesamt-Wirkungsgrad (η_{ges}) von Pumpe und Motor leicht ermitteln. Bezeichnet A_1 die vom Antriebsmotor während der Förderung der q m³ Wasser aus dem Netz entnommene elektrische Arbeit in kWh, so ist

$$\eta_{ges} = A_0/A_1 = \frac{qH}{367 A_1}$$

Der Wirkungsgrad einer Pumpe mit Elektromotor kann also mit einfachen Mitteln überwacht werden, wenn Wassermenge und Förderhöhe neben dem Kilowattstundenverbrauch ständig gemessen werden. Außerdem ergibt sich hierbei am Ende der Bauzeit der mittlere Betriebswirkungsgrad der Pumpenanlage aus der gesamten Nutzarbeit und der für die Wasserhaltung bezogenen elektrischen Arbeit. Der so ermittelte Wert ist von größerer Bedeutung als der günstigste Wirkungsgrad, der vorübergehend auf der Baustelle erreicht worden ist.

Der Gesamtwirkungsgrad ist das Produkt aus dem Wirkungsgrad der Pumpe η_p und dem Wirkungsgrad des Motors η_M . Der Wirkungsgrad der meist verwendeten Drehstrom-Asynchron-Motoren ist zwischen Vollast und Halblast praktisch unveränderlich — er beträgt je nach der Motorgröße 85 bis 92% — und fällt bei $\frac{1}{4}$ Last um knapp 10% seines Bestwertes ab (Zahlentafel 1).

Zahlentafel 1.

Wirkungsgrad eines Drehstrom-Asynchron-Motors von 18 kW bei 960 Umdrehungen in der Minute.

Abgegebene Motorleistung in %	25	50	75	100
Wirkungsgrad in %	83	88	89	88

Der Wirkungsgrad der Pumpe ändert sich mit der Belastung erheblich und wird von der Fabrik für gleichbleibende Drehzahlen in Abhängigkeit von der Wassermenge angegeben. Auch die Förderhöhe der Pumpe ändert sich mit der Fördermenge. Besonders übersichtlich sind die Werte in der zeichnerischen Darstellung, der sogenannten Kennlinie (Charakteristik) der Pumpe, bei der Q als Abszisse, die Förderhöhe und der Wirkungsgrad als Ordinaten dargestellt werden. Dabei ist zu beachten, daß bei jeder Wassermenge eine bestimmte Saughöhe, über die die Fabrik nähere Angaben macht, nicht überschritten werden darf. Ihre Bedeutung ergibt sich aus Zahlentafel 2. Die hier aufgeführten Saughöhen h_s sind so gering, daß die Pumpe trotz ihrer sonst guten technischen Zahlen für den Baubetrieb nur beschränkt verwendbar ist.

Zahlentafel 2.

Technische Zahlen einer Kreiselpumpe.

Wassermenge $Q =$	3,3	4,3	5,1	6	7	7,6	8,3 m ³ /min
Förderhöhe $H =$	14,45	13,95	13,13	11,9	10,25	9,2	7,5 m
Wirkungsgrad $\eta =$	60	70	75	77	75	70	60 %
Saughöhe $h_s =$	7,8	7,3	6,8	6,4	5,7	5,2	4,5 m

Man beachte im Punkt des besten Wirkungsgrades ($Q = 6$ m³/min) die Saughöhe von nur 6,4 m, die bei $Q = 7,6$ m³/min auf 5,2 m fällt, während der Wirkungsgrad mit 70% noch gut ist.

Überschreitet die Saughöhe den vorgeschriebenen Höchstwert, so tritt im Lauf der Hohlraumbildung (Kavitation) auf, die Förderhöhenlinie biegt nach unten ab (Abb. 1). Die Saughöhe von 7,8 m kann hier nur

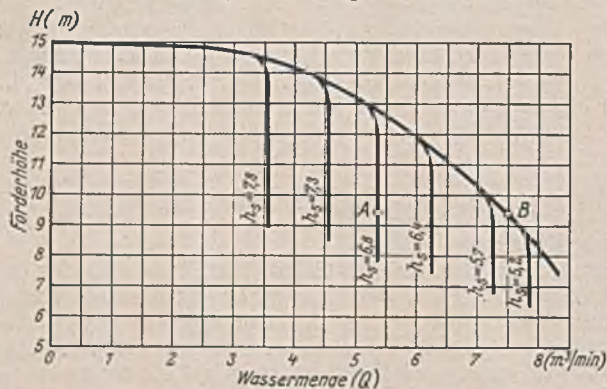


Abb. 1. Kennlinie einer Pumpe mit den bei verschiedenen Saughöhen durch Hohlraumbildung verursachten Veränderungen.

bei Wassermengen von 0 bis 3,3 m³/min, die Saughöhe 7,3 m nur bis 4,3 m³/min erreicht werden. Wird diese Pumpe z. B. mit der Förderhöhe 9,4 m bei der Saughöhe 6,8 m betrieben, so beträgt die größtmögliche Fördermenge 5,35 m³/min (Betriebspunkt A) gegenüber 7,5 m³/min bei gleicher Förderhöhe, aber einer Saughöhe von 5,3 m (Betriebspunkt B). Im Bereich der Hohlraumbildung ist der Wirkungsgrad der Pumpe schlechter als die Kennlinie für die geförderte Wassermenge an-

gibt³⁾. Angaben über das Ausmaß der Wirkungsgradverringerung sind nicht veröffentlicht. Da außerdem die Schaufeln angegriffen werden, geht der Wirkungsgrad langsam weiter zurück. Der Betrieb einer Pumpe im Bereich der Hohlraumbildung ist zu verwerfen⁴⁾.

Während die Förderhöhe der Pumpe als Druckunterschied zwischen Saug- und Druckraum gemessen eindeutig festliegt, ist zu prüfen, welcher Wert als Förderhöhe der Wasserhaltungsanlage eingesetzt werden soll. Man könnte die geodätische Förderhöhe wählen, würde dabei aber auf die jeweiligen örtlichen Verhältnisse keine Rücksicht nehmen und die Wasserhaltung mit langer Rohrleitung gegen eine Anlage mit kurzer Rohrleitung im Wirkungsgrade benachteiligen. Deshalb muß man die Reibungshöhe der richtig bemessenen Rohrleitung zur geodätischen Förderhöhe zuschlagen. Diese wird dabei vom Unterwasserspiegel im Brunnen oder Pumpensumpf bis zum Oberwasserspiegel des Flusses oder Kanals, der das gepumpte Wasser aufnimmt, gemessen. Bisweilen wurde die geodätische Förderhöhe auch bis zum höchsten Punkt der Druckleitung gerechnet. Dies empfiehlt sich jedoch nicht, weil hierbei auf die Möglichkeit der Rückgewinnung von Förderhöhe durch Heberwirkung beim Abführen des Wassers in den tiefer gelegenen Wasserlauf keine Rücksicht genommen wird. Die Bedeutung der Heberwirkung erkennt man aus Abb. 2, in der die geodätische Förderhöhe mit Heberwirkung 4,4 m und ohne sie 12,50 m beträgt. Hier werden ohne Heberwirkung mehr als $2\frac{1}{2}$ mal soviel Kilowattstunden verbraucht als mit Heberwirkung.

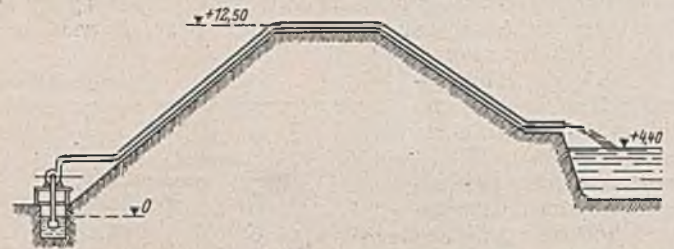


Abb. 2. Wasserförderung ohne Heberanlage über einen Damm.

Solche Heberanlagen wurden seither kaum ausgeführt, weil die Entlüftung Schwierigkeiten bereitet. Da hierfür jetzt aber die handlichen betriebssicheren Wasserringpumpen⁵⁾ auch in der Ausführung als Luftpumpen zur Verfügung stehen, muß man in Zukunft von dieser Möglichkeit der Stromersparnis Gebrauch machen. Die Betriebssicherheit von Wasserringpumpen wurde bei der Untertunnelung des Landwehrkanals⁶⁾ erwiesen, bei der fünf Heberrohre von 1,5 m Durchm. durch zwei Wasserringpumpen mit Motoren von je 1 PS selbsttätig luftfrei gehalten wurden, so daß keine einzige Unterbrechung bei den Hebern auftrat.

Die aus geodätischer und Reibungshöhe bestehende Gesamtförderhöhe wird, wenn die Heberwirkung in der Druckleitung gewährleistet ist, durch Druckmesser dicht oberhalb des Druckschiebers und Unterdruckmesser am Saugflansch der Pumpe ermittelt, wobei noch der Höhenunterschied beider Meßgeräte zu berücksichtigen ist. Fehlt die Heberwirkung, so muß man von der durch die Druckmesser ermittelten Förderhöhe den Höhenunterschied zwischen der Rohrleitungsmitte im höchsten Punkt und dem Oberwasserspiegel abziehen. Falls zur Regelung der Wassermenge der Druckschieber teilweise geschlossen werden muß, so geht die hierdurch entstehende Vergrößerung der Förderhöhe der Pumpe nicht als Förderhöhe der Wasserhaltungsanlage in die Rechnung ein, sondern erscheint als Druckverlust, der den Wirkungsgrad der Anlage herabsetzt.

Die geförderte Wassermenge ist durch geeignete Meßeinrichtungen⁷⁾ zu ermitteln, die genau nach Vorschrift einzubauen sind. Bei ihrer Auswahl ist auf die Eigenart des jeweils zu pumpenden Wassers Rücksicht zu nehmen.

Die Förderhöhe der Wasserhaltungsanlage ist kein gleichbleibender Wert; sie steigt zu Anfang mit der Spiegelsenkung, fällt am Ende mit dem Wiederansteigen des Wassers und ändert sich außerdem je nach der Beschaffenheit der Rohrleitung mit der jeweils geförderten Wassermenge. Auch die Förderhöhe der Pumpe ändert sich mit der Wassermenge, aber entgegengesetzt der Förderhöhenänderung der Leitung. Es besteht deshalb wenig Aussicht, daß die Betriebspunkte der Förderanlage ohne weiteres im guten Wirkungsgradbereich liegen. Förderhöhe

³⁾ Die von Arp und Dettmers²⁾ für die mittlere Saughöhe von 7,38 m beschriebene Verschlechterung des Pumpenwirkungsgrades auf 63% gegenüber 81% auf dem Prüfstand der Fabrik muß zum Teil auf Hohlraumbildung zurückgeführt werden, da sie der hohe Gehalt des Wassers an gelöstem Gas oder Luft begünstigte.

⁴⁾ Z. d. VdI 1936, Heft 9, S. 256.

⁵⁾ Sie werden auch als selbstansaugende Kreiselpumpen bezeichnet.

⁶⁾ Z. d. VdI 1935, Heft 13, S. 410/11, und Ztrbl. d. Bauv. 1940, Heft 4/5, S. 67 bis 68.

⁷⁾ Erwünscht wären Veröffentlichungen über die auf Baustellen mit Wassermesseinrichtungen gemachten Erfahrungen.

und Fördermenge der Pumpe müssen vielmehr durch Regelvorgänge auf die von der Baustelle verlangten Werte eingestellt werden.

Im Wasserhaltungsbetrieb ergeben sich vier Fälle:

1. Die Wasserhaltung arbeitet gerade mit der Fördermenge und Förderhöhe, für die die Pumpe vorgesehen ist. Dieser Fall tritt fast nie ein, da er bei dem veränderlichen Wasserandrang nur durch einen Zufall erreicht werden kann (Abb. 3, Punkt A).
2. Die Förderhöhe, mit der die Wasserhaltung gerade läuft, ist geringer als die vorgesehene Förderhöhe der Pumpe, aber der Wasserandrang zur Baugrube so groß, daß die Pumpe sich auf die nach der $Q-H$ -Linie der geringeren Förderhöhe entsprechende größere Wassermenge bei verschlechtertem Wirkungsgrad einstellen kann (Abb. 3, Punkt B). Er tritt bei einer für den Endzustand der Absenkung bemessenen Pumpe während der Zeit vor dem Erreichen des Beharrungszustandes auf.

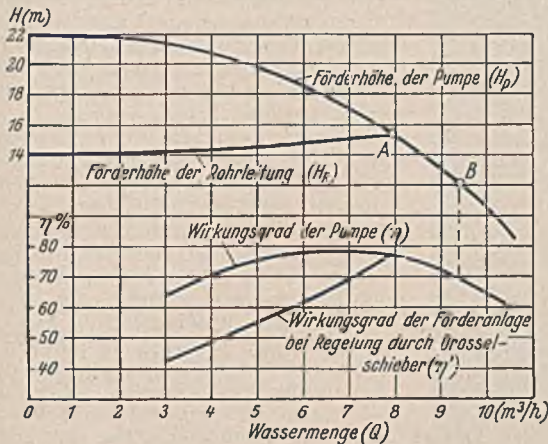


Abb. 3. Kennlinien von Pumpe und Rohrleitung.

Bei Untergrundbahnbauten, bei denen der Bodenaushub lange Zeit in Anspruch nimmt, und deshalb der Grundwasserspiegel nur langsam abgesenkt wird, ist der Einfluß der Betriebszeit bis zum Erreichen der tiefsten Spiegelsenkung bisweilen beträchtlich, so daß es zweckmäßig ist, besondere Maßnahmen zur Erzielung eines guten Wirkungsgrades während dieser Zeit zu treffen.

Auch nach Erreichen der endgültigen Absenkungstiefe laufen öfter mit Drehstrom-Asynchron-Motoren gekuppelte Kreiselpumpen mit ungünstigem Wirkungsgrad, weil sie mit Rücksicht auf allgemeine Verwendbarkeit für größere Förderhöhen bemessen wurden. Es handelt sich um gewöhnliche Pumpen, meist bis 100 mm Anschlußweite, und vor allem um Unterwasserpumpen, da diese üblicherweise für fast alle erfahrungsgemäß auftretenden Absenkungstiefen ausgelegt werden und deshalb Förderhöhen von 20 bis 30 m haben.

3. Die von der Baustelle verlangte Förderhöhe ist kleiner als die Förderhöhe der Pumpe, aber der Wasserandrang zur Baugrube gering, so daß sich die Pumpe nicht wie im Fall 2 auf die der Förderhöhe entsprechende größere Wassermenge einstellen kann. Vielmehr ist eine Regelung zur Verringerung der Pumpenförderhöhe erforderlich. Dieser Fall kommt sehr oft vor, weil entweder vorsichtshalber der Wasserandrang zur Baugrube zu hoch geschätzt wurde, oder weil die Wasserlieferung der Absenkungsbrunnen infolge ungünstigen Untergrundes kleiner ist als angenommen, oder weil infolge Trockenheit oder Abspumpens des Grundwasserbeckens der Wasserzufluß zurückgeht.

4. Der Wasserandrang zur Baugrube ist größer als vorgesehen war. In diesem Falle muß die Förderleistung der Pumpe vergrößert oder eine weitere Pumpe in Betrieb genommen werden. Dabei wird die Fördermöglichkeit meist so gesteigert, daß die gleichen Verhältnisse, wie unter 2 und 3 behandelt, herbeigeführt werden.

Mit Ausnahme des ganz seltenen Falles 1 ist eine Regelung der Kreiselpumpe, die Verluste nach Möglichkeit vermeidet, für den Betriebswirkungsgrad von ausschlaggebender Bedeutung und läßt erst den Wert einer Pumpe mit günstiger Kennlinie in Erscheinung treten. Wie hoch die Verluste bei einer unzureichenden Regelungsart werden können und wie stark dadurch der Wirkungsgrad der Förderanlage herabgesetzt wird, zeigt Abb. 3 für die Regelung durch Drosselung. Für die erwartete Wassermenge von 7950 l/min (Abb. 3, Punkt A) ist der Wirkungsgrad der Pumpe auch der Wirkungsgrad der Förderanlage. Bei einer Fördermenge von $\frac{3}{4}$ des ersten Wertes, also 5960 l/min, muß der auf 18,6 m gestiegene Pumpendruck auf den zugehörigen Wert der Rohrleitungskennlinie (14,8 m) gedrosselt werden, so daß der Wirkungsgrad der Förderanlage nur $14,8/18,6$ von $78\% = 62\%$ beträgt, während dabei der Pumpenwirkungsgrad 78% ist.

Zur Hebung des Wirkungsgrades der Wasserförderung wurde bereits im Aufsatz von Arp und Dettmers²⁾ die Forderung erhoben, den

Unternehmer mit den Stromkosten ganz oder teilweise zu belasten. Dieser Forderung wird heute in beschränktem Umfang entsprochen. Darüber hinaus müssen bei Ausschreibung von größeren³⁾ Wasserhaltungsarbeiten Einrichtungen zum Messen der Wassermengen, des Stromverbrauchs und der Förderhöhe und tägliche oder wöchentliche Meldungen verlangt werden. Die Leistung des Unternehmers ist auf Grund der Nutzarbeit oder einfacher nach den geförderten Wassermengen⁴⁾ allein zu vergüten, wobei größere Förderhöhenunterschiede während der Bauzeit durch nach dem Stand des Wasserspiegels in der Baugrube gestaffelte Einheitspreise berücksichtigt werden können. Dagegen ist die vielfach gewählte Verrechnung nach Pumpstunden nicht geeignet, eine Stromersparnis herbeizuführen, weil der Verdienst des Unternehmers bei der geringsten Wasserförderung der Pumpe und damit beim schlechtesten Wirkungsgrad am höchsten ist. Ebenso liegen die Verhältnisse, wenn bei kostenloser Stromlieferung durch den Bauherrn dem Unternehmer das Betreiben der Anlage mit einem bestimmten Betrag für die verbrauchte Kilowattstunde vergütet wird. Darin liegt für den Unternehmer ein Anreiz, recht viel elektrischen Strom zu beziehen.

Die Darstellung der Förderarbeit in Nutz-Kilowattstunden hat außerdem den Vorteil, daß sich damit eine Vorstellung über die Höhe des Strom- oder Brennstoffverbrauchs verbindet. Man kann davon ausgehen, daß der mittlere Gesamtwirkungsgrad der Wasserhaltungsanlage einschließlich des Elektromotors 50% beträgt. Dem entspricht ein Betriebswirkungsgrad der Pumpe einschließlich der Regelungsverluste von etwa 57% , wenn der Motor einen Wirkungsgrad von 88% hat. Ist aber der Motorwirkungsgrad geringer, was bei Drehstrommotoren mit veränderlicher Drehzahl vorkommt, so muß die Pumpe mit besserem Wirkungsgrad betrieben werden, damit das Gesamtergebnis von 50% erhalten bleibt. Inwieweit es möglich ist, diesen Betriebswert über die ganze Bauzeit gerechnet, zu verbessern, muß die Erfahrung zeigen.

Bei Antrieb der Pumpe durch einen Verbrennungsmotor kann man in ähnlicher Weise den Brennstoffverbrauch ermitteln. Aus der Nutzarbeit findet man mit dem genannten mittleren Pumpenwirkungsgrad von 57% die vom Motor auf die Pumpenwelle zu übertragende Arbeit in Kilowattstunden. Man hat nun noch den Brennstoffverbrauch für jede vom Motor abgegebene Kilowattstunde einzusetzen, der allerdings mit Rücksicht auf den mit der Belastung sich ändernden Wirkungsgrad des Motors nicht so sicher angegeben werden kann. Die Zahlentafel 3

Zahlentafel 3.

Brennstoffverbrauch eines Dieselmotors für die abgegebene Kilowattstunde in Abhängigkeit von der Belastung.

Belastung in %	25	50	75	100
Brennstoffverbrauch in g/kWh	430	350	300	285

gibt einen Überblick auf Grund von Prüfstandsmessungen einer Motorenfabrik. Diese Werte sind für den Baubetrieb zu günstig. Unter Berücksichtigung der im Betrieb unvermeidlichen Abnutzung kann man den mittleren Brennstoffverbrauch eines Dieselmotors bei Zugrundelegung einer Belastung von 50 bis 60% zu 400 g/kWh ansetzen. Die angegebene Arbeit ist dabei an der Motorwelle gemessen. Man kann den Brennstoffverbrauch auch auf die Nutzarbeit der Pumpe beziehen und findet ihn unter Benutzung des mehrfach genannten mittleren Betriebswirkungsgrades von 57% zu 700 g/kWh.

Werden z. B. $12\ 000$ m³ Wasser auf $9,2$ m Höhe gefördert, so ist die Nutzarbeit 300 kWh, für die bei elektrischem Antrieb 600 kWh aus dem Netz bezogen werden müssen. Wird die Pumpe durch einen Dieselmotor angetrieben, so errechnet sich der Brennstoffverbrauch überschlägig zu 210 kg. In entsprechender Weise kann man den Benzinverbrauch oder den Kohlen- oder Holzverbrauch eines Motors mit Gasgenerator bestimmen.

Auf Grund obengenannter Verbrauchszahlen ergibt sich bei einem Gasölpreis von $0,32$ RM je kg frei Baustelle, daß die Aufwendungen für Betriebsstoff und Schmieröl beim Dieselmotor den Stromkosten des Drehstrommotors gleich werden, wenn 1 kWh an den Motorklemmen sich auf $0,13$ RM stellt.

Um eine Vergeudung von elektrischem Strom oder von Brennstoff bei größeren Wasserhaltungen zu vermeiden, müssen die Wasserhaltungspumpen für die jeweiligen Förderverhältnisse der Baustelle ausgewählt und den während der Betriebszeit auftretenden Veränderungen von Förderhöhe und Fördermenge angepaßt werden; der Verbrauch der Pumpenmotoren je Kilowattstunde Nutzarbeit ist im Betrieb ständig zu überwachen. Steigt er über das als zulässig erkannte Maß, so sind Ersatzpumpen und Motoren in Betrieb zu nehmen und die beanstandeten Maschinen herzurichten.

³⁾ Etwa beginnend mit einer Stundenleistung von 200 m³ bei einer Betriebszeit von zwei Monaten.

⁴⁾ Diese Art der Abrechnung wird bereits angewandt.

Alle Rechte vorbehalten.

Professor Dr.-Ing. Gaber 60 Jahre.

Am 12. April d. J. vollendete Dr.-Ing. Ernst Gaber, ordentlicher Professor für Brückenbau, Baustatik und wissenschaftliche Betriebsführung und Vorstand der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen (Prüfraum Gaber) an der Technischen Hochschule in Karlsruhe, sein 60. Lebensjahr. Geboren und aufgewachsen in Mannheim, studierte Gaber an der Technischen Hochschule in Karlsruhe. Er war Schüler von Engesser und im Jahre 1902/03 bei ihm Assistent. Im Jahre 1903 wurde er Ingenieurpraktikant im Dienst der badischen Eisenbahnverwaltung und im Jahre 1908 Regierungsbaumeister. Entwurf und Bauleitung zweier Massivbrücken im Murgtal regten ihn zu seiner Doktorarbeit über Massivbrücken an. Weiterhin war er beim Bau des Tunnels am Königsstuhl in Heidelberg beschäftigt.

Den Weltkrieg lernte er als Pionieroffizier an verschiedenen Fronten kennen. Von den vielen Kriegsbrücken, deren Bau er leitete, sei die Maasbrücke der Kriegsbahn Aachen—Tongern besonders hervorgehoben. Er erhielt das Eiserner Kreuz 2. Klasse und das Ritterkreuz 2. Klasse mit Schwertern vom Zähringer Löwen. Im Jahre 1920 sehen wir ihn als Oberbauinspektor und Baurat im badischen Staatsdienst.

Am 1. April 1921, also vor 20 Jahren, wurde Gaber als Nachfolger Engeßers als ordentlicher Professor an die Technische Hochschule Karlsruhe berufen. In Verbindung mit dem Lehrstuhl richtete er einen baustatischen Versuchsraum ein, der sich dann zu der heutigen Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen (Prüfraum Gaber) entwickelte. Seine vielseitigen Aufgaben als Lehrer, Wissenschaftler und Forscher löste Gaber meisterhaft. Aus der Lehrtätigkeit entstanden eine große Zahl von Handschriften für den Unterricht in Baustatik, Massivbau und Stahlbau. Darüber hinaus verfaßte er zahlreiche Abhandlungen in der Bautechnik, im Stahlbau, im Bauingenieur, in der VDI-Zeitschrift, in den Schriften des Ausschusses für Holzfragen, in der Zeitschrift Holz als Roh- und Werkstoff, im Deutschen Zimmermeister, im Deutschen Steinbildhauer, in anderen Fachzeitschriften und in den Mitteilungsheften der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen. Er beteiligte sich oft an großen Brückenbauwettbewerben mit dem Erfolge, daß von seinen Entwürfen viele angekauft und mit Preisen ausgezeichnet wurden, u. a. sein Entwurf für die Mälarseebrücke und für die Dreirosenbrücke über den Rhein in Basel. Von seiner Beteiligung an großen Ideenwettbewerben seien hervorgehoben die Rheinbrückenentwürfe Maxau, Speyer und Mannheim. Daneben ist er in zahlreichen Fällen und auch bei den schwierigsten Fragen als Gutachter zu Rate gezogen worden. Er ist korrespondierendes Mitglied der Hermann-Göring-Akademie der deutschen Forstwissenschaft und gehört vielen technischen Fachausschüssen als Mitglied an.

Seine besondere Liebe zur Natur brachte den wertvollen natürlichen heimischen Rohstoffen neue Beachtung. Seit 40 Jahren arbeitet er als einer der ersten an der Schaffung eines hochwertigen Holzbaues aus

Brettern und Nägeln. Die Krönung seines Schaffens im Holzbau erfährt er heute dadurch, daß zahlreiche Kriegs- und Behelfsbrücken nach seinen Vorschlägen gebaut werden. So schuf er die bisher größte derartige Brücke¹⁾ über einen unserer großen Ströme. Außerdem sind eine Reihe von Holzbrücken aus Vollwandträgern als Trägerrostbrücken und von hölzernen Fachwerkbrücken für den Straßenverkehr der Brückenklasse I und für die schwersten Kriegsfahrzeuge entstanden. Gaber entwickelte auch die ersten Eisenbahnbrücken aus Brettern, Bohlen und Nägeln. In seiner Versuchsanstalt werden nicht nur der Werkstoff, sondern vielmehr die einzelnen Bauteile und ganze Bauglieder, auch Brücken in beliebiger Größe geprüft, wodurch er die sichere Grundlage für die Ausführung großer Bauwerke erhält. Die vielen Ausbildungslehrgänge für Pionieroffiziere unter seiner Leitung führen heute zur Verwirklichung seiner Gedanken bei unzähligen Brückenbauten in den besetzten Gebieten.

Der Prüfraum Gaber hat nach Gabers Anregung geschaffene Prüfanlagen, die es erstmalig gestattet haben, Versuche in natürlicher Größe durchzuführen. So wurden im Auftrage des Deutschen Stahlbau-Verbandes Großversuche über das Verhalten von Nietverbindungen auf Schwellen an Fachwerktraversestäben und an ganzen Eisenbahnbrücken veranstaltet. Bei der dynamischen Prüfung hat Gaber den Weg der kleinen Lastwechselzahl in der Minute beschritten, um so eine volle Wirkung der Schwellenlasten zu erreichen. Der Prüfraum, der in den letzten Jahren sehr vergrößert worden ist, hat statische und dynamische Prüfanlagen von 5 bis 5000 t Belastung.

Auch auf dem Gebiet der Steine, vor allem der Natursteine, hat Gaber Bleibendes geleistet. Der Prüfung von Schotter in der Karlsruher Trommelmühle, der Prüfung von Pflastersteinen auf Abnutzung in einer besonders gestalteten Schleifstoß- und Schleifdrehmaschine liegen seine eigenen Pläne zugrunde. Zum ersten Male wurde für eine große Reichsautobahnbrücke Mauerwerk aus Mauerklinkern auf Schwellen geprüft. In jüngster Zeit entstand im Prüfraum nach von ihm entwickelten Gedanken eine große Gefrieranlage für Frostversuche an Natur- und Kunststeinen. Bei der Schaffung dieser Anlage ging Gaber wiederum nicht von der Prüfung der einzelnen Steine aus, sondern von der Prüfung von Mauerwerkskörpern und Dachaufbauten. Die Ergebnisse, die dort dabei bereits erzielt worden sind, sind bahnbrechend für die Frostprüfung.

Seine schöpferische Gestaltungskraft hat es Professor Gaber ermöglicht, in seinem Berufe auf dem Gebiete des Holz-, Stein- und Stahlbaues bedeutendes zu leisten. Wir wünschen ihm, daß seine Arbeit weitere Früchte tragen möge und daß er noch viele Jahre in geistiger und körperlicher Frische mitarbeiten kann am Aufbau des Großdeutschen Reiches.

Geiger.

¹⁾ Eine eingehende Abhandlung aus seiner Feder wird in Kürze in der Bautechnik erscheinen.



Vermischtes.

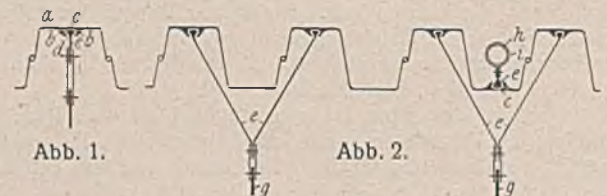
75 Jahre Elbstrombauverwaltung. Am 1. April d. J. bestand die Elbstrombauverwaltung in Magdeburg 75 Jahre. Sie hat vom Jahre 1866 an die preußische Elbstrecke betreut, seit 1921 auch die Saale, Unstrut und Ilmenau. Im Jahre 1922 übernahm sie den Bau des Mittellandkanals von Peine bis Burg, die Kanallisierung der Saale und den Bau des Elster-Saale-Kanals. Bis zum Jahre 1900 wurde die Mittelwasserregelung der Elbe durchgeführt mit dem Ergebnis, daß die Größe der Fahrzeuge von ursprünglich etwa 250 t auf durchschnittlich 700 t anstieg.

Seit etwa 1912 wurde der Plan des Niedrigwasserausbaues der Elbe erwogen, aber erst durch den Entwurf von 1931 in feste Formen gebracht. Die Niedrigwasserregelung wird jetzt ausgeführt, ihr Ziel ist, durch Einschränkung des Niederwasserbettes, durch zweckmäßigere Gestaltung der Streichlinien und durch Zuschußwasser zu erreichen, daß auf der Elbe auch in Trockenzeiten ein 700-t-Schiff jederzeit mit mindestens $\frac{3}{4}$ Ladung ahren kann.

Patentschau.

Spundwandverankerung. (Kl. 84c, Nr. 661968 vom 17. 6. 1932; Kurt Becker in Bremen.) Um zu erreichen, daß der Angriff der Anker sich auf eine gewisse Länge der Spundbohlen verteilt und um schädliche Nebenspannungen zu vermeiden, sowie um die Anker leicht anschließen zu können, sind die stabförmigen Ankeranschlüsse im Querschnitt T-förmig gestaltet und ihre Flansche in bekannter Weise als Wulste ausgebildet, die um eine senkrechte Achse drehbar in die entsprechend ausgebildeten rinnenförmigen Klauen eingreifen, wobei ihre Stege aus dem offenen Schlitz der rinnenförmigen Klauen herausragen. Die Spundwand gemäß Abb. 1 besteht aus Rinneneisen; an der Innenseite der Rücken *a* dieser Eisen sind zwei Nasen *b* angewalzt, die die Nut *c*

bilden und den Wulst *d* des Ankeranschlusses *e* klauenartig und kraftschlüssig umfassen. Abb. 2 zeigt eine wellenförmige Spundwand, bei der die Anschlüsse *e* geneigt zur Wandflucht stehen und je zwei



dieser Eisen zusammengeführt und gemeinsam durch einen Anker *g* gehalten sind. In der letzten wasserseitigen Welle ist ein Rohr *h* mittels Schelle *i* und Wulsteisen *e* in der Nut *c* befestigt.

Berichtigung.

Versiehtlich ist in Heft 17/18, S. 185, unter dem Bilde des Führers nicht angegeben worden, daß es eine Aufnahme von Heinr. Hoffmann, Berlin, Reichsbildberichterstatler der NSDAP., ist.

INHALT: Die Quellfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung. — Der Betriebswirkungsgrad von Wasserhaltungspumpen auf Baustellen. — Professor Dr.-Ing. Gaber 60 Jahre. — Vermischtes: 75 Jahre Elbstrombauverwaltung. — Patentschau. — Berichtigung.

Verantwortlich für den Inhalt: Dr.-Ing. Erich Lohmeyer, Oberbaudirektor a. D., Berlin-Steglitz, Am Stadtpark 2. — Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin W 9. — Druck: Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.