

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 78 (1960)
Heft: 19

Artikel: Bentonit im Grundbau: Vortrag
Autor: Schnitter, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-64885>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 21.12.2024

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

Bentonit im Grundbau

DK 624.151:553.611.6

Vortrag, gehalten im Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein am 24. Februar 1960 von Prof. G. Schnitter, ETH, Zürich

Einleitung

Die Foundationstechnik hat in den letzten Jahren von verschiedenen Seiten Impulse erhalten, die zur Folge hatten, dass bewährte Methoden ausgebaut und vervollständigt, und dass neue Methoden entwickelt und angewandt wurden. Die junge Wissenschaft der Bodenmechanik führte zu einer vertieften Erkenntnis des physikalischen und mechanischen Verhaltens des Baugrundes und des in ihm vorhandenen Wassers unter ruhender und dynamischer Belastung. Neue Bauaufgaben in fast sämtlichen Zweigen des Tiefbaues (Gründung von Hochhäusern, von Brückenpfeilern auf tiefliegende Bodenschichten, Untertunnelungen in wasserführenden Lockergesteinen, Untergrund- und Tiefbahnen, grosse, tief in das Grundwasser reichende Baugruben, hohe Staudämme usw.) zwangen den Konstrukteur zu neuen Lösungen und den Unternehmer mit dem Baumaschinenhersteller zur Entwicklung neuer Geräte. Neue Baustoffe wie der Spannbeton dehnten ihren Anwendungsbereich auch auf die eigentlichen Gründungen aus. Aber auch neue Bauhilfsstoffe kamen zur Verwendung. Unter ihnen hat sich der Bentonit in verschiedener Hinsicht einen bemerkenswerten Platz erobert. Er wurde sowohl im Ausland wie bei uns mehrfach verwendet. Ueber zwei besonders hervorzuhebende Anwendungsgebiete des Bentonites, das *Gleitschachtverfahren* und die *Erstellung unverrohrter Bohrpfähle und Betondiaphragmen*, werden heute abend zwei kompetente Referenten sprechen¹⁾. Ich möchte ausserdem auf die verschiedenen Möglichkeiten der Verwendung von Bentonit zu Abdichtungszwecken im Wasserbau, zur Herstellung von Dichtungsdiaaphragmen in Staudämmen und als Injektionsgut hinweisen. Die speziellen Eigenschaften des Bentonites gestatten es, durch seine Beimengung zu einer Tonsuspension deren Injizierbarkeit zu erhöhen, d. h. ihr zu ermöglichen, in feinere, undurchlässigere Böden einzudringen und deren Abdichtung zu verbessern. Eine ähnliche und noch verstärkte Wirkung hat ein Bentonit-Wassergemisch. Ganz allgemein verbessert der Bentonit durch seine Schmierwirkung das Fliessvermögen des Injektionsgutes und durch seine Quellfähigkeit und Thixotropie die Abdichtung des Baugrundes.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH hat im Zusammenhang mit dem Studium des Dichtungskernes des Erddammes auf der Göschenenalp mehrere Jahre dauernde Versuche über das Verhalten von Bentonit in bautechnischer Hinsicht durchgeführt. (Die Versuche standen unter der Leitung von J. Zeller, dipl. Ing.) Wenn schliesslich doch kein Bentonit, sondern Opalinuston als dichtender Zusatz zum Alluvionmaterial aus der Ebene der Göschenenalp für die Herstellung des Dichtungskernes verwendet wurde, so geschah dies im wesentlichen nicht aus technischen Gründen. Nur des Interesses wegen sei bemerkt, dass es ungefähr die vierfache Menge von Opalinuston aus Holderbank braucht gegenüber der einfachen Menge Bentonit, um mit dem vorhandenen Ausgangsmaterial gleichwertige Dichtungskerne zu erzielen (dabei handelt es sich um einen Natrium-Bentonit mittlerer Quellfähigkeit).

Allgemeines über den Bentonit

Der Bentonit gehört zur Gruppe der Tonminerale. Diese sind nach Prof. Dr. H. Deuel sekundäre, OH-haltige Silikate mit kristalliner Schichtgitterstruktur und gewöhn-

¹⁾ In der SBZ siehe Dr. J. Käller, 1958, H. 11, S. 151, und J. Jakob 1959, H. 10, S. 135, die ebenfalls Bauerfahrungen behandelten.

lich kolloider Grösse, d. h. mit Äquivalentdurchmessern vorwiegend kleiner als 2μ . Die Tone besitzen Kationenaustauschereigenschaften, d. h. sie vermögen Kationen wie Na^+ elektrostatisch festzuhalten und gegen andere Kationen wie K^+ und Ca^{2+} auszutauschen. Dieses Kationenaustauschvermögen beruht auf der negativen Ladung der Tonteilchen. Diese wird durch Kationen kompensiert, die ausserhalb des Kristallgerüsts rein elektrostatisch festgehalten werden und daher leicht austauschbar sind. Der Austausch von Kationen kann eine wesentliche Aenderung der Wasseraufnahme und Quellfähigkeit der Tone und damit ihrer dichtenden Wirkung zur Folge haben. Die Zusammensetzung des Bodens oder des Wassers im Boden kann diesen Austausch bewirken, worauf in der Baupraxis zu achten ist. So haben z. B. Untersuchungen des Göschenenalsandes ergeben, dass bei Verwendung des hochquellfähigen Na-Bentonites im Laufe der Jahre mit einer weitgehenden Umwandlung in den weniger quellenden Ca-Bentonit gerechnet werden müsste, obschon dieser Umwandlungsprozess sehr lange dauern kann. Dabei ist festzustellen, dass eine teilweise Umwandlung schon infolge Berührung mit dem Sande, d. h. schon während des Mischens des Kernmaterials stattfindet.

Im Bentonit herrscht Montmorillonit vor (benannt nach dem grossen Vorkommen bei Montmorillon in Südfrankreich). Der Name Bentonit stammt vom amerikanischen Geologen W. C. Knight, der um das Jahr 1880 im Gebiet des Bock-Creek-District in Wyoming USA nahe Fort Benton ein Bentonitvorkommen entdeckte. Ganz allgemein besteht Bentonit grösstenteils aus zersetzter Vulkanasche und Tuffen. Seine Farbe ist weiss, grünlich, gelblich bis rötlich, je nach Herkunft. Er wird im Tagbau gewonnen als weicher Fels, ähnlich anzusehen wie Kaolin, aufbereitet und zu dem im Handel erhältlichen Pulver verschiedenster Mahlfeinheit zermahlen. Zur Zeit werden in vielen Ländern Bentonitvorkommen ausgebeutet: USA, Canada, Italien (Insel Ponza, Apulien, Foggia, Valdol), Deutschland, Oesterreich, Frankreich, Jugoslawien, Ungarn, Griechenland, Nord-Afrika usw. Unser Land besitzt keine nennenswerten Vorkommen. Der in den europäischen Gebieten abgebaute Ca-Bentonit geringerer Quellfähigkeit wird oft durch chemische Behandlung (z. B. mit Kochsalz) in den quellfähigeren Na-Bentonit umgewandelt, aktiviert. Die Tatsache, dass im Handel unter der selben Bezeichnung «Bentonit» Produkte stark verschiedener Qualität, insbesondere verschiedener Quellfähigkeit erhältlich sind, kann sehr leicht zu fehlerhaften Anwendungen führen, wenn der Käufer sich nicht sehr umsichtig nach den ihn interessierenden Eigenschaften erkundigt, bzw. sie unter Gewährleistungspflicht des Verkäufers in seiner Bestellung ausdrücklich verlangt. Die materialtechnische Ursache liegt darin, dass es einen lückenlosen Uebergang von den verschiedenen Bentoniten zu den Tonen gibt.

Der Bentonit findet dank seinen speziellen Eigenschaften wie Quellfähigkeit, Wasseraufnahmefähigkeit, plastische Verformbarkeit, Thixotropie Verwendung in der keramischen Industrie, Giesserei, Reinigung und Klärung von Wasser, Herstellung von Plastik-Stoffen, Kautschuk-Industrie, Papierfabrikation, Seifenherstellung usw.

Einige geotechnische Eigenschaften

Das spezifische Gewicht ist nicht einfach zu bestimmen. Dementsprechend schwanken die Angaben in der Literatur sehr stark (es ist hier übrigens einzuflechten, dass über Bentonit eine umfangreiche Literatur besteht, z. B. La Bentonite

par M. Déribéré et A. Esme, Dunod, Paris 1951). Unsere eigenen Messungen ergaben Werte von 2,50 bis 2,95 t/m³ je nach Herkunft. Ähnliches gilt für das *Trockenraumgewicht*, d. h. in diesem Fall das Schüttgewicht kleiner Mengen von bei 105° C getrocknetem und pulverisiertem Material (zur Berechnung des Transportvolumens wichtig). Wir fanden dafür 0,83 bis 1,13 t/m³. Bentonit ist somit sehr locker gelagert; das entsprechende Porenvolumen liegt zwischen 68 und 60 %. (In der Baupraxis muss bei der Abschätzung des Raumgewichtes die Einfüllart beachtet werden; beim Einfüllen in Säcken kann das Raumgewicht grösser, bei der Silofüllung durch Einblasen eher kleiner sein).

Die *Kornverteilung* (Bild 1) zeigt das starke Ueberwiegen der Anteile kleiner als 0,002 mm (2 μ). Diese Fraktion bezeichnen wir in der Bodenmechanik als Tonfraktion. Es ist bekannt, dass dieser Gehalt an Ton und kolloidalen Teilchen von ausschlaggebender Bedeutung für das Verhalten aller Lockergesteine ist. Entsprechend der Kleinheit der Teilchen ist die totale Oberfläche sehr gross. Es sind längliche, schuppen- bis stengelförmige Gebilde.

Der natürliche Anlieferungswassergehalt infolge der Luftfeuchtigkeit wurde zwischen 5 % und 20 % gemessen. Die an der Oberfläche liegenden Teilchen quellen durch Wasseraufnahme auf und bilden dadurch eine mehr oder weniger wasserundurchlässige Hülle, die den Wassernachschub nach dem Innern erschwert, woraus sich der relativ geringe natürliche Wassergehalt erklärt.

Neben der Kornverteilung bilden die *Konsistenzgrenzen nach Atterberg* die wichtigste Charakterisierung eines bindigen Lockergesteines. Dabei werden unterschieden die Fließgrenze und die Ausrollgrenze. Die erstgenannte stellt den Wassergehalt in Prozenten des Trockenraumgewichtes dar beim Uebergang eines Materials vom plastischen zum flüssigen Zustand, die zweite den Wassergehalt beim Uebergang vom unplastischen zum plastischen Zustand. Die Differenz zwischen Fließ- und Ausrollgrenze, die Plastizitätszahl, gibt ein Mass über das plastische Verhalten eines bindigen Bodens. Beim Bentonit werden auch im Handel zur Kennzeichnung des Produktes diese beiden Grenzen angegeben. Allerdings sind die Versuchsbedingungen, die zu den in den Prospekten angegebenen Werten führten, meist unbekannt, und leider beeinflussen diese gerade beim Bentonit die Resultate erheblich.

Natriumbentonite	Fließgrenze	330 ÷ 590 %
Calciumbentonite	Fließgrenze	90 ÷ 150 %
Tone (Schweiz)	Fließgrenze	35 ÷ 50 %
Bentonit	Ausrollgrenze von	25 ÷ 62 %

Eine der bemerkenswertesten und für die Baupraxis wichtigsten Eigenschaften des Bentonites ist sein Quellvermögen, d. h. seine Fähigkeit, in Wasser aufzuquellen und eine gelartige Masse zu bilden. Die Quellung macht ein Mehrfaches des Volumens der Festsubstanz aus. Sie beträgt

bei sehr guten Bentoniten	25 ÷ 30 mal	das Festsubstanz-Volumen
bei guten Bentoniten	10 ÷ 20 mal	
bei landesüblichen Bentoniten	12 ÷ 15 mal	
bei Ca-Bentoniten absinkend bis auf 3 mal		
vergleichsweise: Opalinuston von Holderbank: 1,5 mal		

Dabei ist die Aufquellung reversibel (abgesehen von Ausnahmen, bei welchen das Quellvermögen mit zunehmender Zahl von Quell- und Schwindprozessen abnimmt), d. h. der Bentonit schrumpft bei Wasserentzug (Trocknen) wieder zusammen, um bei erneuter Wasseraufnahme wieder zu quellen. Eine Auflast übt eine starke hemmende Wirkung aus auf das Quellvermögen (Bild 2).

Entsprechend der Quellfähigkeit variiert auch das *Wasseraufnahmevermögen*. Es lag bei unseren Versuchen beim 1- bis 5-fachen des Trockenraumgewichtes. Annähernd entspricht das Wasseraufnahmevermögen dem Wassergehalt bei der Fließgrenze (Bild 3). Darauf ist bei der Wahl des Bentonites zu achten; hohe Fließgrenze ergibt hohes Wasseraufnahmevermögen und starke Quellung, also Ausstopfen der Hohlräume im Boden und somit gute Abdichtung.

Auch die Temperatur hat ihren Einfluss. Es scheint, dass bei lang dauernder Einwirkung tiefer Temperaturen je nach der Bentonitart und evtl. auch bei Tonen mit einer Abnahme des Quellvermögens zu rechnen ist. Darauf muss bei der Silohaltung über den Winter Rücksicht genommen werden.

Die *Zusammendrückbarkeit*, ausgedrückt z. B. in der Zusammendrückungszahl Δe, das ist die prozentuale Zusammendrückung einer Materialprobe infolge Erhöhung der Vertikalspannung von σ = 1,0 kg/cm² auf σ = e = 2,718 kg/cm² bezogen auf die ursprüngliche Höhe, ist entsprechend ausserordentlich gross, je nach Bentonitart bis rund 60 %, entsprechend einer Setzung um mehr als der Hälfte (Vergleichswert: Opalinuston Δe = 6,3 %, bei Fließgrenze eingebaut).

Die *Durchlässigkeit* ist dank der Feinheit der Materialbestandteile ausserordentlich klein. Die normalen Messmethoden sind unbrauchbar. Der Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy dürfte kleiner als 10⁻¹⁰ cm/s sein (Vergleichswert: Opalinuston bei 1 kg/cm² Belastung k = 8 · 10⁻⁹ cm/s). Die *Scherfestigkeit* ist klein. Der Winkel der scheinbaren inneren Reibung ist zu 0,0 bis 2,0° anzunehmen. Die Kohäsion hängt stark vom Wassergehalt ab und erreicht Werte von 0,015 kg/cm² bei hohem und von 0,03 kg/cm² bei niederm Wassergehalt.

Neben dem Quellvermögen interessiert den Baupraktiker vor allem die mit der *Zähigkeit* der Bentonit-Wasser-Suspension verwandte Eigenschaft der *Thixotropie*: Damit wird die Erscheinung der mehr oder weniger schlagartigen Umwandlung einer Suspension beim Wechsel von Bewegung zur Ruhe aus dem flüssigen in einen gelartigen Aggregatzustand bezeichnet. Dieser Prozess ist reversibel. Wird ein Bentonit-Wasser-Gemisch von genügender Konzentration in Bewegung gesetzt, z. B. durch einen Mischer und eine In-

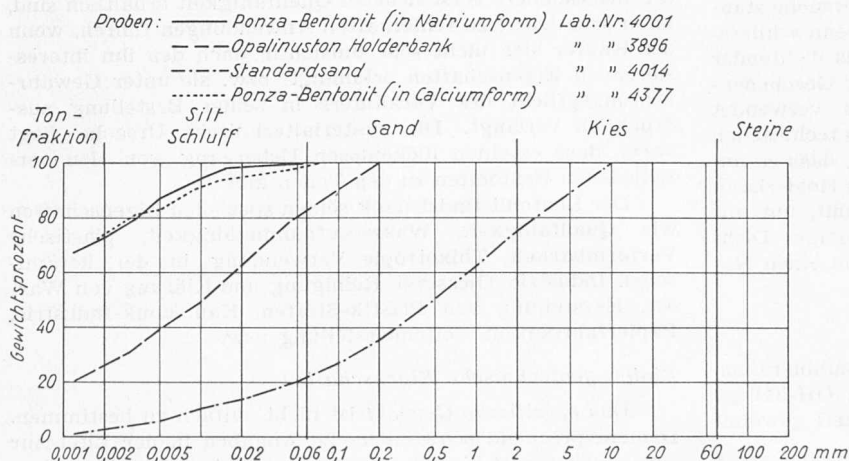


Bild 1. Kornverteilung in Summationskurven

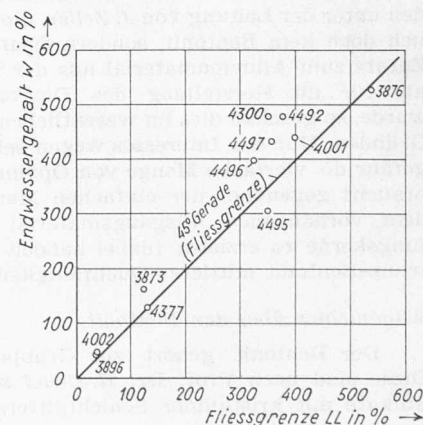


Bild 3. Endwassergehalt beim Quellversuch in Funktion der Fließgrenze

jektionspumpe, so bewegt sie sich wie eine Flüssigkeit. Ihre Zähigkeit ist um so geringer, je grösser die Geschwindigkeit ist, also nicht unabhängig von der Geschwindigkeit wie bei den sogenannten Newtonschen Flüssigkeiten. Hört die Bewegung auf, z. B. wenn das Injektionsgut durch die Reibung in den Bodenhohlräumen seine Bewegungsenergie aufgebraucht hat, so tritt die erwähnte Umwandlung in ein Gel ein. Würde das Gel erneut geschüttelt, so träte der umgekehrte Vorgang ein, das Gel würde sich verflüssigen. Bei den Injektionen von Bentonit- oder Tonsuspensionen wird durch Beigabe von Chemikalien verschiedenster Art dieser Gelifizierungsprozess irreversibel gestaltet.

Für thixotrope Flüssigkeiten gilt bei Bewegung nicht mehr das bekannte hydrostatische Gesetz, dass der Wasserdruck in einem Punkt in allen Richtungen gleich gross ist (eine skalare Grösse). Er ist vielmehr in Richtung der Bewegung grösser als senkrecht dazu.

Zum Schluss und im Zusammenhang mit der Thixotropie soll noch auf die erstaunlich hohe stützende Wirkung des Bentonit-Wasser-Gemisches in einer Bentonit-Bohrwand, in einem Bentonit-Bohrpfahl oder längs den Aussenwänden eines Senkbrunnens hingewiesen werden. Teils kann sie erklärt werden durch das leicht höhere spezifische Gewicht der Bentonitsuspension gegenüber dem Wasser, teils durch die Bildung eines Films und eine Durchdringung der obersten Erdschichten durch die Bentonitschlämme.

Verbesserung des Baugrundes

DK 061.3:624.131

Unter dem Vorsitz ihres Präsidenten PD Dr. A. von Moos hielt die Schweizerische Gesellschaft für Bodenmechanik und Fundationstechnik am 13. Nov. 1959 in Bern ihre Herbsttagung ab. Ausser den rund 330 Mitgliedern und Gästen waren auch Vertreter aus Dänemark, Deutschland, Finnland und Italien anwesend.

Ing. Ed. Recordon behandelte «Les sols stabilisables au ciment, en Suisse Romande». Dort sind die feinkörnigen Bodentypen CL/SM-CL stark vertreten. Etwa 50 % der untersuchten Böden sind frostgefährlich. Systematische Versuche nach USA-Kriterien zeigten, dass Beimengungen von 6÷12 % Portlandzement für die Stabilisierung erforderlich sind. Die grösste Druckfestigkeit wurde bei einem Wassergehalt = w_{opt} Proctor Standard erreicht. Der Referent gab einen Ueberblick über die verschiedenen Einbaumethoden

und die im Handel zur Verfügung stehenden Geräte. In jedem Fall ist eine vorgängige Untersuchung hinsichtlich Eignung der Bodenart unerlässlich. Diese soll insbesondere den wirtschaftlichen Zementzusatz und den günstigsten Wassergehalt ermitteln.

Dr. F. Balduzzi führte in seinem Vortrag «Bodenstabilisierung im Nationalstrassenbau» aus, dass der Zweck einer Bodenstabilisierung darin besteht, eine dauerhafte und witterungsunempfindliche Verbesserung der Bodeneigenschaften zu erzielen. Als einfachste Methode kann eine Verbesserung der Kornverteilung und entsprechend wirksame Verdichtung zum Ziele führen. Stabilisierung mit Bindemitteln organischer (Bitumen) oder anorganischer (Zement, Chemikalien) Herkunft bewirken die Erhöhung der Kohäsion und vermindern die Wasserempfindlichkeit. Balduzzi erachtet es für unsere Baugrundverhältnisse am zweckmässigsten, die stabilisierte Schicht direkt auf den Untergrund einzubauen. Ausländische Kriterien zur Beurteilung der Eignung der Materialien und Methoden zu deren Prüfung sollen kritisch überprüft werden.

Man sollte namentlich Methoden als Hilfsmittel für die Dimensionierung wie auch solche für die Kontrolle der Bauausführung ausarbeiten, die unseren besonderen Baugrund- und klimatischen Verhältnissen Rechnung tragen. Erfahrungen über Stabilisierung mit Fremdmaterial liegen vor. Diese Technik ermöglicht es, die vorhandenen Baugeräte einzusetzen, da das Aggregat bekannt ist und jeder Betonmischer und jedes Verdichtungsgerät verwendet werden können. Auf sehr wenig tragfähigem Untergrund wie Torf und Silt ist keine andere Lösung möglich. Kies und siltiger Kies können an Ort und Stelle mit Zement stabilisiert werden, was auch bereits ausgeführt worden ist. Untersuchungen sollen die Baugrundverhältnisse, die Entnahmestellen von Fremdmaterial und die materialtechnischen Eigenschaften des stabilisierten Bodens abklären. Es zeigt sich anhand neuerer Untersuchungen, dass für unsere Verhältnisse Kriterien einzuführen sind, welche die Baugrundverhältnisse stärker berücksichtigen.

Ing. J. Huder kommentierte in seinem Referat «Dimensionieren von Strassen mit stabilisierten Schichten» die gemachten Erfahrungen an zwei der vier bereits ausgeführten Bodenstabilisierungen an Flugpisten und Strassen. Es galt in all diesen Fällen ein Planum in sehr schlechtem Baugrund (Torf, Silt) zu schaffen, um den Einbau weiterer Tragschichten und des Belages überhaupt zu ermöglichen. Eine wirksame Verdichtung kann erst dann vorgenommen werden, wenn die untere Schicht genügend tragfähig ist. Deren Scherfestigkeit muss also so gross sein, dass sie keine Deformation beim Verdichten der nächstfolgenden erleidet. Die auftretenden Schubspannungen beim Verdichten sollen also kleiner sein als die Scherfestigkeit der schwächsten

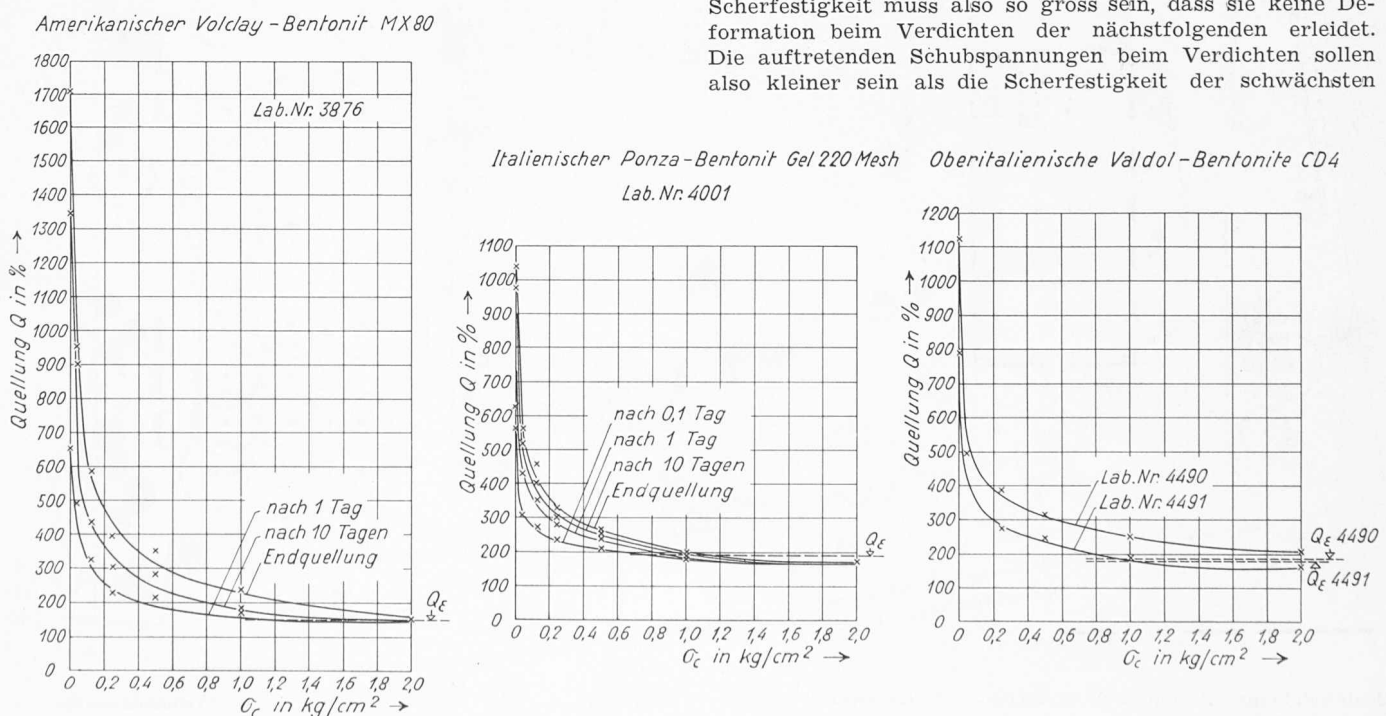


Bild 2. Quellung verschiedener Bentonite in Abhängigkeit von der Auflast