

**Die Scherfestigkeit dreier kohäsiver Böden  
in Abhängigkeit vom Lagerungszustand  
und von der Materialart**

ABHANDLUNG

ZUR ERLANGUNG DER WÜRDE EINES DOKTORS DER  
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN DER  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

VORGELEGT VON

**Herbert Einstein**

dipl. Bauingenieur ETH  
geboren am 31. Januar 1937  
von Zürich

Angenommen auf Antrag von  
Prof. G. Schnitter, Referent  
Prof. Dr. F. Balduzzi, Korreferent

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der vielseitigen Beeinflussung der Scherfestigkeit von Lockergesteinen. Alle am strukturellen Aufbau eines Lockergesteins beteiligten Grössen - feste, flüssige und gasförmige Teile, vorangegangene und augenblickliche Spannungseinwirkungen - tragen einen gewissen Anteil zur Festigkeit bei. Es wird deshalb versucht, die bisherigen - in ihrer Anwendung auf Böden - idealisierenden Spannungs-Verformungsgesetze (Hooke, Mohr-Coulomb) durch Beziehungen zwischen der Festigkeit und den am Materialaufbau beteiligten Grössen zu ersetzen. Dieses Ziel wird durch ein stufenweises Vorgehen erreicht:

Zuerst wird der Zusammenhang zwischen dem strukturellen Aufbau und dem von aussen sichtbaren Verhalten eines Lockergesteins gesucht. Die verschiedenen Eigenschaften der Festteile und ihr Einfluss auf das Wasser können an äusseren Veränderungen von Proben während des Schrumpfens beobachtet und analysiert werden. Vor allem ist es möglich, das Wasser entsprechend der geometrischen Anordnung und der Stärke seiner Bindungen zu unterteilen, was eine Klassifikation sowohl des Wassers je nach seinem Zustand als auch der Lockergesteine gemäss ihren charakteristischen Eigenschaften erlaubt. - Beim weiteren Vorgehen werden die Veränderungen der Struktur während einer Scherbeanspruchung bis zum Bruch mit dem Spannungsverlauf verglichen. Damit kann vorerst ein Ausdruck für die Scherfestigkeit eines gesättigten, bindigen Bodens in Abhängigkeit von Lagerungsdichte, Tonanteil und Aktivität (nach Skempton) gefunden werden. Ausserdem gestatten die in der ersten Stufe erworbenen Kenntnisse zusammen mit dem jetzt untersuchten Spannungs-Verformungsverhalten, die bisher nur dem Prinzip nach bekannte Wechselwirkung zwischen Spannungen und strukturellen Grössen auch im einzelnen festzuhalten: Einerseits werden die Spannungseinflüsse auf die Bestandteile des Lockergesteins nachgewiesen, wobei zu unterscheiden ist, ob es sich um augenblickliche oder abgelaufene (sog. geschichtliche) Spannungseinwirkungen handelt. Andererseits kann gezeigt werden, wie die - aus den genannten Bestandteilen aufgebaute - Struktur ihrerseits wiederum den Spannungsverlauf beeinflusst. - Für die Anwendung ist aber nicht der ganze Spannungsverlauf von Interesse, sondern hauptsächlich der Bereich der Bruch- oder Scherfestigkeit. Deshalb wird im letzten Abschnitt der Zusammenhang zwischen der Scherfestigkeit und den strukturellen Grössen gesucht. Das Ergebnis erlaubt eine - auch für andere Materialien gültige - Gliederung der Festigkeit in drei Anteile:

- Der erste Anteil umfasst die augenblicklich vorhandenen Spannungen, durch welche die Struktur aufgebaut wird.
- Die sich daraus ergebenden festigkeitsbildenden Eigenschaften der Struktur (Veränderung der Bestandteile und deren gegenseitige Beziehungen) werden als zweiter Anteil eingeführt (Zugfestigkeit).
- Der dritte Anteil drückt die entsprechenden Wirkungen abgelaufener (geschichtlicher) Spannungen auf die Struktur und damit auf die Festigkeit aus (Axialfestigkeit).

So ist es nun - wie angestrebt - möglich, die Festigkeit statt durch idealisierende Gesetze durch reale Beziehungen zum Material auszudrücken.

## S U M M A R Y

The present paper deals with the many and various factors which influence the shear-strength of a soil. The structure of a soil depends on its solid, liquid and gas components and on previous and present stresses. All of these factors contribute to its strength. An attempt is therefore made to establish relationships between these factors and the shear-strength and thus to replace the earlier stress-strain theories, (Hooke, Mohr-Coulomb) which are too ideal for application to soils. This is achieved by a stepwise procedure.

Firstly the relationship between the structure and the outward behaviour of a soil is sought. Shrinkage tests allow observation and analysis of the various characteristics of the solid particles and of their influence on the water. Differentiation of the water into various states according to the geometric arrangement and strength of coherence is possible and thus a classification of the water according to its state and of the soil according to its characteristic properties can be made.

Secondly, structural alterations during shear strain, for the entire range from rest to failure, are compared with the stress distribution. Thus an expression for the shear-strength of a saturated, cohesive soil in relation to its compactness, clay content and activity (Skempton) can be found. The results of the first step taken together with the stress-deformation behaviour give information on the relationship between stress and structural factors, which has previously only been known in principle. On the one hand the influence of stress on the constituents of the soil is shown, whereby a distinction must be made between present and previous (so called "historical") stresses. On the other hand it can be shown how the structure, made up of the constituents mentioned, influences the stress distribution. For practical application the range of failure or shear-strength is of more interest than the entire stress distribution. Therefore, finally, the relationship between the shear-strength and the structural factors is investigated. The results, which are also valid for other materials, show that the strength can be divided into three parts:

- The first part consists of the stresses which are momentarily present and by which the structure is being built up.
- The strength building characteristics of the structure resulting from these stresses (alteration of the components and their reciprocal relationships) comprises the second part (tensile strength).
- The third part expresses the corresponding effects of previous (historical) stresses on the structure and, thus, on the strength (axial strength).

Thus it is possible to achieve the original aim and to replace the earlier stress-strain theories by a true relationship between strength and material.

## RESUME

Cette thèse examine les diverses influences de la résistance au cisaillement des sols. La structure des sols dépend de la répartition des corps solides, liquides et gazeux et des contraintes précédentes (historiques) et momentanées. Toutes ces qualités structurelles prennent une part dans la résistance, leur ensemble détermine la résistance totale. Pour cette raison on cherche à remplacer les théories tension-déformation (Hooke, Mohr-Coulomb) trop idéalisées connues jusqu'à présent par des relations plus réelles entre la résistance et les qualités structurelles mentionnées. Ce but est atteint par un procédé graduel.

D'abord on cherche la relation entre la structure et le comportement externe d'un sol. Les différentes propriétés des éléments solides et leurs influences sur l'eau peuvent être examinées et analysées par les transformations externes (transformation de volume et de poids) d'un échantillon soumis à un procédé de retrait. Avant tout il est possible de caractériser l'eau du sol selon la disposition géométrique et selon la force liant l'eau aux éléments solides. Cela mène à une classification de l'eau suivant sa condition (disposition géométrique et force d'adsorption) et des sols suivant leurs qualités caractéristiques. -

En continuant le procédé on étudie les transformations structurelles pendant un effort de cisaillement menant de l'état initial jusqu'à la rupture. De ces recherches une formule est développée exprimant la résistance au cisaillement d'un sol saturé et cohérant en fonction de la compacité, du pourcentage d'argile et de l'activité (d'après Skempton). En outre les résultats obtenus auparavant dans la première et la deuxième phase permettent de développer en détail les effets réciproques entre les contraintes et les éléments structurels qui jusqu'à présent étaient seulement connus en principe. D'une part on démontre comment les éléments du sol sont influencés par les contraintes momentanées ou précédentes (historiques). D'autre part il est possible de montrer comment la structure formée des éléments mentionnés influence à son tour la distribution des contraintes. -

Le but de cette thèse n'est pas de considérer l'ensemble de la distribution des contraintes, l'intérêt se concentre sur le domaine de la rupture, c'est-à-dire de la résistance au cisaillement. Pour cette raison on cherche dans la dernière partie de la thèse la relation entre la résistance au cisaillement et les éléments structurels. Le résultat montre que la résistance dépend de trois facteurs :

- 1) Les contraintes momentanées par lesquelles la structure est formée.
- 2) La résistance induite par les contraintes momentanées (par suite d'une transformation des éléments structurels et de leurs relations réciproques) (résistance à la traction).
- 3) L'influence des contraintes précédentes (historiques) sur la structure, respectivement sur la résistance (résistance axiale).

Ainsi il est possible de réaliser l'intention originale. Les théories idéalisées sont remplacées par des relations plus réelles entre la résistance et les propriétés du matériau. - Ces résultats qui ont été développés pour des sols sont aussi valables pour d'autres matériaux.