



Doctoral Thesis

Das Verhalten eines gesättigten, bindigen Bodens unter plötzlich aufgebrachtter Last und unter Wechselbelastung

Author(s):

Halter, Hans

Publication Date:

1963

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000088474> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Prom. Nr. 3407

**Das Verhalten
eines gesättigten, bindigen Bodens
unter plötzlich aufgebrachtter Last
und unter Wechselbelastung**

Von der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von

HANS HALTER

dipl. Bau-Ing. ETH

von Marbach (Kt. St. Gallen)

Referent: Herr Prof. G. Schnitter

Korreferent: Herr Dr. F. Balduzzi

Juris-Verlag Zürich
1963

6. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit, die von Ende 1960 bis Anfang 1962 an der VAWE durchgeführt wurde, war es, den Einfluss der Wechselbelastung auf das Verhalten eines gesättigten, bindigen Bodens abzuklären. Dabei fügte sich diese Arbeit in die Reihe der Untersuchungen ein, die gegenwärtig an der VAWE laufen, um das Wesen der Bindungen zwischen den Teilchen von Baumaterialien zu ermitteln. Diese Kräfte bewirken die Kohäsion und die Trockenfestigkeit bei den Böden und geben den Bindemitteln ihre hohe Festigkeit.

Die Untersuchungen gliedern sich in 4 Teile:

- 1) Herstellung der Proben
- 2) Scherfestigkeit und Deformationseigenschaften
- 3) Verhalten unter plötzlich aufgebrachter Last
- 4) Dynamische Untersuchungen

1) Herstellung der Proben

Als Versuchsmaterial wurden Uetliberglehm und reines Calciumcarbonat gewählt. Uetliberglehm, ein toniger Silt, ist typisch für die bindigen Böden des schweizerischen Mittellandes, Calciumcarbonat ist ein wesentlicher Bestandteil der Seekreide.

Drei Forderungen wurden an die Proben gestellt:

- a) Homogenität
- b) Bekannte Belastungsvorgeschichte
- c) Vollständige Sättigung

Die Homogenität war notwendig, um die Streuung der Resultate auf ein Minimum zu reduzieren. Die Belastungsvorgeschichte musste bekannt sein, um für die Versuche eine genau definierbare Ausgangslage zu schaffen. Durch vollständige Sättigung konnte das System mit den 3 Phasen fest, flüssig und gasförmig in ein 2-Phasensystem übergeführt werden. Das vereinfachte die Kräfteverhältnisse bedeutend. Zudem liessen sich die effektiven Spannungen als Differenz zwischen den messbaren totalen Spannungen und den Porenwasserspannungen darstellen. Ebenfalls brauchte im gesättigten Zustand die scheinbare Kohäsion nicht berücksichtigt zu werden.

Für die Probenzubereitung hat sich bei den gewählten Böden die Vacuummethode am besten bewährt. Sie setzt voraus, dass das Material eine bestimmte Plastizität

besitzt und sich während dem Einbau nicht entmischt. Die hergestellten Proben sind auf Homogenität und Sättigung untersucht worden. Schrumpfbilder von Probenausschnitten haben die Homogenität bestätigt, während die Sättigung durch Wägung und Rechnung, sowie durch das Verhalten der Porenwasserspannungen bei allseitiger Belastung nachgewiesen werden konnte (B-Wert nach Skempton = 1).

2) Scherfestigkeits- und Deformationseigenschaften

Vorgängig der eigentlichen dynamischen Untersuchungen sind die Deformationseigenschaften und die Scherfestigkeit bei normal- und überkonsolidierten Proben bestimmt worden. Bei gesättigten Böden ist für Drücke, die höher sind als die höchsten je angewandten Konsolidationsspannungen, die Poissonziffer wenig kleiner als 0,50, der Kompressionsmodul praktisch konstant und grösser als der von Wasser. Im Bereich unterhalb der grössten Konsolidationsspannungen, also bei überkonsolidierten Materialien, sind die Werte kleiner und die Deformationen nicht mehr proportional zu den Spannungen.

Die Kräfte zwischen den Teilchen sind bei konstanten Umgebungsbedingungen Funktionen ihrer Schwerpunktsabstände und ihrer gegenseitigen Orientierung. Da für gesättigte Proben bei einem bestimmten Wassergehalt der mittlere Schwerpunktsabstand gegeben ist und sich die Teilchen während des Abscherens parallel zur Scherfläche orientieren, ist die Endscherfestigkeit allein vom Wassergehalt abhängig, sofern der Ueberkonsolidationsgrad nicht zu gross ist.

Der Spannungsverlauf während des Schervorganges wurde im $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_3'$ -Diagramm, einer affinen Abbildung der Vektorkurve, aufgezeichnet. Neben den Eigenschaften der Vektorkurve, die erhalten bleiben und die Bestimmung des Bruchpunktes erlauben, besitzt diese Art der Darstellung neben ihrer Einfachheit den Vorteil, den Verlauf der A-Funktion und des Verhältnisses $\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ übersichtlich anzugeben. Dabei bestehen bessere Vergleichsmöglichkeiten zwischen dem Verhalten zweier Böden, da die Form der Kurve nicht vom Reibungswinkel abhängt.

3) Verhalten unter plötzlich aufgebrachtter Last

Versuche mit periodischen, plötzlichen Aenderungen der Belastung bilden den Uebergang zur eigentlichen dynamischen Untersuchung. Eine wiederholte Be- und Entlastung der Probe, d. h. die mit der Deformation verbundene, gegenseitige Verschiebung der Teilchen, erzeugt eine dichtere Lagerung. Die dadurch gewonnene zu-

sätzliche Festigkeit erreicht wie die Kohäsion während des Abscherens bei kleinen Verformungen ihren höchsten Wert, und nimmt mit zunehmender Deformation wieder ab. Daraus folgt, dass mit diesem Teil der Festigkeit an einer bestimmten Stelle nur dann gerechnet werden darf, wenn an diesem Ort die Deformationen einen bestimmten Betrag nicht überschreiten.

4) Dynamische Untersuchungen

Im ersten Teil dieses Kapitels werden das Pflichtenheft der Apparatur, der Entwicklungsgang und die endgültige Konstruktion beschrieben. Die ganze Einrichtung besteht aus 3 Teilen, nämlich:

- der Anlage zur periodischen Aenderung des allseitigen Druckes (hydraulisches Prinzip)
- dem triaxialen Scherapparat mit Druckzelle
- der Messeinrichtung

Die Apparatur gestattet, die Hauptspannungen, deren Grösse und Verhältnis gewählt werden kann, mit Frequenzen bis zu 50 Hertz synchron zu ändern. Die Hauptspannungen, die Porenwasserspannungen und die Deformationen können elektronisch gemessen und gleichzeitig registriert werden. Der wichtigste Belastungsfall, der bei gesättigten Böden in der Natur vorkommt und auf den sich die experimentellen Untersuchungen beschränken, ist die Variation des allseitigen Druckes um eine Ruhelage.

Mit Hilfe der linearen Elastizitätstheorie konnte nachgewiesen werden, dass für Proben mit einem Durchmesser von 5,64 cm die erste Resonanzfrequenz sehr gross ist ($456\sqrt{E}$ Hertz) und weit ausserhalb der verwendeten Frequenz liegt.

Die Versuche gaben Aufschluss über das Verhalten des gesättigten Bodens unter der dynamischen Belastung vor und während des Belastungsvorganges. Bewährt hat sich die Differentialmethode, da sie es erlaubt, die statische und dynamische Scherfestigkeit am selben Versuch zu vergleichen. Dabei wird der allseitige hydraulische Druck abwechslungsweise während ungefähr 10 Minuten konstant gehalten und anschliessend gleich lang um diesen Wert als Mittellage variiert.

Es hat sich dabei gezeigt, dass die Scherfestigkeitsabnahme proportional zur Amplitude des allseitigen Druckes ist. Sie ist jedoch grösser bei Proben mit hohem Wassergehalt als bei solchen mit niedrigem. Die Festigkeitseinbusse ist allerdings

bei Spannungsänderungen von der Grösse, wie sie normalerweise unter einer Fundation auftreten, gering.

Eingehende Untersuchungen über das Anwachsen der Porenwasserspannungen bei zunehmender Amplitude $A \sigma_3$ des allseitigen Druckes haben die folgenden Ergebnisse geliefert. Die Reaktion der Porenwasserspannungen auf die Aenderung des allseitigen Druckes ist vom Konsolidationsgrad der Probe abhängig. Der dynamische B-Wert $\frac{A_u}{A \sigma_3}$ schwankt zwischen 1 für bei niederem Druck normalkonsolidierte Proben und beinahe 0 für stark überkonsolidierte. Dies gilt bis zu einer Amplitude $A \sigma_3$, bei der während der Schwingung der minimale allseitige Druck nicht wesentlich kleiner wird als die minimalen Porenwasserspannungen. Ueberschreitet diese Spannungsdifferenz einen bestimmten Betrag, so sprengt das unter Ueberdruck stehende Porenwasser die Struktur des Bodens. Der Betrag, um den die Porenwasserspannungen den allseitigen Druck übersteigen können, bevor es zum Bruch kommt, entspricht der Zugfestigkeit des Bodens. Die Zugfestigkeit ihrerseits kann als Mass der Kohäsion betrachtet werden. Bei zunehmender Amplitude $A \sigma_3$ nimmt A_u eher ab und der Mittelwert der Porenwasserspannungen sinkt. Unter ungünstigen Verhältnissen führt das zu einem Ansaugen von Wasser und damit zu einer Reduktion der Festigkeit.

Die dynamische Scherfestigkeit wurde wegen der grossen Variation von u und ϕ' , deren Auswirkungen sich beinahe kompensieren, als Funktion der statischen Kennziffern dargestellt. Die Abnahme der Scherfestigkeit ist dabei proportional zur Amplitude $A \sigma_3$ und zu dem Abminderungsfaktor α .

$$\tau_{df} = (1 - \alpha A \sigma_3) [c'_s + (\sigma - u)_s \cdot \text{tg } \phi'_s]$$

Für den Bauingenieur ergibt sich aus dem oben Gesagten als Folge, dass bei der Dimensionierung einer dynamisch belasteten Fundation im bindigen Boden hauptsächlich 3 Punkte beachtet werden müssen.

1. Die Eigenfrequenz des schwingenden Körpers (einschliesslich der schwingenden Bodenmasse) soll ungleich der Erregerfrequenz sein.
2. Die Scherfestigkeit des Bodens nimmt unter dynamischer Belastung ab.
3. Der Boden kann unter ungünstigen Bedingungen Wasser ansaugen und aus diesem Grunde stark an Tragfähigkeit verlieren. Es soll daher untersucht werden, ob die Möglichkeit des Wassernachschubes besteht.

Eine zusätzliche Anwendung der dynamischen Untersuchungsmethode besteht in der Messung der Kohäsion. Bei passender Wahl des Seitendruckes und der Vorspannung kann die Zugfestigkeit, d. h. die Grösse der Bindungskräfte der Teilchen, bestimmt werden. Dieses Resultat scheint für spätere Versuche über die kohäsiven Kräfte der Bindemittel bedeutsam zu sein.