



Doctoral Thesis

Der Einfluss des Porenwasserdrucks auf das mechanische Verhalten kakiritisierter Gesteine

Author(s):

Vogelhuber, Martin

Publication Date:

2007

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005399238> →

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](#).

Dissertation ETH Nr. 17079

Der Einfluss des Porenwasserdrucks auf das mechanische Verhalten kakiritisierter Gesteine

Abhandlung
zur Erlangung des Titels
Doktor der technischen Wissenschaften
der
ETH Zürich

Vorgelegt von
Martin Vogelhuber
Dipl. Bau-Ing. ETH
Geboren am 24. September 1970
Bürger von Egg, ZH

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. sc. techn. Georgios Anagnostou, Referent
Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler, Korreferent

2007

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit bezweckt die Vertiefung der Kenntnisse über den Tunnelbau in druckhaftem Gebirge. Das Hauptaugenmerk lag darin, den Einfluss des Porenwasserdrucks auf die Ausbildung dieser Gebirgsdruckart experimentell und theoretisch zu untersuchen.

Den Schlüssel hierfür soll die Durchführung von Triaxialversuchen an Kakiriten aus dem Tavetscher Zwischenmassiv Nord und der angrenzenden Clavaniev-Zone bilden. Dies sind tektonisch stark beanspruchte Gesteine, welche eine geringe Festigkeit und eine hohe Verformbarkeit aufweisen. Angesichts der grossen Gebirgsüberlagerung von mindestens 800 m mit einem Grundwasserspiegel unweit der Geländeoberfläche bildet die Durchörterung dieser Gesteinsserien ein zentrales Problem beim Bau des Gotthard Basistunnels. Unter solchen Verhältnissen können nach dem Tunnelausbruch ohne geeignete Gegenmassnahmen grosse und langanhaltende Querschnittsverengungen auftreten. Auf den zeitweiligen Ausbau, welcher diesen Verformungen im Wege steht, übt das Gebirge einen allmählich ansteigenden Druck aus, was dessen Beschädigung oder Zerstörung bewirken kann.

Die Kakirite stammen aus einer etwa 1700 m langen Schrägbohrung, welche sämtliche kritischen Gesteinsserien durchfährt und bis auf Tunnelniveau hinabreicht. Sie stellen ein poröses Medium dar, dessen Porenraum teilweise oder ganz mit Wasser gefüllt sein kann. Der Porenwasserdruck beeinflusst das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Kakirite massgebend, wobei sich dieser Zusammenhang bei vollständiger Sättigung durch das Prinzip der effektiven Spannungen nach Terzaghi beschreiben lässt. Letzteres wurde auch anhand ausgewählter experimenteller Untersuchungen erfolgreich überprüft. Das Versuchsprogramm umfasst einerseits 15 konsolidiert-drainierte Versuche an gesättigten Proben mit Vorgabe eines konstanten Porenwasserdrucks und Messung der Wassergehaltsänderung, andererseits 8 konsolidiert-undrainierte Versuche an gesättigten Proben mit Vorgabe eines konstanten Wassergehalts und Messung der Porenwasserdruckänderung. Dafür musste der zunächst teilgesättigte Prüfkörper einer aufwendigen Prozedur unterzogen werden, welche aus der Durchströmung mittels einer Porenwasserdruckdifferenz zwischen seinen Endflächen sowie der Sättigung durch Aufbringen eines Porenwassergegendrucks besteht. Die Versuchsergebnisse zeigen für die beiden Versuchsarten eine völlig unterschiedliche Spannungsantwort auf die aufgezwungenen Randbedingungen, welche sich aber anhand der gleichen Materialeigenschaften beschreiben lässt. So äussert sich die Dilatanz nach Erreichen der Festigkeitsgrenze im drainierten Fall durch eine stetige Zunahme des Probenvolumens. Demgegenüber wird im undrainierten Fall bei weitgehend unverändertem Probenvolumen eine stetige Abnahme des Porenwasserdrucks ausgelöst. Damit ist

eine stetige Zunahme der effektiven Normalspannungen verknüpft und die Hauptspannungsdifferenz steigt auch nach Erreichen der Festigkeitsgrenze weiter an. Man kann dabei von einer Verfestigung durch verhinderte Dilatanz sprechen. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der sich ausgesprochen duktil verhaltenden Kakirite wird bei Zuhilfenahme der in effektiven Spannungen formulierten Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb mit einem linear elastischen, ideal plastischen Stoffgesetz reproduziert. Es ist bemerkenswert, dass die Versuchsergebnisse beider Versuchsarten trotz des einfachen Stoffgesetzes mit einem einzigen Satz von Materialparametern erfolgreich nachvollziehbar sind. Abweichungen davon lassen sich in der Regel auf die Inhomogenität der Kakirite zurückführen. Aus Gründen der Zeitersparnis wurde das Versuchsprogramm durch 40 konsolidiert-drainierte Versuche an nicht vollständig gesättigten Proben ergänzt. Anhand ausgewählter experimenteller Untersuchungen bestätigte sich, dass eine stark verkürzte Durchströmung mittels Vorgabe einer Porenwasserdruckdifferenz zwischen seinen Endflächen allein schon ausreichend ist, damit der Porenwasserdruck nachher als atmosphärisch angenommen und die näherungsweise Deutung der Versuchsergebnisse gewährleistet werden kann. Letztere sind trotz der komplexen und wechselhaften Struktur der Kakirite sehr einheitlich. Die Auswertung der Triaxialversuche führt im drainierten Fall für teilweise und vollständig gesättigte Prüfkörper zu vergleichbaren Materialparametern.

Zum Vergleich hat man auch Triaxialversuche ohne Beachtung des Wassers verwirklicht. Bei diesen in der Felsmechanik üblicherweise angewendeten konventionellen Versuchen werden nur die totalen Spannungen erfasst, womit die Festigkeitsgrenze in Abhängigkeit vom Wassergehalt vor Versuchsbeginn fallweise überschätzt (tiefer Wassergehalt durch vorgängige Austrocknung) oder unterschätzt (hoher Wassergehalt durch vorgängige Befeuchtung) wird. Damit zeigt sich eindrücklich, dass der grosse zeitliche und technische Aufwand für Triaxialversuche mit Beachtung des Wassers tatsächlich erforderlich ist. Zudem können die Ergebnisse früherer Laboruntersuchungen an Kakiriten aus dem nördlichen Tavetscher Zwischenmassiv erklärt und in einen grösseren Rahmen gestellt werden.

Schliesslich wurde eine praktische Fragestellung mit Hilfe eines kontinuumsmechanischen Berechnungsmodells untersucht, dem die oben erwähnte mathematische Beschreibung des Materialverhaltens der Kakirite zugrunde liegt. Das Problem des Ausbruchs eines Tunnels im wasserführenden Gebirge wird als gekoppelter Sickerströmungs- und Deformationsprozess aufgefasst. Die Zeitabhängigkeit der Vorgänge ergibt sich durch Berücksichtigung der geringen Durchlässigkeit dieser Gesteine. Die Untersuchungen beschränken sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die beiden Grenzstände des instationären Vorgangs, nämlich das Kurzzeit- und Langzeitverhalten. So wird der kurzfristige Zustand durch die Bedingung eines konstanten Wassergehalts, der langfristige Zustand durch die Bedingung eines stationären Verlaufs des Porenwasserdrucks in der Umgebung des Hohlraums bestimmt. Man kann dann den gesuchten Zusammenhang zwischen Gebirgsdruck und Gebirgsverformung aufgrund starker Idealisierungen beim verwendeten Kennlinienverfahren analytisch herleiten.

Summary

The present work aims at a better knowledge of tunneling in squeezing rock. It focuses particularly on the effects of the pore water pressure on the development of this phenomenon of rock pressure. The problem is examined both experimentally and theoretically.

To this end, a comprehensive programme of triaxial tests is carried out. The kakiritic rocks investigated come from the northern Tavetsch massiv and the adjacent Clavaniev zone. The kakirite is a tectonically intensive broken or sheared rock, which has a low strength and a high deformability. As there is a depth of cover as great as 800 m and a ground water table close to the terrain surface, the crossing of these geological series represents a key problem for the Gotthard high-speed railway tunnel which is currently under construction. Under such circumstances, tunnel excavation can lead to substantial long-term rock deformation unless appropriate countermeasures are taken. If the rock deformation is prevented by a temporary support, instead rock pressure may build up, which can cause excessive damage or even failure of the temporary support.

The kakiritic rocks are taken from an inclined exploratory borehole approximately 1700 m long, which passed through all the problematic geological series and extended to the level of the tunnel. The kakirite is a porous medium, whose pores may be partially or completely filled with water. The pore water pressure influences the strength and the deformability of the rock considerably. Provided saturation is complete, the principle of effective stresses developed by Terzaghi can be used to derive the relevant values. The validity of this principle has been successfully established through a number of special experimental investigations. The triaxial testing program comprises 15 consolidated-drained tests under constant pore water pressure whilst monitoring the change of water content, as well as 8 consolidated-undrained tests under constant water content whilst monitoring changes in pore water pressure. In order to do this, the initially unsaturated specimen must first undergo a complicated procedure consisting of passing water through it by specifying a pore water pressure gradient and saturation of the specimen through the application of sufficient back pressure. The test results for both types of test can be described through the same material properties even though they show a completely different stress response to the given boundary conditions in each type of test. For the drained test the dilatant behavior of the failing rock expresses itself in a steady increase in the volume of the sample. On the other hand, for the undrained test the volume of the sample remains almost unchanged and the pore water pressure drops continually, which causes a steady increase in the effective normal stresses. After reaching the yield limit, the difference between the principal stresses

increases as the rock further deforms. The constrained dilatancy of the failing rock causes a material behavior similar to strain hardening. The kakiritic rocks remain ductile and their strength and deformability will follow linear elastic, perfectly plastic constitutive equations obeying the Mohr-Coulomb yield criterion formulated for effective stresses. It is remarkable, that the test results for both types of test, despite the simple material model, can be reproduced satisfactorily using a single set of material parameters. The observed scatter is normally due to the heterogeneity of the kakiritic rocks. In order to save time the triaxial testing program was completed with 40 consolidated-drained tests on non-fully saturated samples at atmospheric pore water pressure, instead of saturated samples with sufficient back pressure. Special experimental investigations have shown that for this type of test a much shorter period of passing water through the specimen under a specified pore water pressure gradient will be sufficient for achieving an approximately correct interpretation of the test results. Despite the complex and changeable structure of the kakirite, remarkably uniform test results were obtained. The evaluation of the triaxial tests for the drained case shows quite similar material parameters, irrespective of whether the specimen is saturated or non-fully saturated during testing.

In a comparative study, triaxial tests without controlled pore water pressure are carried out. This is a conventional form of testing in rock mechanics. Because only the total stresses can be recorded, the test results depend on the moisture content before the start of the test. The strength may either be overestimated (when moisture content is low due to previous drying) or underestimated (when moisture content is high due to previous wetting). This impressively confirms the necessity of using the technically very demanding and also very time consuming triaxial tests with controlled pore water pressure. Moreover, this may help to explain the test results of some earlier laboratory testing on kakiritic rocks from the northern Tavetsch massiv.

Finally, the practical significance of the laboratory testing is demonstrated through a suitable continuum-mechanical calculation model. This involves a mathematical description of the material behavior of the kakiritic rocks mentioned above. The ground behavior caused by tunneling operations in water-bearing rock will be interpreted as a coupled process of seepage flow and rock deformation. The time-dependence of the ground behavior can be derived by taking into consideration the low permeability of the kakiritic rocks. Within the scope of this work, investigations will be restricted to the two limiting cases of the transient process, which are the short-term behavior and the long-term behavior. The short-term response is determined by the fact that water content remains constant. The long-term response, however, is determined by a steady state distribution of pore water pressures in the rock surrounding the tunnel. In view of the high degree of simplification involved in the ground response curve, the relationship between rock pressure and rock deformation is obtained analytically.