

22. Nov. 1991

Dissertation Nr. 9553

Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge

Georgios Anagnostou

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein kontinuumsmechanisches Modell zur Interpretation von Beobachtungen im Labor und Feld sowie zur Dimensionierung des Tunnelausbaus in quellfähigem Gebirge entwickelt.

Das Phänomen der Hebung der Tunnelsohle bzw. der Beschädigung eines eingezogenen Sohlgewölbes ist seit dem Beginn des Eisenbahntunnelbaus, also seit der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts bekannt. Schon damals wurde die Ursache in der Eigenschaft gewisser Gesteine gesehen, ihr Volumen durch Wasseraufnahme zu vergrössern. Die Anfänge der theoretischen Auseinandersetzung mit dem Problem des Quellens im Tunnelbau gehen auf Wiesmann (1914) zurück, der im Zusammenhang mit dem Bau des Hauenstein-Basistunnels die Statik des Tunnelmauerwerks in quellfähigem Gebirge untersucht hat. Die seither entwickelten kontinuumsmechanischen Modelle prognostizieren das Auftreten von Quellerscheinungen im Gebirge nicht nur in der Sohle, sondern auch in der Firste, was den Beobachtungen widerspricht und zu falschen Aussagen über die Beanspruchung des Ausbaus führt.

Der kontinuumsmechanische Ansatz der vorliegenden Arbeit weist folgende zwei Hauptmerkmale auf: Das Quellphänomen wird hier zum ersten Mal als ein gekoppelter Spannungs-Sickerströmungs-Prozess betrachtet. Dadurch bedingt treten in die Stoffgleichungen zusätzlich zu den Spannungen und Verzerrungen auch die Porenwasserspannung und der Wassergehalt ein. Das Auftreten von Quelldehnungen oder -drücken wird hier als eine Folge des allmählichen Abbaus von negativen Porenwasserspannungen interpretiert. Ferner wird die Sickerströmung in der Umgebung eines unterirdischen Hohlraums bei der mathematischen Formulierung berücksichtigt. Zu diesem Zweck werden aus der Boden- und Felsmechanik bekannte Strömungsgesetze übernommen.

Ausser dass der Quellprozess konzeptuell in neuem Licht gesehen wird, erweist sich die vorgenommene Erweiterung des theoretischen Rahmens aus folgenden Gründen als vorteilhaft: Erstens können Sohlhebungen wirklichkeitsnah modellmässig abgebildet werden, d.h. ohne das zwingende Auftreten von Quellerscheinungen auch im Firstbereich. Dies ist deswegen möglich, weil einerseits die hydraulischen Randbedingungen im First- und Sohlbereich unterschiedlich sein können, und andererseits das Strömungsgesetz die geodätische Höhe explizit enthält. Zweitens wird die zeitliche Dimension des Quellprozesses erfasst.

2 - Zusammenfassung

Ein weiterer Punkt, worin sich der Ansatz der vorliegenden Arbeit von den bestehenden Ansätzen unterscheidet, liegt in den verwendeten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen. Der quellfähige Fels wird hier als ein elastoplastisches Material betrachtet, was die Modellierung der in situ beobachteten, öfters grossen Sohlhebungen ermöglicht. Nach den Ergebnissen unserer Modellrechnungen ist der Bereich mit grösseren Quelldehnungen praktisch identisch mit der plastischen Zone.

Die Möglichkeiten und - vor allem was die Zeitdimension betrifft - die Grenzen der numerischen Erfassung des Quellvorgangs durch das vorliegende Modell werden aufgrund von mehreren Modellrechnungen dargestellt. Ferner werden die Feldmessungen numerisch interpretiert, die in einem Tunnel während verschiedenen Ausbruchphasen von unserem Institut durchgeführt bzw. betreut wurden.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit entstand ein Rechenprogramm nach der Methode der Finiten Elemente, das die numerische Lösung auch jener tunnelstatischen Probleme ermöglicht, bei welchen die Sickerströmung einen massgeblichen Einfluss auf die Deformationen und die Stabilität eines unterirdischen Hohlraums hat. Solche Probleme treten nicht nur in Zusammenhang mit dem Quellphänomen auf. Man denke zum Beispiel an die Analyse der Vorgänge in der Umgebung eines im Grundwasser liegenden Tunnels unter den Verhältnissen des echten Gebirgsdrucks oder an die Stabilität der Ortsbrust bei Schildvortrieben.

Summary

This research work contributes towards a rational basis for the interpretation of observed phenomena and the design of tunnels in swelling rocks, through the development of a new continuum-mechanical model.

The phenomenon of the heave of a tunnel floor, or of the damage of an invert arch, has been well-known since the beginnings of railroad-tunnelling in the middle of the 19th century. Right from the start these phenomena have been associated with swelling of the surrounding rock mass due to water uptake. The first theoretical approach to the problem of swelling in tunnelling is found in Wiesmann (1914), where the stability of tunnel masonry work in connection with the construction of the "Hauenstein-Basis" tunnel in Switzerland is analyzed. The continuum-mechanical models developed by various authors since that time predict swelling not only in the floor, but also in the walls and crown of the tunnel. This clearly contradicts observations and leads to erroneous predictions of the stress resultants in the lining.

The continuum-mechanical approach presented here has two main features. Swelling phenomenon is treated for the first time as a coupled hydraulic-mechanical process. Consequently, beside the stresses and strains the pore water pressure and the water content appear in the constitutive equations. The time-dependent development of swelling strains or swelling pressures is here interpreted as a consequence of the gradual dissipation of negative pore water pressures. Furthermore, the flow of water within the rock mass around a tunnel is taken into consideration. For this purpose seepage laws well known in soil- and rock- mechanics are here adopted.

Not only can the swelling phenomenon be seen from a new perspective, but the fundamental extension of the existing theoretical frame proposed here proves to be advantageous for the following reasons. Firstly it enables realistic modelling of observed floor heaving, i.e., without movement in the walls and the crown commonly necessary in the older models. This is possible because the hydraulic boundary conditions are not necessarily identical at the top and the bottom of the tunnel, and moreover, because the seepage laws contain the altitude explicitly. Secondly, time-dependent effects are considered.

The second feature wherein our approach differs from existing models concerns the stress-strain-relationships proposed. The swelling rock is modeled as an elasto-plastic material. This allows one

4 - Summary

to model the often strong heaves of a tunnel floor as observed in situ. The region with larger swelling strains practically coincides - according to our numerical results - with the plastic zone.

The possibilities and - especially concerning the time dimension - the limits of numerically modelling the swelling process within the theoretical frame proposed here are demonstrated by numerous simulations presented. Further, field measurements performed by our institute during the construction of a tunnel are quantitatively interpreted.

A computer program based on the finite element method has been developed within the scope of this research work. This program performs the numerical solution of those rock-mechanical problems where the seepage has an important influence on the deformations and the stability of an underground structure. Such problems appear not only in connection with swelling rocks. Think for example of the analysis of processes around a tunnel below the ground water level and under conditions of genuine rock pressure, or of the stability of a tunnel face during the excavation of the tunnel by a shield.