

Tunnelbau in quellfähigem Gebirge

K. Kovári, Ch. Amstad, G. Anagnostou
Eidg. Techn. Hochschule Zürich

1. EINLEITUNG

Ton- und anhydrithaltige Gesteine haben die Eigenschaft, ihr Volumen durch Aufnahme von Wasser zu vermehren. Man spricht vom Quellen dieser Gesteine. Beim Tunnelbau macht sich das Quellen bekanntlich durch Sohlhebungen oder bei deren Behinderung durch den Sohlgedruck auf das Sohlgewölbe bemerkbar (Fig. 1). Bei intaktem Gewölbe kann das Tunnelrohr blockweise als Ganzes angehoben werden, sodass Hebungen der Sohle auch von solchen der Firste begleitet werden. In vielen Fällen vermag das eingezogene Sohlgewölbe dem Druck nicht standzuhalten, sodass es zerstört wird.

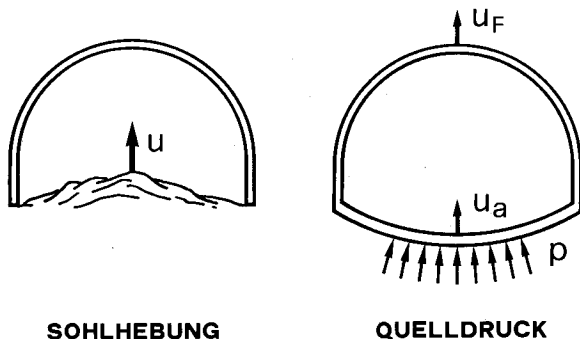


Fig. 1 Die Auswirkungen des Quellens im Tunnelbau

Da eine grössere Zahl von Untertagbauten auch künftig in quellfähigen Formationen erstellt werden, kommt der Beherrschung des Quelldruckes eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung zu. Im folgenden soll über eine neuartige Beobachtungsmethode, über einige Aspekte der Bemessung des Ausbaues und über Erfahrungen mit dem Anordnen einer Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Fels, was eine problemgerechte Lösung für den Tunnelbau im quellfähigen Gebirge darstellt, berichtet werden.

2. MESSUNG DER QUELLDEHNUNG IM FELS

Die Auswirkung des Quellens auf das Bauwerk wird in den meisten Fällen durch Nivellement- und Konvergenzmessungen verfolgt. Oft werden jedoch auch Bohrlochextensometermessungen angeordnet, die auch Aufschluss über die Vorgänge im Gebirge geben.

Seit einiger Zeit verfügen wir über ein Messinstrument, mit dem der Quellprozess im Feld sehr genau und in Einzelheiten verfolgt werden kann. Es handelt sich um das Gleitmikrometer, mit dem man den lückenlosen Verlauf der Dehnung entlang von Bohrlochern erfassen kann. Die Genauigkeit dieser portablen Sonde ist im Feld besser als $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Da die Basislänge der Dehnungsmessung 1.0 m beträgt, benützen wir in der Regel die Einheit mm/m'. Die relative Distanzänderung zweier benachbarter Messmarken im Bohrloch kann somit mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}'$ erfasst werden. Einzelheiten der Messtechnik wurden anderswo eingehend beschrieben [1]. Im folgenden betrachten wir einige Beispiele von Dehnungsmessungen in Strassentunnels, welche durch quellfähige Formationen führen.

Der Pfändertunnel bei Bregenz [2] durchörtert auf einer Strecke von rund 4.4 km eine Wechsellagerung von Mergel- und Sandsteinbänken. Noch während der Bauarbeiten drang die durch Spritzbeton al-

leine gesicherte Sohle in den Hohlraum ein. Darauf wurde eine Systemankerung angeordnet, bestehend aus korrosionsfesten Vorspannankern mit einem Tragvermögen von rund 1000 kN. Ihre Länge betrug 10 m, wovon die Verankerungsstrecke 5 m in Anspruch nahm. Im Zuge der Ankerungsarbeiten wurden an zwei Stellen im Tunnel auch 18 m lange Bohrlöcher abgeteuft und mit einer Verrohrung für Gleitmikrometermessungen ausgerüstet.

In Fig. 2 sind einige Ergebnisse der seit dem Jahre 1982 in regelmäßigen Zeitabständen erfolgten Ablesungen dargestellt. Unmittelbar unter der Sohle weist eine Materialschicht von rund 2 m Stärke eine Zusammendrückung auf. Diese Schicht befindet sich zwischen den Köpfen der vorgespannten Anker und einem sich weiter unten befindlichen grösseren quellfähigen Materialbereich. Die quellbedingten Dehnungen nehmen mit der Tiefe deutlich ab, um in einem Abstand von rund 12 m unter der Sohle gänzlich zu verschwinden. Man beobachtet die zeitliche Entwicklung der Verformungen, die einem baldigen Stillstand zustreben. Während der fünfjährigen Messperiode ergab sich eine totale Hebung der Sohle von nur rund 1 mm.

In Fig. 3 sind die Messergebnisse des zweiten Bohrloches, das in einer Entfernung von rund 1.9 km vom ersten installiert wurde, aufgetragen. Hier wurde lediglich eine 2 m mächtige Schicht, die unmittelbar unter der Sohle liegt, als quellfähig identifiziert. Die durch sie bedingte Sohlhebung beträgt rund 5 mm.

Wir wenden uns nun den Beobachtungen zu, die im Tunnel T8 (Sonceboz-Biel) gemacht werden (Fig. 4).

Bei diesem Tunnel wurde zwischen Sohlgewölbe und Gebirge eine Knautschzone eingeschaltet, über deren Ausführung anderswo berichtet wurde [3]. Die Messmarken der Verrohrung wurden hier nicht bis an die Sohle herangeführt, sodass der Dehnungsverlauf erst ab rund 1.5 m Tiefe beobachtet werden konnte. Auch hier sind die Verformungen bemerkenswert gering, obwohl sich unmittelbar nach dem Ausbruch erhebliche Quellhebungen bemerkbar machten [3]. Aber auch hier erkennen wir die deutliche Abnahme der Quelldehnung mit zunehmender Entfernung von Ausbruch.

Ein weiteres Beispiel für die Beobachtung des Quellvorganges in der Umgebung eines Hohlräumens stammt aus dem Belchentunnel der N2. Weite Strecken dieses Tunnels liegen im Gipskeuper, der für seine besonders starke Quellfähigkeit bekannt ist. Über die Schäden, die in diesem Tunnel schon während der Bauausführung eingetreten sind, wurde bereits früher ausführlich berichtet [4]. Um den Zustand dieses Tunnels rund 18 Jahren nach seiner Fertigstellung zu überprüfen, wurde 1986 ein umfangreiches Untersuchungsprogramm angeordnet, in dessen Rahmen auch Gleitmikrometer-Messungen durchgeführt werden. In einem von insgesamt vier Messquerschnitten wurden bereits nach einem halben Jahr Beobachtungszeit (Oktober 1986 – März 1987) deutliche Anzeichen eines nach 18 Jahren noch anhaltenden Quellvorganges festgestellt. Wie man Fig. 5 entnehmen kann, fanden in dieser kurzen Messperiode Quelldehnungen von bis zu 0.5 mm/m' statt, was einer Zunahme der Dehnung von 1‰ pro Jahr entspricht. Man weiss natürlich nicht, welche Erhöhung des Quelldruckes auf das Sohlgewölbe mit diesem Dehnungsincrementen einhergeht. Man weiss auch nicht, wodurch die Lücken im Dehnungsverlauf bedingt sind. Es ist möglich, dass das Material in jenen Bereichen gar nicht quellfähig ist. Es ist auch denkbar, dass das Quellen dort unter den heute herrschenden Spannungen schon zur Ruhe gekommen ist. Der Dehnungsverlauf entlang des vom rechten Widerla-

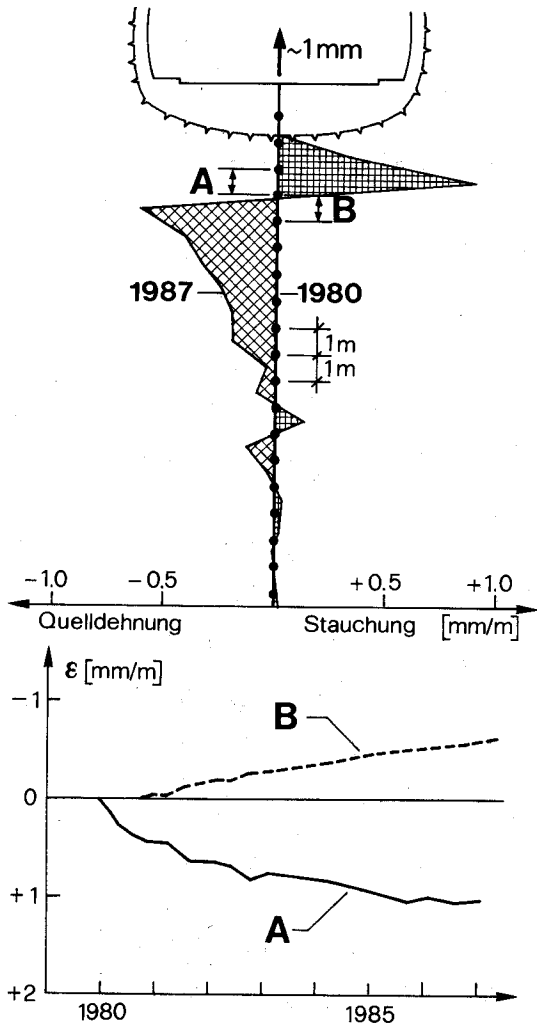


Fig. 2 Pfändertunnel; Dehnungsverlauf ϵ im Fels mit der zeitlichen Entwicklung der Dehnung in den Schichten A und B im Messquerschnitt 1

ger ausgehenden leicht geneigten Bohrlochs ist überraschend, da man dort keine Quelldehnungen erwartet hat. Nach heutigen Erkenntnissen, die aufgrund eines im Schrifttum vorhandenen umfangreichen Beobachtungsmaterials gewonnen werden können, tritt Quellen in praktisch massgebender Weise nur im Sohlbereich eines Hohlraumes auf. Wir können deshalb aus dieser einzigen Ablesung noch keine verbindlichen Schlüsse ziehen. Fest steht aber, dass schon ein kleiner Druck auf die Ulmen und eine dadurch bedingte Zunahme der Normalkraft im Sohlgewölbe die Tragfähigkeit des letzteren wesentlich erhöhen würde.

3. DAS QUELLVERHALTEN DER GESTEINE UNTER LABORBEDINGUNGEN.

Terzaghi hat erkannt, dass man die Äusserungen des Quelldruckes im Tunnelbau mit dem Verhalten von Tonproben im Oedometer deuten kann [5]. Huder und Amberg haben zahlreiche Versuche an Tongesteinen aus dem Belchentunnel durchgeführt [6] und die einachsige Spannungs-Dehnungsbeziehung nach Fig. 6 gefunden. Seit diesen Versuchen wurde die Gültigkeit dieses sog. halblogarithmischen «Quellgesetzes», dessen mathematische Formulierung auf Grob zurückgeht [4], zumindest für Tongesteine, experimentell immer wieder bestätigt. Wie das rechte Diagramm in Fig. 6 zeigt, erhält man für die Spannungs-Dehnungskurve in halblogarithmischer Darstellung eine Gerade. Für den Ingenieur in der Praxis sind zunächst das Quellmass

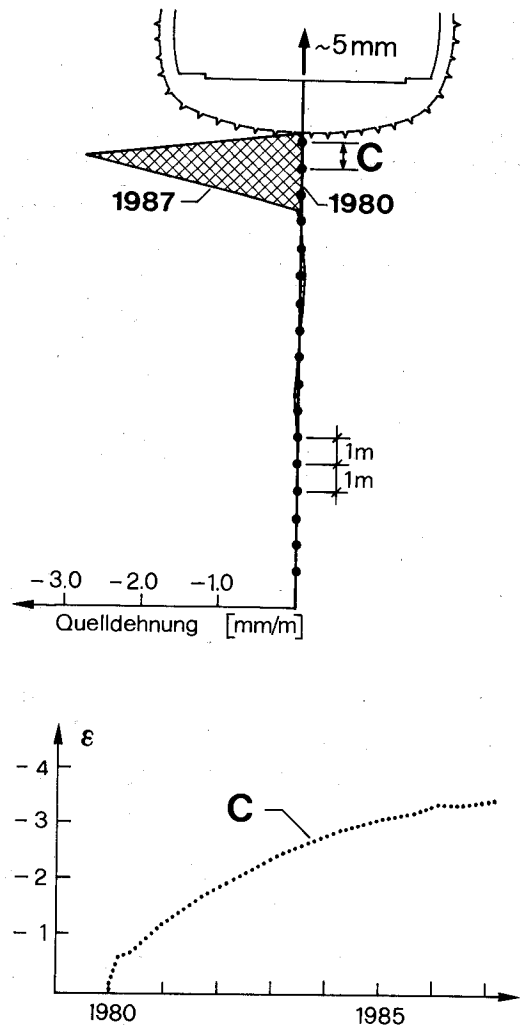


Fig. 3 Pfändertunnel; Dehnungsverlauf ϵ im Fels mit der zeitlichen Entwicklung der Dehnung der Schicht C im Messquerschnitt 2

ϵ_0 , d.h. die axial unbehinderte Quelldehnung und der Quelldruck σ^* d.h. die Spannung, die bei gänzlicher Behinderung der Quelldehnung entsteht, von grossem praktischem Interesse. Diese beiden Werte geben bereits wertvolle Hinweise auf das Quellpotential der einzelnen Schichten. Sie gelten in den meisten Fällen aber nicht direkt für das Gebirge, weil jenes bezüglich Quellen in der Regel sehr inhomogen ist. Aus dem Diagramm geht noch hervor, dass zur Entstehung eines grossen Quelldruckes nur eine geringe Wassermenge benötigt wird. Bei der Ausbildung von σ^* kann beinahe nur von einer Benetzung der Probe gesprochen werden. In einer früheren Arbeit [7] wurde bereits darauf hingewiesen, dass im Ödometerversuch bei der vollständigen Behinderung einer Quelldehnung genau so viel Wasser aufgenommen wird, wie der Zusammendrückung der Probe unter der Last entspricht. Da im Ödometer die Querdehnung verhindert wird, kennt man den Einfluss dieser Grösse auf den Quellvorgang nicht. Das bedeutet anders ausgedrückt, dass ein experimentell begründetes sog. räumliches Quellgesetz noch nicht bekannt ist. Die Gültigkeit der Spannungs-Dehnungsbeziehung nach Fig. 6 wurde bislang streng genommen nur für Tongesteine bestätigt. Bei Gesteinen, die Tonminerale und feinverteilten Anhydrit enthalten, ist man zurzeit bezüglich der Rolle des Anhydrits noch auf Hypothesen angewiesen. Der Anhydrit spielt beim Quellen nach Auffassung einiger Mineralogen keineswegs eine so wichtige Rolle, wie man noch anfangs der siebziger Jahre vermutet hat. Einzelne Autoren konnten bei La-

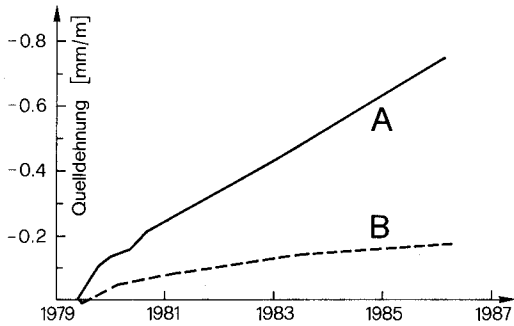
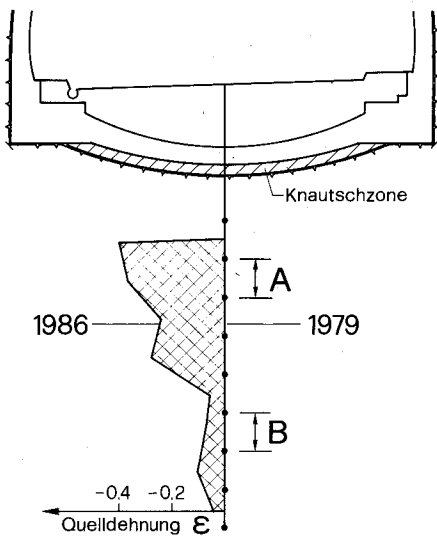


Fig. 4 Tunnel T8 (Sonceboz-Biel), Dehnungsverlauf ϵ im Fels mit der zeitlichen Entwicklung der Dehnung der Schichten A und B

borversuchen die Beteiligung des Anhydrits am Entstehen von Hebungen bzw. Drücken in solchen Gesteinen nicht nachweisen [8]. Hat man früher im Anhydrit die eigentliche Ursache des starken Quellens solcher «Mischgesteine» erkannt, so neigt man heute zur Auffassung, die Tonminerale wie Corrensit, Montmorillonit und Illit seien hierfür mitverantwortlich. Es liegen sogar Versuchsergebnisse [9] vor, die eine abnehmende Quellfähigkeit mit zunehmendem Anhydritgehalt ergeben haben (Fig. 7). Eine Verallgemeinerung dieser Versuchsergebnisse ist nicht ohne weiteres zulässig, weil nur wenige Beobachtungen vorliegen und weil der Schichtaufbau der Probekörper und insbesondere die Art der Verteilung des Anhydrits nicht bekannt sind. Angesichts dieser Sachlage ist es einleuchtend an der in Fig. 6 dargestellten halblogarithmischen Quell-Dehnungsbeziehung auch für den Gipskeuper vorläufig festzuhalten. Da zurzeit in mehreren Insti-

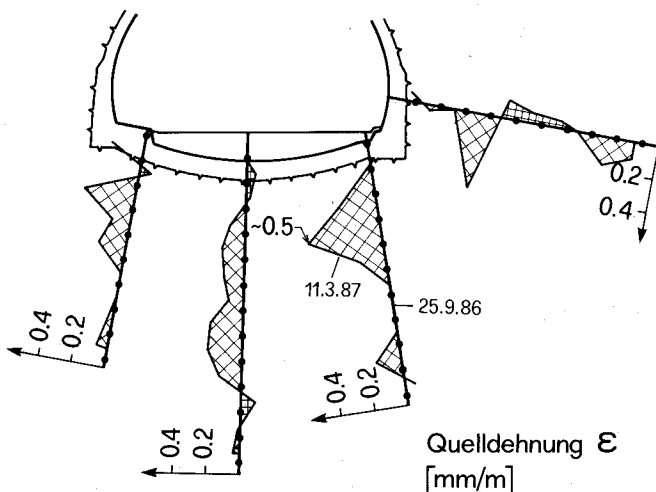


Fig. 5 Belchentunnel; Dehnungsänderungen im Gipskeuper während einer Beobachtungszeit von 6 Monaten (18 Jahre nach der Fertigstellung des Tunnels)

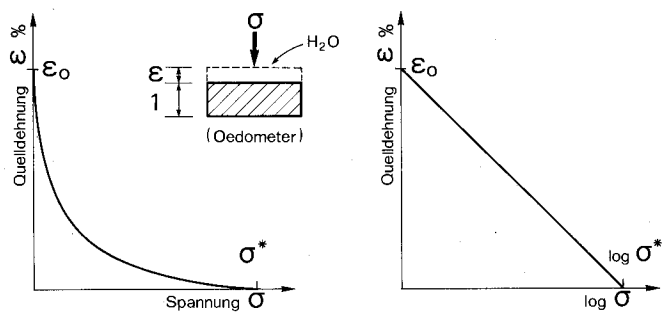


Fig. 6 Das «Quellgesetz» für Tongesteine im Ödometer-versuch (Huder/Amberg)

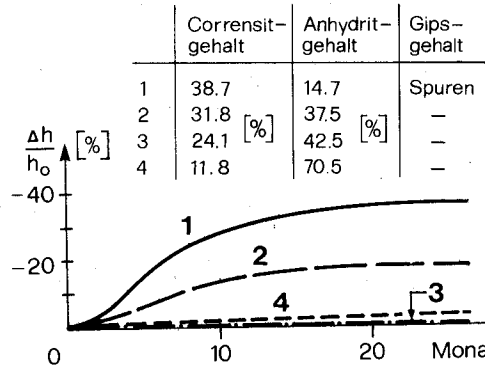


Fig. 7 Zeit-Quelldehnungsverlauf von Gipskeuperproben (nach Henke, Kaiser, Nagel)

tuten Laborversuche am Gipskeuper im Gange sind, und auch Grossversuche im Untersuchungsstollen des Freudensteintunnels (Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart der DB) gerade angelaufen sind, ist die baldige Klärung der Rolle des Anhydrits für das Quellen zu erwarten.

4. DER QUELLVORGANG IN DER UMGEBUNG EINES TUNNELS

Unsere Vorstellungen über den Quellmechanismus gehen, wie schon oben erwähnt, auf Terzaghi [5] zurück, der die Spannungsänderung im Fels zufolge der Schaffung des Hohlraumes für das Einsetzen des Quellens verantwortlich macht. Die gegen den Hohlraum gerichtete Normalspannungskomponente erfährt durch den Ausbruch einen starken Abfall, die am Ausbruchsrand beim unverkleideten Profil ganz verschwindet. Da wir aber Quellerscheinungen nur im Sohlbereich eines Hohlraumes beobachten, müssen noch andere Faktoren im Spiel sein. Man denke hier in erster Linie an der Wasserwegigkeit im Gebirge, bzw. an die Faktoren, welche die Sickerströmung beeinflussen. Hier sind wir auf Vermutungen angewiesen, da weder systematische Beobachtungen noch theoretische Vorstellungen vorliegen. Berechnungsverfahren, die nur den Spannungsänderungen im Gebirge aber nicht den Wasserbewegungen Rechnung tragen, sagen deshalb nicht nur in der Sohle, sondern rund um den Hohlraum Quellerscheinungen voraus, ein Umstand, der mit den Feldbeobachtungen nicht in Übereinstimmung steht. Das dem Hohlraum zustrebende Wasser bevorzugt (gravitationsbedingt) den Sohlbereich und lässt die oberen Felspartien, welche durch ihre Entspannung ja ebenfalls zum Quellen geeignet wären, unberührt. Diese Überlegungen dienen nur dazu, auf die Schwierigkeiten hinzuweisen, mit denen eine zutreffende rechnerische Verfolgung des Quellvorganges heute zu kämpfen hat.

Fassen wir unsere Einsichten über die Auswirkung des Quellens im Tunnelbau in groben Zügen zusammen:

- Quellvorgänge finden in einem praktisch massgebenden Ausmass nur im Sohlbereich eines Hohlraumes statt.
- Die Quelldehnung nimmt mit der Entfernung vom Hohlraum ab, um in einer Tiefe entsprechend etwa dem Durchmesser des Hohlraumes ganz zu verschwinden.

- Der Quellprozess entwickelt sich rasch oder stark verzögert, abhängig davon wie das Wasser seinen Zugang zum Sohlbereich findet. Quellvorgänge können mehrere Jahrzehnte nach der Fertigstellung eines Bauwerkes anhalten.

5. DIE KENNLINIE DES QUELLFAEHIGEN GEBIRGES

Zur quantitativen Beschreibung des Zusammenwirkens von Ausbau und Gebirge für die Verhältnisse des quellenden Gebirges wurde von Lombardi das Kennlinienverfahren vorgeschlagen [10], [11]. Unter Gebirgskennlinie verstehen wir in diesem Zusammenhang die Beziehung zwischen Sohlhebung U_a und Ausbauwiderstand p_a (Fig. 8). Der Ausbauwiderstand ist der Druck, der vom Ausbau auf das Gebirge wirkt. Seine Reaktion ist der Quelldruck, d.h. der Druck, der vom Gebirge auf den Ausbau z. B. auf das Sohlgewölbe wirksam ist.

Zur Berechnung der Sohlhebung U_a hat Grob [4] ein vereinfachtes Verfahren vorgeschlagen, welches für das Gebirge das in Fig. 6 angegebene Quellgesetz heranzieht. Die Berechnung geht von einem angenommenen primären Spannungszustand aus, um unter der Annahme elastischer Materialeigenschaften den ausbruchbedingten sekundären Spannungszustand zu ermitteln. Die Änderung der Radialspannung lässt entsprechend dem Quellgesetz die Quelldehnung zu, die dann aufsummiert die Sohlhebung U_a ergibt. «Das ganze ist eine Art negative Setzungsberechnung» [4]. Andere Autoren [12], [13] haben Ansätze vorgeschlagen, die dem dreidimensionalen Spannungszustand Rechnung zu tragen versuchen. Danach soll die erste Invariante des Spannungstensors für die quellbedingte Volumenvermehrung verantwortlich sein. Die Problematik solcher Quellberechnungen besteht darin, dass sie nicht nur in der Tunnelsohle, sondern rund um den Hohlraum ein Quellen bzw. Quelldruck voraussetzen, was jedoch der Erfahrung widerspricht. Die Ergebnisse solcher Berechnungen hängen auch in sehr hohem Masse vom angenommenen Primärspannungszustand ab, insbesondere vom Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Normalspannungskomponente. Zur Zeit kann man aber in einem quellfähigen Gebirge weder den primären noch den sekundären Spannungszustand messtechnisch ermitteln.

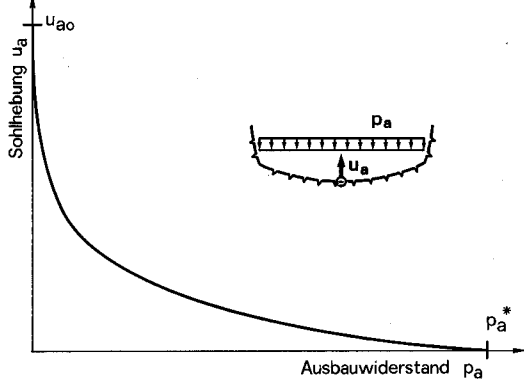


Fig. 8 Die Kennlinie für das quellfähige Gebirge.

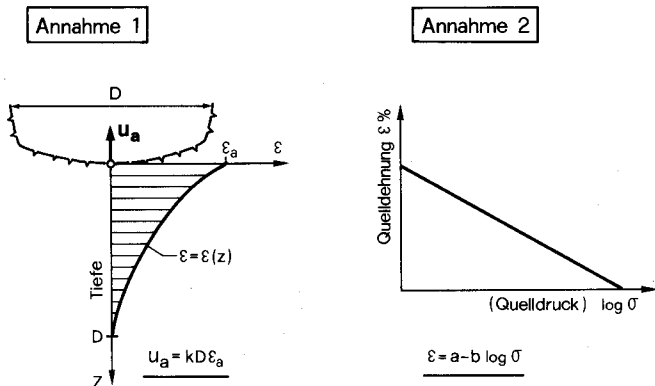


Fig. 9 Die zwei fundamentalen Annahmen zur Bestimmung der Gebirgskennlinie: Die Dehnungsverteilung in der Sohle und das Quellgesetz für das Gebirge

Im folgenden wird ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der Kennlinie vorgeschlagen, welches auf die Einbeziehung des primären Spannungszustandes in die Berechnungen verzichtet. Wir können ihn und somit auch die Ermittlung des sekundären Spannungszustandes umgehen, indem wir die Kenntnis des Verlaufes der Quelldehnung $\epsilon(z)$ als bekannt voraussetzen (Fig. 9). In einem homogenen Gebirge weist die Quelldehnung ihren grössten Wert ϵ_a am Ausbruchrand auf und sie verschwindet praktisch in einem Abstand von einem Hohlraumdurchmesser D . Neben dieser fundamentalen Annahme über den Dehnungsverlauf $\epsilon(z)$ benutzen wir noch eine zweite, nämlich das Quellgesetz für das Gebirge nach Fig. 6 – wie dies ja auch andere Autoren tun [4], [12], [13]. Bei der Ermittlung der Kennwerte a und b (Fig. 9) für das Gebirge müssen nicht nur einzelne Laborversuche, sondern die ganze Stratigraphie unter der Tunnelsohle berücksichtigt werden. Wenn einzelne Ergebnisse aus Ödometerversuchen an Prüfkörpern mit kleinen Abmessungen vorliegen, so muss man die Parameter a und b unter Berücksichtigung der Sandwichstruktur des Felsens ermitteln. Zu diesem Zweck kann man sich eine Reihe von in Serie geschalteten Federn vorstellen, deren Federgesetz entsprechend Fig. 6 halblogarithmisch ist. Kennt man die Schichtstärken und die Quelleigenschaften der einzelnen Schichten, so lassen sich die für den Massstab des Gebirges geltenden stellvertretenden Quellparameter a und b abschätzen. Man sollte auf alle Fälle nicht den Fehler machen, die ungünstigsten Laborwerte für das ganze Gebirge gelten zu lassen.

Unter den in Fig. 9 genannten Annahmen ergibt sich die Sohlhebung U_a für das in Bezug auf Quellen homogen angenommene Gebirge aus der Integration von $\epsilon(z)$ mit der Randbedingung $\epsilon(0) = \epsilon_a$ und $\epsilon(D) = 0$. Man erhält die allgemeine Form

$$U_a = kD\epsilon_a \quad (1)$$

wobei k eine Art Formfaktor für den Verlauf der Dehnungskurve $\epsilon(z)$ darstellt. In Fig. 10 sind drei Beispiele für denkbare Quelldehnungsverteilungen dargestellt. Im Extremfall einer konstanten Quelldehnung bis zur Tiefe D erhält man $k = 1$, bei linear nach unten abnehmendem Verlauf $k = 1/2$ und bei einer parabelförmigen Verteilungsfunktion $k = 1/3$.

Die Kennlinie erhält man, indem das Quellgesetz für die Randschicht ($z=0$) formuliert wird, wo die Vertikalspannung gerade $\sigma = p_a$ beträgt, d.h.,

$$\epsilon_a = a - b \log p_a \quad (2)$$

Setzt man ϵ_a in die Formel (1) ein, so ergibt sich der Ausdruck

$$U_a = kD(a - b \log p_a) \quad (3)$$

Er sagt aus, dass die Quellhebung direkt proportional zur Spannweite D des Hohlraumes und zum Koeffizienten k ist, und dass sie linear mit dem Logarithmus des Ausbauwiderstandes ($\log p_a$) abnimmt. Fassen wir die Produkte

$$A = kDa \text{ und } B = kDb \quad (4)$$

zusammen, so ergibt sich die Kennlinie des quellfähigen Gebirges in der allgemeinen Form:

$$U_a = A - B \log p_a \quad (5)$$

Die so ermittelte Kennlinie weist somit grundsätzlich den gleichen Verlauf wie das «Quellgesetz» im Ödometer auf. Dem Quellmass entspricht die unbehinderte Sohlhebung U_{a0} und dem Quelldruck der Höchstwert des Ausbauwiderstandes. Die Kennlinie stellt Zustände des Gleichgewichtes dar, die nach einer genügend langen Zeitperiode bestehen. Diese logarithmische Abhängigkeit, die in Fig. 11 veranschaulicht wird, hat zwei praktisch interessante Folgerungen. Zum einen bewirkt schon ein verhältnismässig geringer Betrag an zugelassener Sohlhebung ($+\Delta U_a$) eine verhältnismässig grosse Abnahme des Quelldruckes ($-\Delta p_a$) und umgekehrt verringert schon ein verhältnismässig geringer Ausbauwiderstand ($+\Delta p_a$) die Sohlhebung um einen verhältnismässig grossen Wert ($-\Delta U_a$). Wir haben uns hier, entsprechend den verschiedenen Problemstellungen, bewusst auf den Quelldruck bzw. auf den Ausbauwiderstand bezogen, weil diese Bezeichnungen den verschiedenen Betrachtungsweisen besser gerecht werden. Ob sich das quellfähige Gebirge im Sohlbereich eines Hohlraumes nach der in Fig. 11 dargestellten Kennlinie verhält,

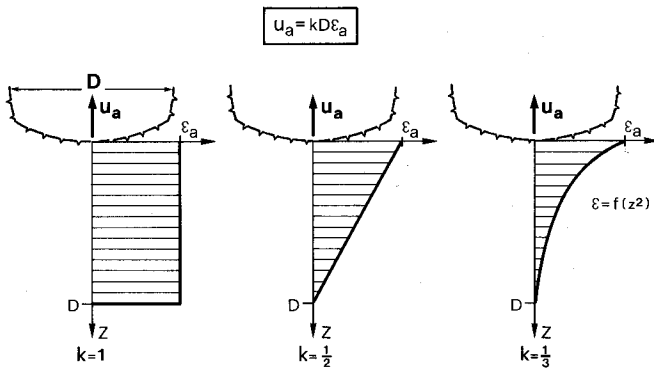


Fig. 10 Der Formfaktor k und die Sohlhebung U_a für verschiedene Dehnungsverteilungen

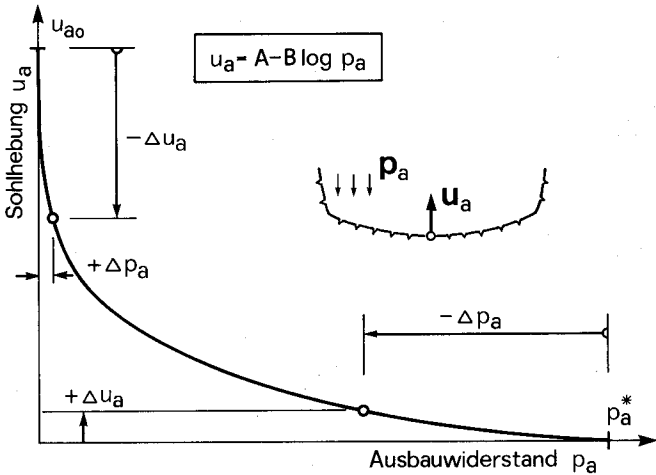


Fig. 11 Die Eigenschaften der Gebirgskennlinie im Bereiche geringer Sohlhebung ($+\Delta U_a$) und bei kleinem Ausbauwiderstand ($+\Delta p_a$)

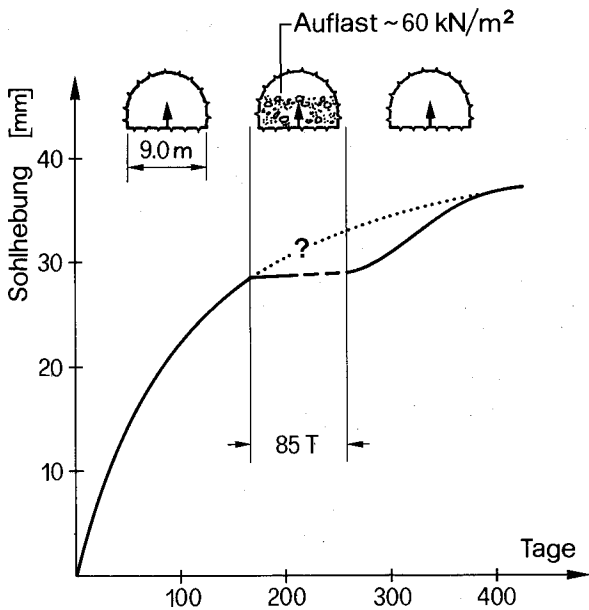


Fig. 12 Die Auswirkung einer geringen Auflast auf die Entwicklung der Sohlhebung im Mergel

muss durch Feldversuche bzw. Feldmessungen bestätigt werden. Einzelne Beobachtungen, welche die Auswirkung eines verhältnismässig geringen Ausbauwiderstandes auf die Quellhebung im Sinne von Fig. 11 bestätigen, liegen bereits vor.

Im oben erwähnten Tunnel T 8 (Biel-Sonceboz) [7] wurden die Hebungen der Sohle rund 180 Tage lang beobachtet und der in Fig. 12 dargestellte zeitliche Verlauf der Sohlhebung gefunden. In der Folge wurde eine Aufschüttung von Ausbruchsmaterial angeordnet, deren Auflast

rund 60 kN/m^2 betrug. Während rund 85 Tagen wurde praktisch keine Sohlhebung mehr beobachtet. Sie kam erst wieder in Gang, nachdem die Auflast entfernt wurde. Obwohl nur rund drei Monate zur Beobachtung zur Verfügung standen darf man den Schluss ziehen, dass bereits ein geringer «Ausbauwiderstand» p_a eine sehr grosse Wirkung auf den Quellvorgang im Mergel auszuüben vermag.

Das zweite Beispiel haben wir dem Schrifttum entnommen [14]. Der Wagenburgtunnel in Stuttgart durchörtert stark quellfähige Schichten des Gipskeupers. Für das Quellen werden fein verteilter Anhydrit und Corrensit verantwortlich gemacht. In einem Querschlag zu einem Pilotstollen (Fig. 13) wurde die Sohle systematisch bewässert, wobei eine Strecke mit unbehinderter Sohlhebung und eine solche mit Verankerung während rund $5\frac{1}{2}$ Jahren beobachtet wurden. Es handelte sich um 8 Stück 600 kN Daueranker mit einer Haftstrecke von 5.0 m und 10.0 m Freispiellänge. Der in Fig. 13 angegebene Verlauf der beiden Sohlhebungskurven lässt den grossen Einfluss einer Belastung von rund 500 kN/m^2 durch die Anker klar erkennen.

Die extrem hohe Quellfähigkeit des Gebirges kommt durch die unbehinderte Sohlhebung von rund 0.6 m für eine Spannweite des Stollens von nur 3.0 m zum Ausdruck. Die Kräfte in den Ankern ergaben sich als Folge der Sohlhebung, die einen Betrag von rund 30 mm nicht überschritten haben. Die Anker haben nach $5\frac{1}{2}$ Jahren infolge von Korrosionserscheinungen und nicht durch Überbeanspruchung versagt.

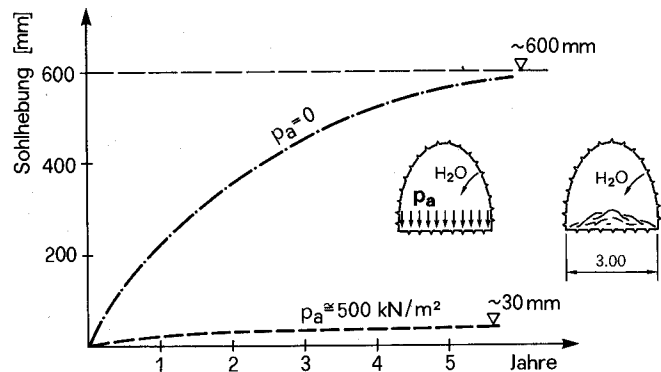


Fig. 13 Die Auswirkung eines Ausbauwiderstandes p_a infolge Ankerung im Gipskeuper bei künstlicher Bewässerung. (Henke, Kaiser, Reiche)

6. KONSTRUKTIVE MASSNAHMEN

Um den unerwünschten Äusserungen des quellenden Gebirges zu begegnen, können die in Fig. 14 angedeuteten Massnahmen ergriffen werden [7]. Die Anordnung eines widerstandsfähigen Sohlgewölbes sowie eine Systemankerung zielen auf die Unterdrückung der Sohlhebung hin, wobei als Reaktion erhebliche Quelldrücke auftreten können. Wir kennen nur ein Beispiel für eine Systemankerung im grossen Massstab, nämlich der bereits erwähnte Pfändertunnel bei Bregenz. Die Anordnung eines freien Raumes unter der Fahrbahnplatte eines Strassentunnels zielt auf das Ausweichen des Quelldruckes [11]. Die Lösung mit einer Knautschzone stellt eine Kombination der erwähnten Extremfälle dar, indem die Sohlhebung und die Entwicklung des Quelldruckes in einem beschränkten und kontrollierten Masse zugelassen werden.

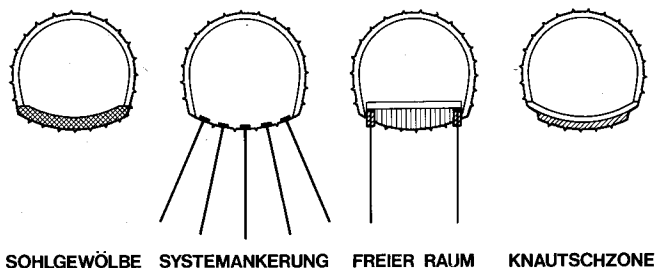


Fig. 14 Konstruktive Massnahmen im quellfähigen Gebirge

Die konstruktive Ausbildung bzw. die Bemessung der einzelnen Tragelemente des Ausbaues erfolgt basierend auf zwei Kriterien (Fig. 15). Zum einem muss eine genügende Tragreserve, d.h. eine hinreichende Sicherheit gegen Bruch vorhanden sein. Zum andern sollten die Verformungen, insbesondere die Hebung der Sohle in zulässigen Grenzen bleiben. Es gibt Fälle, wo das zweite Kriterium ausschlaggebend sein kann, beispielsweise bei Tunneln für Hochgeschwindigkeitszüge. Dort sind der Welligkeit der Geleise sowie ihrer Verwindung äusserst enge Grenzen gesetzt. Das blockweise Anheben des Tunnelprofils bzw. seiner Verdrehung kann in diesem Falle grössere Probleme verursachen als die Aufnahme grosser Quelldrücke. Die Besonderheiten der einzelnen baulichen Massnahmen und das Zusammenwirken des Ausbaues mit dem Gebirge lässt sich übersichtlich mit dem Kennlinienverfahren [11] veranschaulichen. In Fig. 16 ist wiederum die oben abgeleitete «halblogarithmische» Kennlinie dargestellt. Betrachten wir zunächst den Fall eines Sohlgewölbes. Infolge seiner hohen Steifigkeit ist die mögliche Sohlhebung sehr beschränkt. Demzufolge stellt sich ein Quelldruck ein, der sich weit vom Ursprung des Koordinatensystems und mehr in der Nähe des Extremwertes p_a^* befindet. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn nicht eine Quellhebung noch vor dem Einziehen des Sohlgewölbes (Trockenes Gebirge mit späterem Wasserzutritt) in Rechnung gestellt werden kann. Das andere Extrem stellt die offene Sohle dar. Das Einschalten einer Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Gebirge ergibt entsprechend den Verformungseigenschaften dieses Konstruktionselements das Wertepaar \bar{p}_a und \bar{u}_a . Welche Lösung bei einem konkreten Tunnelbauvorhaben zur Anwendung gelangen soll, hängt in erster Linie von den Quellparametern des Gebirges und den Bemessungskriterien (Fig. 15) ab. Bei kleineren Extremwerten p_a^* , welche mit Gewölbbestärken von 0.4 bis 0.5 m und mit mässiger Bewehrung aufgenommen werden können, scheint ein Sohlgewölbe die einfachste und wirtschaftlichste Lösung darzustellen. Die Lösung mit offener Sohle kommt nur dort in Frage, wo die maximale Sohlhebung sehr beschränkt bleibt. Hier fehlt der statisch günstige Ringschluss der Verkleidung, sodass bei grosser Sohlhebung ein Hereinschieben der Gewölbewiderlager (als ihre Begleiterscheinung) nicht ausgeschlossen werden kann. Im allgemeinen dürfte das Bauverfahren mit nachgiebiger Sohlstützung, d.h. das Anordnen einer Knautschzone, die problemgerechte Lösung für den Tunnelbau im quellfähigen Gebirge darstellen. Wir wollen uns deshalb ausführlicher mit diesem Bauprinzip befassen.

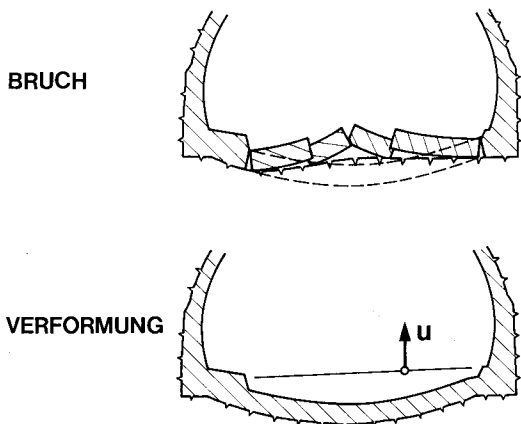


Fig. 15 Bemessungskriterien im quellfähigen Gebirge

6.1 Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Gebirge

Schon aus den Ausführungen Terzaghi's [5] geht die zwingende Gesetzmässigkeit einer mit zunehmender Quellverformung einhergehende Reduktion des Quelldruckes auf den Ausbau hervor. Der Gedanke eines nachgiebigen Ausbaues z.B. «durch das Einschalten einer zusammendrückbaren Schicht zwischen Verkleidung und Fels» wurde bereits von Grob [4] geäussert, doch die erste konstruktive Verwirklichung geht auf Lombardi zurück [10]. Er hat 1974 beim Buch-

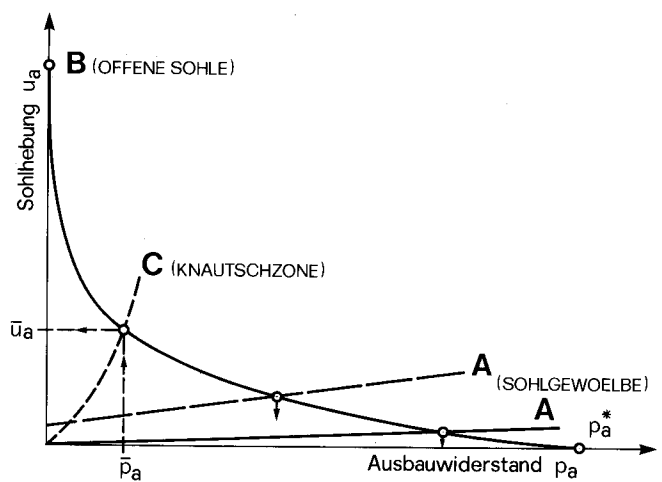


Fig. 16 Zusammenwirken Ausbau – Gebirge bei verschiedenen Ausbaukonzepten

bergtunnel eine 40 mm starke Styropor-Schaumplatte unter dem Sohlgewölbe angeordnet und anhand der Kennlinie des Gebirgs und jener der Schaumplatten die Vorteile des Konzepts dargelegt. Eine weitere Anwendung betraf die Auskleidung einer Kaverne der CERN Proton – Antiproton Anlage. Kovari und Amstad [3] haben 1978 beim Tunnel T8 eine Knautschzone mit Leichtbetonrippen verwirklicht, deren Höhe bis zu 300 mm betrug. Die Rippen quadratischen Querschnitts wurden im Abstand von 2.00 m eingebaut. Die zwischen ihnen verlegten Schaumstoffplatten dienten lediglich als Konterschaltung für das Betonieren des Sohlgewölbes. Die Rippen, als eigentliches Konstruktionselement, hatten zwei Aufgaben zu erfüllen. Sie dienen zum einen als Fundament für das Sohlgewölbe selbst im Falle eines ausbleibenden Quellvorgangs. Der Zuschlagstoff aus Blähton (Leca) ist resistent gegen chemische Einwirkungen, sodass sein Verrotten ausgeschlossen werden kann. Die zweite Aufgabe bestand darin, Sohlhebungen des Gebirges in einem vorausbestimmten Masse zuzulassen, ohne jedoch das Sohlgewölbe über einen ebenfalls vorausbestimmten Grenzwert zu belasten. Es wurden verschiedene Korngrössen und Zementdosierungen ausprobiert und schliesslich eine Mischung gefunden, welche die in Fig. 17 dargestellten Belastungs-Stauchungsdiagramme ergab. Man erkennt aus dieser Figur, dass die grösste Belastung des Gewölbes gleich zu Beginn der Quellhebung zu erwarten ist, da die Höchstfestigkeit des Leichtbetonmaterials wesentlich grösser ist als seine Restfestigkeit. Die letztere ist bedingt durch die innere Reibung des durch Risse geschwächten Materials, das neben einer Normalspannung auch durch Schubspannungen beansprucht ist, die auf den Auflageflächen auftreten. Es erhebt sich die Frage, warum die Rippen aus zusammenstauchbarem Leichtbeton und nicht aus normalem Beton hergestellt wurden, da ja das Gebirge zwischen den Rippen ohnehin die Möglichkeit hat, in den durch die Schaumstoffplatten ausgefüllten Zwischenraum einzudringen. Dazu muss man anmerken, dass der Mergelfels sehr fest war, sodass Rippen aus normalem Beton die Quellhebung im wesentlichen verhindert hätten und der Quelldruck anstelle einer Flächenbelastung in Form von Linienlasten in fast unverminderter Grösse aufgetreten wäre.

Der Tunnel T8 stellt einen Sonderfall dar, weil sein Bauprogramm langdauernde Feldmessungen zulies, welche als Grundlage der Bemessung des Ausbaues dienten. Auf der anderen Seite lagen hier nur sehr spärliche Ergebnisse aus Laboruntersuchungen vor. Die Bemessung der Rippen beruhte auf einer Abschätzung der Sohlhebung bei offener Sohle. Man erhielt den Betrag von rund 200 mm. Hierauf wurde die Rippenhöhe entsprechend ihrem Stauchvermögen nach Fig. 17 gewählt und das Sohlgewölbe ebenfalls der Stauchkurve und dem Rippenabstand entsprechend auf 100 kN/m² bemessen. Man sieht leicht ein, dass hierdurch eine zusätzliche Sicherheit erzielt wurde, welche allfällige Unsicherheiten in der Abschätzung der unbehinderten Sohlhebung zu kompensieren vermochte. Bei einer maximalen Überlagerung von 170 m und den vorliegenden Erkenntnissen über das Quellpotential des Gebirges wäre ein Ausbau ohne die

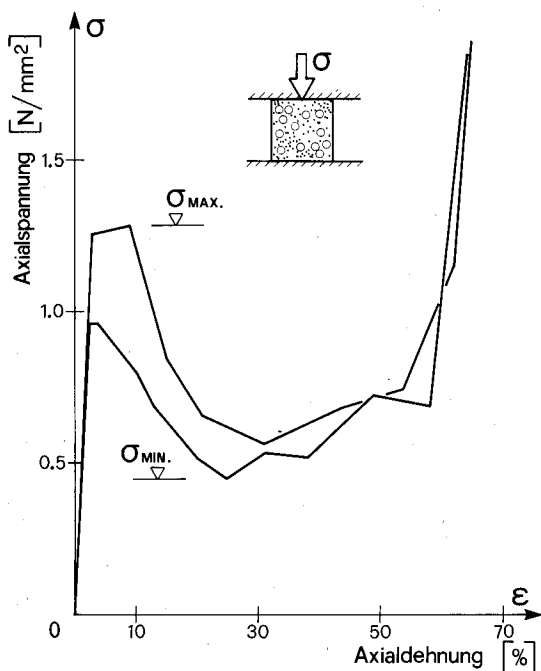


Fig. 17 Spannungs-Dehnungsdiagramm der Leichtbetonrippe für den Tunnel T8

nachgiebige Rippenkonstruktion nicht nur unwirtschaftlich, sondern wegen der Grösse des zu berücksichtigenden Quelldruckes kaum ausführbar gewesen. Die Langzeitbeobachtungen in zwei Messquerschnitten deuten allerdings darauf hin, dass der Quellvorgang im Gebirge langsamer abläuft als man aufgrund der Hebungen an der freien Tunnelsohle hätte erwarten können.

Als zweites Beispiel für die Anordnung einer Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Gebirge sei der Freudensteintunnel der Deutschen Bundesbahn angeführt. Dieser 6.8 km lange Tunnel bildet einen Bestandteil der Neubaustrecke Mannheim – Stuttgart [15]. Der Tunnel durchfährt auf einer Länge von 2.3 km von Ost nach West zunächst den wechselnd wasserführenden und unterschiedlich stark entfestigten ausgelaugten Gipskeuper. Anschliessend folgt der standfeste, nahezu ungeklüftete und staubrockene unausgelaugte Gipskeuper, der Serien von anhydritführenden und stark quellfähigen Tonsteinen enthält. Der ausgelaugte und der unausgelaugte Gipskeuper sind durch den sogenannten Gipsspiegel voneinander getrennt. An dieser Grenze spielen sich die aktiven Auslaugungsvorgänge in geologischen Zeiträumen ab. Da der Gipsspiegel einen langgezogenen, schleifenden Schnitt mit dem Tunnelrohr bildet, befindet sich die Tunnelsohle in einem längeren Bereich im stark quellfähigen Fels, während der Tunnelfirst in das ausgelaugte, oft lockergesteinsartige Material zu liegen kommt. Der Bergwasserspiegel steht hier rund 60 m hoch über dem Tunnel. Im folgenden soll nur das rund 4.1 km lange Teilstück West (6a) betrachtet werden, das den nicht ausgelaugten Gipskeuper durchörtert. Aus dem oben gesagten geht bereits eine Besonderheit dieses Tunnels hervor. Könnte der Wasserzutritt vom ausgelaugten zum nicht ausgelaugten Tunnelbereich während der ganzen Betriebszeit von rund 100 Jahren mit ausreichender Sicherheit verhindert werden, so würde die Quellfähigkeit des Gebirges überhaupt keine Probleme bieten. Doch das Durchsickern des Wassers entlang des Tunnelrohres vom nassen in den trockenen Bereich kann trotz noch so ausgeklügelter Abdichtungsmassnahmen noch völlig ausgeschlossen werden. Dies bewog das Projektierungsbüro von Anbeginn, das statisch günstige Kreisprofil für den quellfähigen Gebirgsbereich anzuordnen. Es zeigte sich während den Projektierungsarbeiten, dass aufgrund der laufenden Laborversuche das ursprüngliche Quellpotential des Gebirges als zu optimistisch eingeschätzt wurde. Die Gewölbstärke und die Bewehrung musste laufend den grösseren Quelldruckwerten angepasst werden. So gelangte man zu einem Ausbau mit einer Gewölbstärke von 1.70 m in der Sohle und 1.0 m im Tunnelscheitel. Doch angesichts von Laborwerten mit einem Quellmass von 30% und Quelldruck von über 6 N/mm² konnte selbst das stark ausgebildete Kreisprofil nicht als tragfähig ge-

nug betrachtet werden. Eine noch grössere Sorge bereiteten die zu erwartenden Hebungen des Tunnelrohres, welche die Brauchbarkeit des Tragwerkes selbst dann in Frage stellte, wenn das Gewölbe dem grossen Quelldruck standhalten würde. Eine Alternative bot der von den Verfassern ausgearbeitete Vorschlag mit dem Einschalten einer Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Gebirge. Damit konnte nicht nur der max. zu erwartende Quelldruck und damit auch die Hebungsbeträge für das Tunnelrohr wesentlich beschränkt werden, sondern man konnte statt des Kreisprofils ein abgeflachtes Sohlgewölbe wählen, das ausführungstechnisch gegenüber dem letzteren grosse Vorteile bietet. Das neue Projekt wurde in der Folge zur Ausschreibungsreife gebracht. (Dezernat der DB, Ingenieurbüro Bung, Prüflingenieur Dr. Kirschke). Die Vergabe der Arbeiten erfolgte im November 1986.

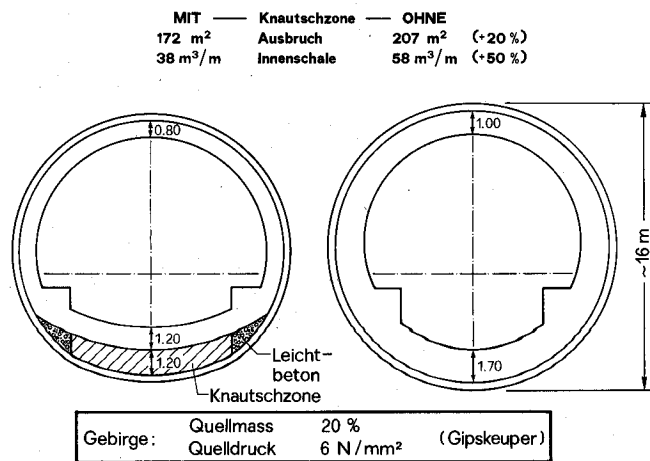


Fig. 18 Freudensteintunnel; Querschnittsgestaltung mit und ohne nachgiebiger Sohlstützung

Die Bemessung und die konstruktive Gestaltung des Ausbaues beruhen auf folgenden Annahmen:

- Das Gebirge ist im Sohlbereich homogen und folgt dem Quellgesetz nach Fig. 6. Seine Quellparameter sind: $\epsilon_0 = 20\%$ (Quellmass) und $\sigma^* = 6 \text{ N/mm}^2$ (Quelldruck).
- Der Formfaktor k für die Dehnungsverteilung im Fels (Fig.10) beträgt $\frac{1}{3}$ (parabelförmig).
- Die Steifigkeit des Felsens beträgt $E_F = 4'000 \text{ N/mm}^2$.
- Die Knautschzone sollte einerseits eine tragfähige Unterlage für den frischen Beton des Sohlgewölbes bilden und andererseits unter der Wirkung des Quelldruckes 30% komprimierbar sein, wobei der Quelldruck den Wert von 0.5 N/mm^2 nicht überschreiten darf.
- Für das Tunnelgewölbe wurde B35 für den Beton und BSt500 für die Bewehrung gewählt.

Die Berechnungen unter diesen Annahmen führten auf das Profil in Fig. 18. Ein Vergleich mit dem ursprünglichen Kreisprofil ohne Knautschzone zeigt bemerkenswerte Unterschiede in den Abmessungen bzw. in den Kubaturen des Ausbruches und des Gewölbebetons. Die Leichtbetonschultern dienen als zusätzliche Stützung des Gewölbes. Im Falle grosser Quelldrücke sind auch sie zusammenstauchbar, sodass die Kräfte, welche dort auf das Gewölbe übertragen werden, ebenfalls begrenzt sind.

Auf Veranlassung der Bauherrschaft wurde beim Westportal ein Untersuchungsbereich für die Durchführung einer Reihe von Feldversuchen eingerichtet, die auf alle noch offenen Fragen in Bezug auf das Quellen des Gipskeupers Antwort geben sollten. Es werden dort auch spezifische, auf die Probleme des Verfahrens mit nachgiebiger Sohlstützung ausgerichtete technologische Untersuchungen durchgeführt.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Der Quellvorgang im Gebirge kann mittels lückenloser Dehnungsmessung entlang von ausgewählten Bohrlöchern genau verfolgt werden. Dieser Verlauf gibt Auskunft über die in-situ Quellfähigkeit der einzelnen Schichten, über das Ausklingen der Quelldehnung mit der Entfernung von Hohlraum und schliesslich auch über die zeitliche Entwicklung des Quellens.

2. Aufgrund zweier überprüfbarer und einfacher Annahmen lässt sich eine Gebirgskennlinie für das «homogen» quellende Gebirge ermitteln. Die Berechnung beruht auf einem «Quellgesetz», das für das anhydrithaltige Gebirge wie für die Tongesteine eine Gerade im halblogarithmischen Massstab darstellt. Die zweite Annahme betrifft die Verteilung der Quelldehnung im Sohlbereich eines Hohlraumes. Die Natur der Vereinfachungen dieser Kennlinienbestimmung ist unmittelbar einsehbar, wobei ihre Begründung durch direkte Beobachtungen grundsätzlich möglich ist. Der primäre und der sekundäre Spannungszustand im Gebirge treten somit nicht in Erscheinung, weil ihre Auswirkung durch die angenommene Dehnungsverteilung indirekt mitberücksichtigt wird.

3. Überschreitet das Quellpotential des Gebirgs gewisse Grenzen, so scheint das Einschalten einer Knautschzone zwischen Tunnelgewölbe und Gebirge die sicherste und wirtschaftlichste Lösung zu sein. Dort, wo Sohlhebungen durch die Nutzung des Hohlraumes (z.B. im Verkehrstunnelbau) beschränkt werden müssen, wird die Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Tunnelsohle angeordnet. Im stark quellfähigen Gebirge, wie z.B. im Gipskeuper, dürfte die kontrollierte Zulassung von Sohlhebung durch die Knautschzone bei gleichzeitigem Auftreten von Ausbauwiderstand die einzig sichere konstruktive Lösung darstellen, welche die Gebrauchsfähigkeit des Tragwerks auf lange Zeiträume gewährleistet.

[1] Kovári, K., Amstad, Ch.: «Das Konzept der Linienbeobachtung» bei Deformationsmessungen, *Mitteilungen der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik* Nr. 102, 1981

[2] John, M., Wögrin, J. *Geotechnische Auswertung des Richtstollens für den Vollausschub am Beispiel Pfändertunnel, Rock Mechanics, Suppl. 8, 173-194 (1979)*

[3] Kovári, K., Amstad, Ch.: *Field Instrumentation in Tunnelling as a Practical Design Aid, Proc. of the 4th Int. Congress on Rock Mechanics, 1979, Montreux, Balkema, Rotterdam.*

[4] Grob, H.: *Schwellendruck im Belchentunnel, Berichte des Int. Symposiums für Untertagebau, Luzern, 1972*

[5] Terzaghi, K.: *Introduction to Tunnel Geology in Proctor, R. and T. White: Rock Tunnelling with Steel Support, Youngstown Printing Co., Youngstown, Ohio, USA Rev. 1968*

[6] Huder, J., Amberg, G.: *Quellung in Mergel, Opaliumston und Anhydrit, Schweiz. Bauzeitung, H.43, 1970*

[7] Kovári, K., Madsen, F.T., Amstad, Ch.: *Tunnelling with Yielding Support in Swelling Rocks, Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, 1981, Balkema, Rotterdam*

[8] Einfalt, H.: *Ergebnisse der Untersuchungen an den Calciumsulfatmineralien aus dem Gipskeuper Stuttgarts, Forschungsbericht, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 184, 1975*

[9] Henke, K.F., Kaiser, W., Nagel, D.: *Geomechanische Untersuchungen im Gipskeuper, Forschungsberichte, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 184, 1975*

[10] Lombardi, G.: *Rock Mechanics at the C.E.R.N. Proton - Antiproton Facilities, Proc. 4th. Int. Congress on Rock Mechanics, Montreux 1979*

[11] Lombardi, G.: *Underground Opening in Swelling Rock, Proc. of First National Conference on «Case Histories in Geotechnical Engineering» Lahore, 1984*

[12] Einstein, H.H., Bischoff, N., Hofmann, E.: *Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel, Berichte des Int. Symposiums für Untertagebau, Luzern, 1972*

[13] Wittke, W., Rissler, P.: *Bemessung der Auskleidung von Hohlräumen in quellendem Gebirge nach der Finite-Element-Methode, Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, 1976 H 2*

[14] Henke, K.F., Kaiser, W., Beiche, H.: *Verhalten von Tunnelbauwerken in quellfähigen Schichten des Gipskeupers. Bericht. 2. Nat. Tagung Ing. Geolog. Fellbach, BDR, 1979*

[15] Prommersberger G., Bokemeyer, R.: *Erkundungsstollen Freudenstein-Tunnel, Sonderausgabe (1. Internationales Tunnelbau-Symposium), Bauma, München 1986.*