

Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge

Prof. Dr. Kalman Kovári, Beratender Ingenieur
Dipl. Ing. Flavio Chiaverio, Aegerter & Bosshardt AG

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfahrung zeigt, dass zahlreiche Tunnelbauwerke in stark quellfähigem Gebirge wie Gipskeuper selbst in jüngerer Zeit saniert werden mussten. Dies ging unausweichlich mit einer vorübergehenden Einschränkung oder gar Einstellung des Tunnelbetriebes einher. Bei der Planung neuer bedeutender Verkehrsinfrastrukturprojekte sind Bestrebungen im Gange, die uneingeschränkte Verfügbarkeit der Bauwerke für 50 bis 100 Jahre sicher zu stellen. In stark quellfähigem Gebirge kann dieses Ziel mit dem neuen Ausbaukonzept „Modulares Knautschsystem“ erreicht werden. Dieses ermöglicht zum einen die Verringerung des Quelldrucks auf einen vorbestimmten Höchstwert, indem komprimierbare Elemente hoher Tragfähigkeit zwischen Tragwerk und Gebirge eingeschaltet werden. Zum anderen ist das Auswechseln dieser Elemente ohne Beeinträchtigung des Verkehrs jederzeit möglich. Dank dem direkten Zutritt in den durch Quellvorgänge gefährdeten Sohlbereich ist eine effiziente Wasserhaltung und eine einfache Kontrolle des Bauwerkverhaltens möglich. Das Modulare Knautschsystem hat sich beim Chienberg Strassentunnel in der Schweiz in Tunnelabschnitten mit Gipskeuper in der Sohle, Lockergestein über der Tunnelfirste sowie geringer Überlagerung bestens bewährt.

1. EINLEITUNG

Ton- und anhydritführende Gesteine haben die Eigenschaft ihr Volumen durch Aufnahme von Wasser zu vermehren. Man spricht vom Quellen dieser Gesteine. Beim Tunnelbau macht sich das Quellen durch Hebung der Sohle oder bei deren Behinderung durch Druck auf das Sohlgewölbe bemerkbar (Bild 1). Der Letztere wird als Quelldruck bezeichnet. Die Erfahrung zeigt, dass in vielen Fällen das Sohlgewölbe infolge des Quelldrucks zumindest streckenweise versagt und der Tunnel instand gesetzt werden muss. Bei geringer Überlagerung oder nachgiebigem Gebirge über dem Tunnel-scheitel kann die Tunnelröhre als Ganzes angehoben werden und gar eine Hebung der Geländeoberfläche auftreten [1]. Die bei diesem Vorgang in Tunnellängsrichtung auftretenden Hebungsdifferenzen führen unter anderem zu typischen Diagonalrissen in der Tunnel-schale, die ebenfalls Sanierungsmassnahmen zur Folge haben [2]. Dem Anheben des Bauwerkes sind insbesondere bei Eisenbahntunnel für Hochgeschwindigkeitszüge enge Grenzen gesetzt, so dass in diesem Falle die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit oft schwieriger zu erfüllen sind als jene der Tragfähigkeit.

Ein Blick auf die ältere und jüngere Geschichte des Tunnelbaus lässt erkennen, dass Tunnel in quellfähigem Gebirge, insbesondere in den im Schweizerjura und in

Süddeutschland weit verbreiteten anhydritführenden Gipskeuperformationen, schadensanfällig sind. Eine ganze Reihe von Tunnel mussten im Laufe der Zeit in einzelnen Abschnitten oft auch mehrmals saniert werden. Als Beispiele seien hier aus der Schweiz die Eisenbahntunnel Hauenstein, Ricken sowie die Autobahntunnel Belchen, Seelisberg [3] und der Wagenburg-Strassentunnel [2] in der Nähe von Stuttgart erwähnt.

Die Instandsetzungsarbeiten betreffen in der Regel den Abbruch eines bestehenden Sohlgewölbes, das Nachnehmen der Sohle, den Einbau eines neuen Sohlgewölbes oder gar den Ersatz der ganzen Tunnel-schale. Diese sind sehr zeit- und kostenaufwendig. Bislang wurde während solcher Arbeiten in der Regel eine Betriebseinschränkung oder gar eine vorübergehende Tunnelsperre in Kauf genommen. So wird beispielsweise der Tunnel nachts gesperrt, bei zweigleisigen Bahntunnel oder bei Strassentunnel der Verkehr auf einer Tunnelhälfte eingestellt oder bei zweiröhri-gen Autobahntunnel jeweils nur eine Röhre offen gehalten. Die erschwerten Arbeitsbedingungen führen zu einem langsamen Arbeitsfortschritt, so dass die Betriebseinschränkungen mitunter Jahre in Anspruch nehmen. Als Beispiel sei der oben erwähnte 8.1 km lange Hauenstein-Basistunnel südlich von Basel angeführt. Er wurde in den Jahren 1912 - 1916 erbaut und in den Jahren 1919 - 1923 das erste Mal instand gesetzt. Dessen neuerliche Sanierung (1980 - 1986) dauerte rund 6 Jahre [4].

In letzter Zeit ist ein Wandel in Bezug auf die Akzeptanz für grössere Betriebseinschränkungen feststellbar. Die modernen grossräumig zusammenhängenden Verkehrsinfrastrukturen rufen infolge des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens immer mehr nach uneingeschränkter Verfügbarkeit des Tunnelbetriebes. Dies zeigt sich am Beispiel des bereits erwähnten 2.3 km langen in den Jahren 1963 - 1970 erbauten zweiröhri-gen Belchentunnels der Nationalstrasse A2, der etwa die gleichen Formationen (Gipskeuper, Opalinuston) durchörtert wie der Hauenstein-Basistunnel [3], [4].

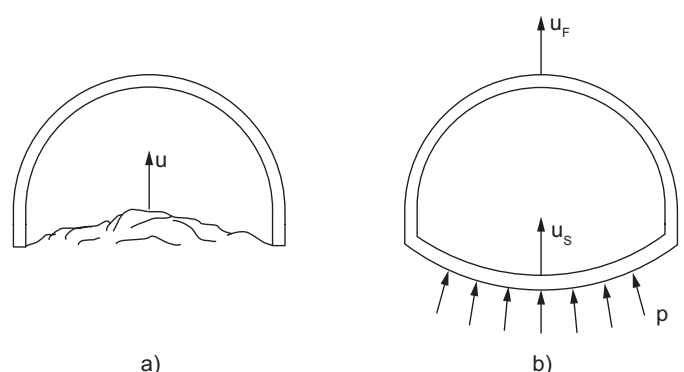


Bild 1: Auswirkung des Quellens im Tunnelbau [1]
a) Sohlhebung
b) Sohl- und Gewölbedruck mit/ohne Hebung der Tunnelröhre

Um im Tunnel umfangreiche Arbeiten zur Instandsetzung durchführen zu können und dennoch den Betrieb zu gewährleisten, wird zuerst eine dritte Röhre erstellt. Es geht dabei keineswegs um die Erhöhung der Kapazität, sondern ausschliesslich um die uneingeschränkte Erhaltung der Verfügbarkeit des bestehenden Bauwerkes.

Aus diesen Erörterungen geht hervor, dass in Zukunft für wichtige Tunnel in stark quellfähigen Formationen eine möglichst uneingeschränkte Gebrauchstauglichkeit gewährleistet werden soll. Diese Forderung kann mit dem von K. Kovári entwickelten Entwurfkonzept „Modulares Knautschsystem“ erreicht werden. Es verfolgt ein dreifaches Ziel. Zum einen sollte der auf das Tragwerk wirkende Quelldruck auf ein vorgegebenes Mass beschränkt werden, zum zweiten sollte stets die Möglichkeit bestehen, unterhalb des Fahrraumes ohne Einschränkung des Tunnelbetriebes Unterhaltsarbeiten durchzuführen und drittens eine wirksame Wasserhaltung gewährleistet werden. Das Konzept wurde zum ersten Mal im Chienbergtunnel angewendet, wovon im Folgenden noch berichtet wird [5].

2. DER QUELLVORGANG IN DER UMGEBUNG EINES TUNNELS

Die Erkenntnis, dass Quellvorgänge nur in ton- und anhydritführenden Gesteinsarten stattfinden und der Wasserzutritt eine Grundbedingung hierzu darstellt, geht bereits auf die Anfänge des Eisenbahnbaus in der Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Die das Quellen mit auslösende Rolle der Spannungumlagerung infolge des Ausbruchs wurde aber erst viel später von Terzaghi erkannt [6].

Das Quellen im Ton ist bedingt durch die innerkristalline osmotische Einlagerung von Wassermolekülen in die Blättchenstruktur der Tonmineralien wie Illit, Coresinit oder Montmorillonit. Aus Oedometerversuchen geht hervor, dass der Zusammenhang zwischen

Quelldruck σ und Quelldéhnung ϵ dem sog. Quellgesetz folgt, wonach ϵ mit $\log \sigma$ linear abnimmt [6], [7]. Das Quellpotential eines Gesteins ist gekennzeichnet durch das freie Quellmass ϵ_0 [%] und den maximalen Quelldruck σ_0 (bei gänzlich behinderter Quelldéhnung). Das Wertepaar ϵ_0 und σ_0 kennzeichnet das Quellpotential für eine Gesteinsprobe bzw. eine Gesteinsart. Bei tonhaltigen Gesteinen geht gemäss systematischen Laborversuchen in der Regel ein hoher Wert von ϵ_0 mit einem ebenfalls hohen Wert von σ_0 einher [8].

Das Quellen im Anhydrit ist bekanntlich chemischer Natur und bedingt durch die Umwandlung von Anhydrit in Gips. Hierbei ist unter besonderen Laborbedingungen eine Volumenzunahme von 61 % rein theoretisch möglich. Bei gänzlich behinderter Quelldéhnung wurden im Labor an kleineren Proben maximale Quelldrücke σ_0 von bis zu 8 MPa ermittelt, wobei der Endzustand des langsam ablaufenden Prozesses noch nicht erreicht wurde [9]. Bei anhydritführenden Gesteinen kann infolge der rein chemischen Natur der Prozesse die Gültigkeit des halblogarithmischen Quellgesetzes weder empirisch noch aufgrund theoretischer Betrachtungen nachgewiesen werden. Man kann lediglich zeigen, dass mit zunehmendem Quelldruck σ die zeitliche Entwicklung der Quelldéhnung ϵ in hohem Masse verlangsamt wird. Es wird vermutet, dass zumindest im Labor (geschlossenes System) in langen Zeiträumen das Zulassen von Quelldéhnung nicht zwingend mit einer Reduktion des maximalen Quelldruckes, bzw. dessen zeitlichen Endwertes verbunden ist [10]. Die im Versuchsstollen des Freudensteintunnels durchgeführten Grossversuche in 5 Versuchsfeldern mit unterschiedlichem Ausbauwiderstand (0, 0.1, 0.25, 0.5 und 0.75 MPa) haben gezeigt, dass die zeitliche Entwicklung der Hebung der Tunnelsohle durch zunehmenden Ausbauwiderstand wesentlich verlangsamt wird [3], [10]. Umgekehrt lässt sich sagen, dass auch im Anhydrit die zeitliche Entwicklung des Quelldrucks bei Zulassung schon geringer Quellhebung sehr stark abnimmt.

Blickt man nun auf mögliche Quellvorgänge, die sich in der Umgebung eines Tunnels abspielen können, so verdienen folgende Faktoren besondere Beachtung:

- Der Fels ist in der Regel inhomogen, so dass sich der Gehalt an quellfähigen Mineralien und somit das Quellpotential in engstem Raum stark ändern kann. Dies gilt sowohl im Profil wie auch entlang des Tunnels. Die Ergebnisse von Quellversuchen an Proben, die aus derselben Bohrung entnommen werden, sind in der Regel extremen Streuungen unterworfen.
- Die Durchlässigkeit des Gebirges ist infolge der Risse im Gestein, der Klüftung und Schichtung und der oft ver-

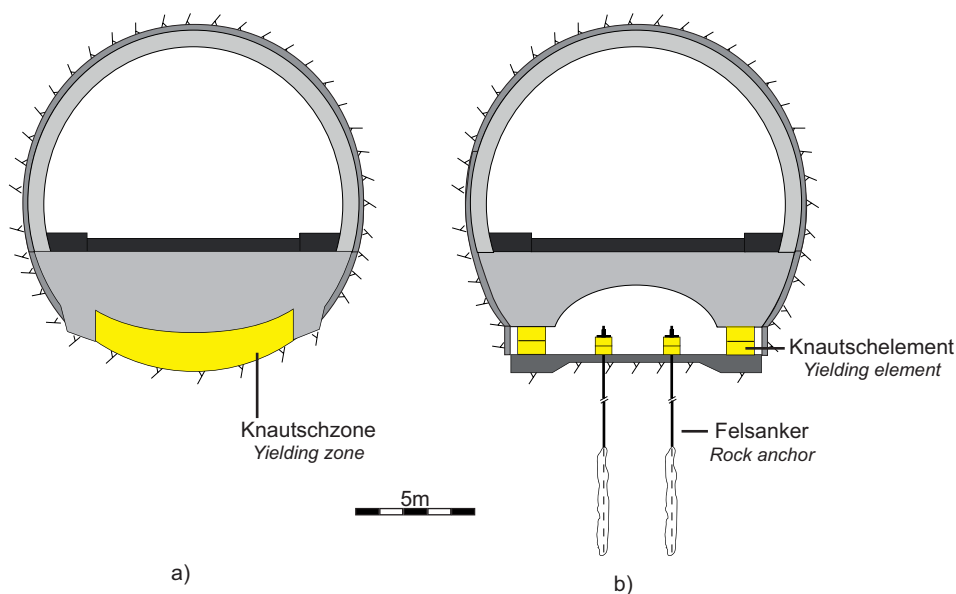


Bild 2: Ausweichprinzip
a) Flächenhaftes Knautschsystem
b) Modulares Knautschsystem

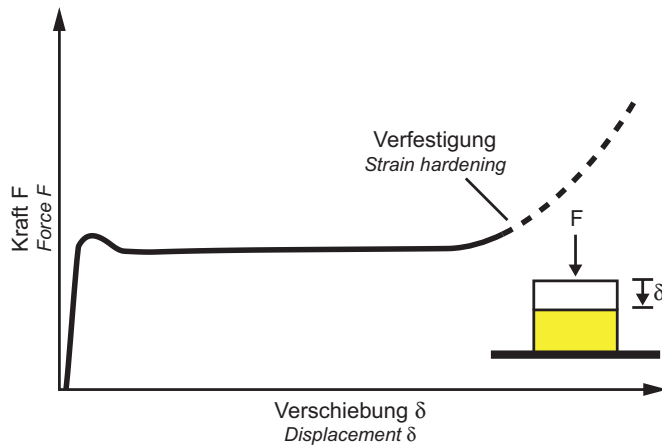


Bild 3: Arbeitsdiagramm Knautschelemente

setzen Schichtfugen starken örtlichen Schwankungen unterworfen. Man denke auch an eigentliche Verwerfungen und an nicht quellfähige, jedoch stark geklüftete Zwischenschichten im Gebirge mit besonders hoher Durchlässigkeit.

- Das Wasser kommt im Fels in Form von Porenwasser und als Kluftwasser vor. Das Wasserspeichervermögen des Gebirges ist grossräumig in der Regel stark veränderlich.
- Der Ausbruch des Hohlraumes bewirkt in seiner Umgebung eine Spannungumlagerung, die dort die Gebirgsdurchlässigkeit erhöhen kann.
- Infolge des Tunnelausbruchs entsteht unvermeidlich eine hydraulische Längsläufigkeit.
- Am Ausbruchrand des Tunnels fällt der Poren- und Kluftwasserdruck auf den atmosphärischen Wert, so dass gegen den Hohlraum eine Sickerströmung einsetzt.

Aufgrund von Beobachtungen und Messungen kann des Weiteren noch Folgendes festgehalten werden:

- Quellvorgänge finden in einem praktisch massgebenden Ausmass nur im Sohlbereich eines Hohlraumes statt. Bislang wurde nur eine Ausnahme von dieser Regel messtechnisch beim Chienbergtunnel (im Gipskeuper) beobachtet [5]. Dort finden Quellhebungen auf Sohlniveau auch seitlich der Tunnelröhre statt.
- Die Quelldehnung nimmt mit der Entfernung vom Hohlraum ab, um in einer Tiefe entsprechend etwa dem Durchmesser des Hohlraumes praktisch zu verschwinden [1].
- Quellvorgänge treten sehr rasch oder stark verzögert auf, ihre Intensität kann zeitlich stark variieren und sie können viele Jahrzehnte andauern [3].

Es steht fest, dass beim Tunnelbau in quellfähigem Gebirge, selbst wenn das Gebirge abschnittsweise als trocken prognostiziert wird, während der langen Betriebszeit mit dem Einsetzen von Quellprozessen zu rechnen ist. Dies ruft selbst bei einer äusserst effizienten Wasserhaltung während der Bauausführung nach einer fachkundigen Ausbildung des Tragwerkes.

3. ENTWURF UND KONSTRUKTION

Aus der obigen knappen Zusammenfassung unserer Erkenntnisse empirischer und theoretischer Art geht klar hervor, dass in der Phase der Projektierung der Prognostizierbarkeit der Quellprozesse für eine Betriebsdauer von rund 100 Jahren und insbesondere in anhydritführendem Fels enge Grenzen gesetzt sind [10]. Die Hauptursachen liegen wie oben erwähnt in der unzureichenden Kenntnis der Verteilung des Quellpotenzials des anstehenden Gebirges und der Wasserzufuhr zu den quellfähigen Materialien. Im Gipskeuper kommt noch die Unsicherheit betreffend des Zusammenhanges zwischen Quelldruck und Quellhebung hinzu.

Wie geht die Praxis mit den oben geschilderten grundsätzlichen Unsicherheiten bei dem Entwurf und der Konstruktion von Tunnel in quellfähigem Gebirge um? Es lassen sich folgende Schritte unterscheiden:

- Aufgrund der geologischen Untersuchungen, der Quellversuche im Labor und der Erfahrung bei anderen Bauwerken nimmt man für das Gebirge global geltende Eckwerte des Quellmasses ϵ_0 und des Quelldrucks σ_0 an und lässt sowohl für ton- als auch für anhydritführende Gesteine das halblogarithmische Quellgesetz gelten [1], [11]. Bei dem im Jahr 2000 eröffneten 5.3 km langen Adlertunnel der Schweizerischen Bundesbahnen mit einem Ausbruchdurchmesser der TBM von $\varnothing = 12.5$ m wurde beispielsweise ein maximaler Quelldruck von 4 MPa den tunnelstatischen Berechnungen (Tragsicherheit) zu Grunde gelegt [12]. Beim Engelberg-Basistunnel des Autobahndreiecks Leonberg wurde „die Grösse des anzusetzenden Quelldrucks in Abhängigkeit der Überlagerung zwischen 2 MPa und 6 MPa angenommen“ [13].
- Es wird eine Konstruktionsart gewählt und aufgrund der oben getroffenen Annahmen und unter Anwendung geeigneter Berechnungsverfahren eine Bemessung durchgeführt. Hierbei leistet die für das Quellen im Sohlbereich ermittelte Gebirgskennlinie wertvolle Dienste [1].
- Aufgrund einer Risikoanalyse wird das annehmbare Restrisiko infolge einer möglichen Überschreitung des maximalen Quelldrucks oder der zulässigen Hebung abgeschätzt. Bei den angenommenen Restrisiken spielt neben wirtschaftlichen Kriterien eine möglichst uneingeschränkte Verfügbarkeit des Bauwerkes eine grosse Rolle.
- Neue Erkenntnisse über das erwartete Gebirgsverhalten während der Bauausführung können die obigen Entscheide beeinflussen. Schon aus diesem Grunde kommt den baubegleitenden Deformationsmessungen eine grosse Bedeutung zu.

Um den unerwünschten Äusserungen des quellfähigen Gebirges zu begegnen, werden in der Praxis seit jeher zwei grundlegend verschiedene Konstruktionsprinzipien angewendet. Zum einen handelt es sich um das sog. Widerstandsprinzip, wonach mittels eines Sohlgewölbes die Hebung der Sohle verhindert und der sich hierdurch entwickelnde Quelldruck schadlos aufgenommen

werden soll. Zum anderen kommt das sog. Ausweichprinzip zum Zug, bei dem durch Einschalten einer Knautschzone zwischen Sohlgewölbe und Gebirge eine Hebung der Sohle in einem bestimmten Mass zugelassen wird, um dadurch den maximalen Wert des Quelldrucks zu vermindern.

Das Widerstandsprinzip ist die gängigste Lösung bei kleinerem bis mittlerem Quellpotential, kann aber bei hohem Quelldruck unwirtschaftlich werden. Bei geringer Überlagerung oder bei nachgiebigen Zonen im Firstbereich ist das Prinzip mit Risiken behaftet, da in solchen Fällen mit einer Hebung der Tunnelröhre als Ganzes zu rechnen ist, was sowohl die Gebrauchstauglichkeit wie auch die Tragsicherheit beeinträchtigen kann.

Beim Ausweichprinzip wird in der Sohle zwischen Gebirge und Verkleidung ein zusammendrückbares Medium eingeschaltet mit dem Ziel, durch Zulassung von Sohlhebung den maximalen Quelldruck zu vermindern. Beim Tunnel T8 der Hauptstrasse A16 im Schweizerjura wurde die Knautschzone mit nachgiebigen Stützrippen von quadratischem Querschnitt (0.3 x 0.3 m) im Abstand von 2.0 m verwirklicht [14]. Beim Freudensteintunnel der Deutschen Bundesbahn in der Nähe von Karlsruhe kam das „Flächenhafte Knautschsystem“ bestehend aus eingeschüttetem Blähton mit einer Stärke von 1.2 m zur Anwendung [1], [9]. Beim Engelberg-Basistunnel mit je drei Fahrstreifen und einem Ausbruchdurchmesser von 21 m beträgt die Stärke der aus solchem Blähton bestehenden Knautschzone 1.7 m [13].

Bei diesen Bauwerken wird damit gerechnet, dass sich die Zusammendrückbarkeit der eingeschalteten Knautschzone nicht vor Ende der geplanten Betriebsdauer erschöpft und dadurch ein unzulässig grosser Quelldruck auf die Tunnelsohle wirksam werden kann. Um das Risiko eines Rückschlages dieser Art und unzulässige Tunnelhebungen auszuschliessen, wurde das „Modulare Knautschsystem“ konzipiert.

4. DAS MODULARE KNAUTSCHSYSTEM

Wie schon durch diese Bezeichnung angedeutet, wird die Knautschzone aus einzelnen Elementen gebildet und das Profil so gestaltet, dass die Elemente während der Betriebszeit jederzeit zugänglich sind und damit nach Bedarf auch einzeln, ohne Beeinträchtigung des

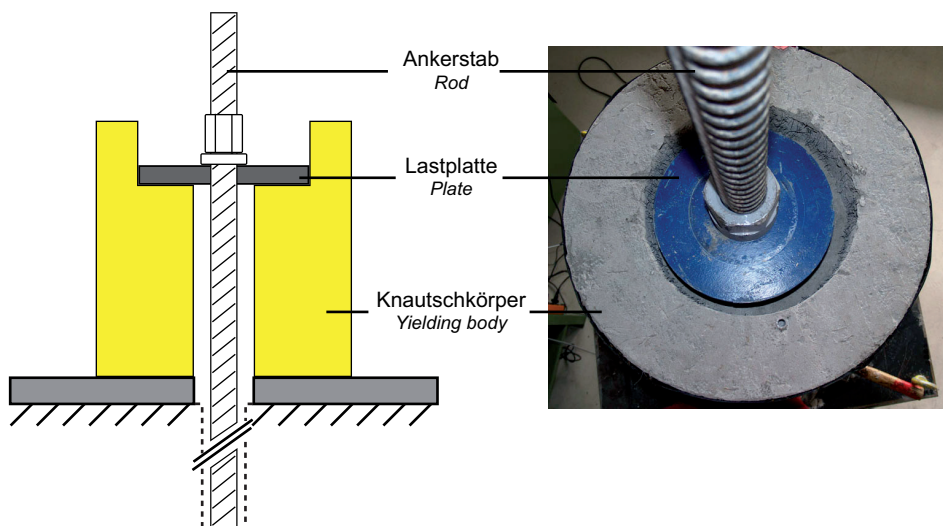


Bild 4: Knautschkörper mit Eindringprinzip

Tunnelbetriebes, ausgewechselt werden können. Das Konzept wird am Beispiel des Freudensteintunnels [1], [9] schematisch dargestellt.

Bild 2a zeigt das dort ausgeführte Flächenhafte Knautschsystem und auf Bild 2b ist ein möglicher Entwurf für das Modulare Knautschsystem dargestellt.

Anstelle der seitlichen Betonschultern werden Knautschkörper zylindrischer Form in geringem Abstand zueinander entlang des Tunnels aufgestellt. Sie dienen als Fundament für das gesamte Tragwerk und übernehmen den Gebirgsdruck in der Firste, das Eigengewicht und die Nutzlast. Ihre „Fliesskraft“, d.h. jene Kraft, bei der die Elemente ihre Zusammendrückung erfahren, muss entsprechend einem gewählten Sicherheitsfaktor grösser sein als die Summe der obigen Belastungen. Die Höhenlage der Foundation richtet sich nach der statisch erforderlichen Stärke des Betontragwerkes in der Tunnelmitte und der gewählten Höhe des darunter geschaffenen Freiraumes für den Unterhalt in der Tunnelsohle.

Die Quellhebung der flachen Sohle zwischen den Foundationselementen wird durch eine Reihe schwerer vorgespannter Anker gehemmt. Damit die Anker durch die Quellhebung nicht schon in kurzer Zeit ihre Tragfähigkeit einbüßen, werden die Ankerköpfe so ausgebildet, dass die Ankerkraft für ein bestimmtes Mass an Sohlhebung annähernd konstant bleibt. Es ist aus der Erfahrung bekannt, dass sich das Quellen entlang eines Tunnels trotz gleichen geologischen Bedingungen in extrem unterschiedlichem Ausmass äussert. Diese Tatsache ist nicht nur auf eine unterschiedliche Verteilung des Quellpotentials, sondern hauptsächlich auf die lokalen Bedingungen des Wasserzutritts aus dem Gebirge zu den quellfähigen Bereichen zurückzuführen. Gerade diesbezüglich erweist sich das Modulare Knautschsystem als sehr vorteilhaft, indem der Quellprozess einfach und direkt beobachtbar ist und Eingriffe jederzeit auch punktuell möglich sind.

Bei dem im Bild 2b angeführten Beispiel könnten die Fundationskörper typischerweise einen Durchmesser von $\varnothing_F = 1.0 - 1.5$ m und die Ankerköpfe einen solchen von $\varnothing_A = 0.6 - 1.0$ m aufweisen. Die Höhe der Knautschelemente entspricht etwa ihrem Durchmesser.

Die Tragkraft beim Knautschvorgang beträgt bei den Fundationskörpern $F_F = 5 - 10$ MN und jene für den Ankerkopf $F_A = 1.0 - 1.5$ MN. Die Elemente müssen erst nach einer Zusammendrückung von 0.4 - 0.5 m ausgewechselt werden. Bei dieser Gelegenheit muss die aufgequollene Sohle um den gleichen Betrag nachgenommen werden. Es ist selbstredend möglich, allfälliges der Sohle zusickerndes Gebirgswasser zu fassen und abzuleiten. Hierdurch kann die zeitliche Entwicklung des Quellens stark verzögert oder gar unterbunden werden.

Man erkennt, dass im Falle des Freudensteintunnels das Modulare

Knautschsystem etwa den gleichen Ausbruchquerschnitt beanspruchen würde wie das ausgeführte flächenhafte Knautschsystem. Paul und Wichter [2] haben ein ähnliches Tunnelprofil wie im Bild 2b mit einem planmässig angeordneten Freiraum für vollkommen ungehinderte Sohlhebung und „fest im Gebirge eingespannter Tunnelröhre“ vorgeschlagen.

Knautschelemente

Mit diesen Elementen lassen sich bei einer axialen Belastung Kraft-Verschiebungs-Diagramme gemäss dem Schema im Bild 3 erzielen. Erwünscht wird bei grosser gleich bleibender Kraft ein möglichst langer Arbeitsweg, bevor der Prozess einer zunehmenden Verfestigung einsetzt. Ein Verlust der Tragfähigkeit ist bei diesen Elementen ausgeschlossen. Sie bestehen im Hinblick auf die erforderliche Dauerhaftigkeit aus inerten Stoffen wie Zement, Sand, porenbildendem Glasschaum und Stahl in Form von Stahlfasern und Bewehrung. Die Einzelheiten der Konstruktion dieser besonderen Tragelemente (Form, Abmessungen, Matrix, Anordnung der Bewehrung, etc.) richten sich nach den spezifischen praktischen Anforderungen, die sie von Fall zu Fall erfüllen müssen. Allen Elementtypen zylindrischer, kubischer oder prismatischer Form ist jedoch der sich bei der Belastung abspielende mikro-mechanische Prozess gemeinsam. Es ist dies die bei behinderter Querdehnung schrittweise Schliessung der Poren. Die ersten Knautschkörper dieser Art wurden für den Tunnelbau in druckhaftem Gebirge entwickelt. Die in die Spritzbetonschale an mehreren Stellen im Profil eingefügten balkenförmigen Knautschelemente verleihen dieser eine hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitiger Zulassung von Gebirgsverformung (Konvergenz). Die erst später konstruierten Fundations- und Ankerelemente des Modulares Knautschsystems haben jeweils eine zylindrische Form aber unterschiedliche Arten der Krafteinleitung.

Der Fundationskörper befindet sich zwischen einem Betonfundament und der eigentlichen Tragkonstruktion des Tunnels. Infolge des Quellens in der Tunnelsohle erfährt der Körper eine Steigerung seiner Beanspruchung und nach dem Erreichen der sog. Fließkraft beginnt er nachzugeben. Es handelt sich hier um eine Axialbelastung, die aber auch im Sinne einer aufgezungenen Verformung aufgefasst werden kann. Theoretisch herrscht im Körper entsprechend der sog. „Fließspannung“ ein homogener Spannungszustand.

Das entsprechende Knautschelement für die Ankerelemente beruht auf dem Prinzip des Eindringens der Ankerplatte mit einem kleineren Durchmesser als jener des entsprechenden Knautschkörpers (Bild 4). Dieses System funktioniert auch bei einer allfälligen Exzentrizität der Krafteinleitung (Ankerkraft) einwandfrei.

5. ANWENDUNG IM CHIENBERGTUNNEL

Dieser Tunnel bildet einen Bestandteil der Hauptstrasse H2 von Liestal nach Sissach und liegt rund 25 km südöstlich von Basel. Er durchörtert unter anderem die typischen Juraformationen des Gipskeupers mit Sulfaten in Form von Anhydrit und Gips sowie verwitterten Mergel. Die bergmännisch aufgefahrene Länge des Tunnels beträgt 1.5 km. Entsprechend den erwarteten hohen Quelldrücken im Gipskeuper wurde ein nahezu kreisförmiges Profil mit einer Betonstärke der Innenschale zwischen 0.7 m und 1.1 m gewählt. Für Strecken mit geringer Überlagerung und quellfähigem Fels unter der Sohle wurde auch eine Variante mit einer flächenhaften Knautschzone - ähnlich dem Freudensteintunnel - entworfen. Infolge einer, wie sich später herausstellte, unzutreffenden Einschätzung des langfristigen Quellverhaltens des Gebirges wurde jedoch auf die Anwendung verzichtet. Der Tunnel wurde in der Spritzbetonbauweise mit Kalottenvortrieb aufgefahren. Wegen den erwarteten Quellerscheinungen in der Sohle wurde der Ringschluss der Innenschale dem Kalottenausbruch in der Weise nachgezogen, dass er spätestens innerhalb von 25 Wochen bzw. in einem maximalen Abstand von 450 m zu erfolgen hatte. In einem ersten Streckenbereich (rund 90m Länge) mit einer Überlagerung von rund 25 - 30 m, Gipskeuper in der Sohle und verwitterter Mergel über der Firste, wurden bereits 4 Monate nach dem Ringschluss der Innenschale Hebungen der Tunnelfirste und solche an der bebauten Terrainoberfläche durch Kontrollmessungen festgestellt. In einem zweiten Bereich (rund 140 m Länge) mit Überlagerungshöhen von rund 40 - 50 m setzte sich das gleiche Phänomen mit ähnlichem Zeitverlauf in Gang. Nach rund einem Jahr betrug im ersten Hebungsbereich die maximale Firsthebung 83 mm und im zweiten 30 mm. An der bebauten Geländeoberfläche entstand eine Art Buckel mit einer Ausdehnung von bis zu 50 m quer zur Tunnelachse.

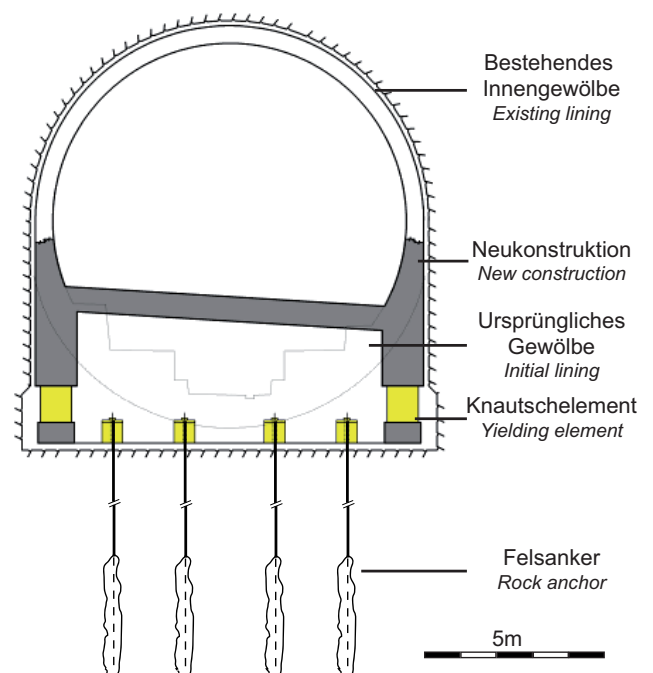


Bild 5: Chienbergtunnel - Umbau auf „Modulares Knautschsystem“



Bild 6: Chienbergtunnel - Sohlbereich unter der Fahrbahnplatte

Zu dieser Zeit erreichte die Firsthebung eine maximale Geschwindigkeit von rund 4.5 mm/Monat.

Aus Deformationsmessungen im Baugrund hat sich herausgestellt, dass grössere Gebirgsbereiche nicht nur unter der Sohle, sondern auch seitlich des Tunnels vom Quellen erfasst wurden, was die Fertigstellung des Tunnels in Frage stellte.

In dieser Situation kam nach Prüfung zahlreicher Varianten das Modulare Knautschsystem mit den Möglichkeiten der neu entwickelten Knautschelemente zum Einsatz. Es handelte sich somit um die Sanierung eines bestehenden Tunnels, noch vor seiner Eröffnung, in insgesamt zwei Abschnitten mit einer Gesamtlänge von 430 m. Die Einzelheiten des neuartigen Ausbaukonzeptes und dessen Realisierung, sowie die ersten Erfahrungen seit der Eröffnung des Tunnels im Dezember 2006 wurden anderswo [5] näher beschrieben.

Im Folgenden wollen wir nur auf die wichtigsten Schritte beim eigentlichen Umbau des Tunnels eingehen (Bild 5). Dem Abbruch der unteren Hälfte der Innenschale und der Aufweitung des Querschnittes zu einem Hufeisenprofil mit flacher Sohle folgte die Erstellung einer neuen Betonkonstruktion mit den Paramenten und der Fahrbahnplatte. Die erwartete, mehr oder weniger intensive Quellhebung in der Sohle wird durch vier Reihen vorgespannter Anker in ihrer zeitlichen Entwicklung gehemmt.

Die Tragkonstruktion selbst wird von den Paramenten über die Knautschelemente direkt auf den Fels fundiert. Es wurden insgesamt 570 solche Fundationskörper mit

einem Durchmesser von 0.9 m und einer Fließkraft von 4.5 – 7.5 MN (je nach Überlagerungshöhe) verlegt.

Bild 6 zeigt den begehbaren Raum unter der Fahrbahnplatte mit den nachgiebigen Ankerköpfen und den seitlich angeordneten Fundationskörpern. Der Erfolg der Umbaumassnahmen, d.h. die Unterbindung der Hebungen der Tunnelfirste, ist aus den Kontrollmessungen erkennbar. Bild 7 zeigt Beispiele für die zeitliche Entwicklung von Firsthebungen in zwei Hebungs-bereichen. Rund 3.5 % der Fundationskörper steht bereits unter einem so hohen Quelldruck, dass sie entsprechend der gewählten „Fließkraft“ nachgeben. Ihre Zusammendrückung beträgt derzeit bis über 30 mm. Die Entwicklung der Deformationen deutet nach rund einem Jahr darauf hin, dass vor Ablauf von ca. 25 Jahren für nur etwa 15 % aller Fundationskörper die Notwendigkeit eines Auswech-selns besteht.

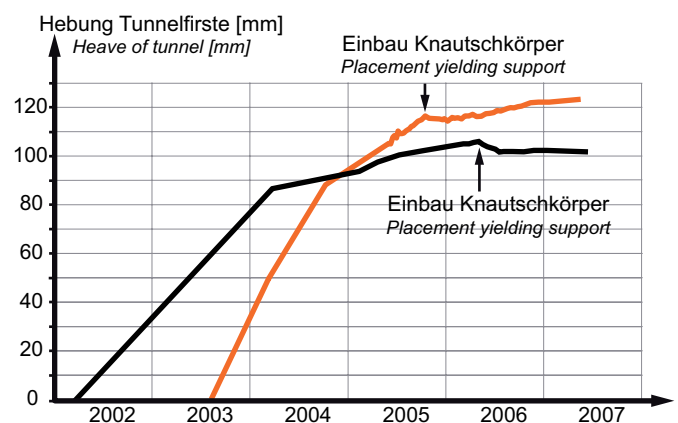


Bild 7: Chienbergtunnel - Entwicklung der Firsthebung in zwei Tunnelbereichen

6. LITERATUR

- [1] Kovári, Kalman; Amstad, Christian, Anagnostou, Georg: Tunnelbau in quellfähigem Gebirge, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, No.115, Mai 1987
- [2] Paul, Axel; Wichter, Lutz: Das Langzeitverhalten von Tunnelbauwerken im quellenden Gebirge – Neuere Messergebnisse vom Stuttgarter Wagenburgtunnel, Taschenbuch für den Tunnelbau, Verlag Glückauf, Essen, 1996
- [3] Amstad, Christian; Kovári, Kalman: Untertagbau in quellfähigem Fels, Forschungsbericht 52/94, Bundesamt für Strassen (ASTRA) Bern, März 2001
- [4] Kovári, Kalman; Descoedres, Francois: Tunnelling Switzerland, Swiss Tunnelling Society, 2nd edition 2002
- [5] Hofer, Ruedi; Chiaverio, Flavio; Kovári, Kalman: Chienbergtunnel Sissach Tunnelhebung infolge Quellen, Swiss Tunnel Congress 2007 Luzern, Tagungsband, FGU Fachgruppe Untertagbau Juni 2007
- [6] Terzaghi, Karl: Rock Defects and Loads on Tunnel Supports, Rock Tunnelling with Steel Supports, R. V. Proctor and Th. White, Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, Ohio, USA, 1946
- [7] Huder, Jachen; Amberg, Georg: Quellung im Mergel, Opalinuston und Anhydrit, Schweizerische Bauzeitung, 43, 1970
- [8] Madsen, Franz, Müller Vonmoos, Markus: Das Quellverhalten der Tone, Tonmineralogie und Bodenmechanik, Mitteil. des Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich, Nr. 133, 1988
- [9] Kirschke, Dieter; Kovári, Kalman; Prommersberger, Gerhard: Bemessungsgrundlagen und Konstruktion der Sohle des Freudensteintunnels, Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart, Nr. 7, (1991)
- [10] Anagnostou, Georg: Zur Problematik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge, Mitteilungen der Schweiz. Ges. für Boden- und Felsmechanik, Band 154, 2007
- [11] Wittke, Walter; Wittke, Martin; Wahlen, Roman: Zum Quellgesetz für den anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper; Geotechnik 27, Nr. 2, 2004
- [12] Chiaverio, Flavio; Hürzeler, Daniel: Der Adlertunnel, Schweizerische Bauzeitung, sia Nr. 18, 1996
- [13] André, Peter: Engelberg-Basistunnel und Autobahndreieck Leonberg; Landesamt für Strassenwesen BadenWürttemberg, 1999
- [14] Kovári, Kalman; Madsen, Franz; Amstad Christian: Tunnelling with Yielding Support in Swelling Rocks, Proc. Int.Symp. on Weak Rock, Tokyo, 1981