

Kolloquium „Tunnel in anhydritführendem Gebirge“. ETH Zürich, 3.4.2014

Begleitender Textbeitrag zum Vortrag „Engelbergtunnel“

Zusammenfassung

Das Thema dieser Vortragsreihe lautet: „Tunnel in anhydritführendem Gebirge“. Derartiges Gebirge ist gefürchtet wegen seiner Neigung zum Quellen. Unter „Quellen“ wird die Ausdehnung eines Gesteins infolge von Wasseraufnahme verstanden. Hauptanliegen des vorliegenden Beitrags ist es, auf die beträchtlichen Unterschiede zwischen Quellvorgängen in Ton und Tonstein einerseits, und in anhydrithaltigem Ton- oder Mergelstein andererseits hinzuweisen. Nach der Überzeugung des Autors sind die Unterschiede so groß, dass man eigentlich von zwei verschiedenen Phänomenen sprechen muss. Schon Leopold Müller hat deshalb getrennte Begriffe einzuführen versucht: „Quellen“ für Ton und „Schwellen“ für Anhydrit. Bedauerlicherweise hat sich diese Terminologie nicht durchsetzen können, vermutlich auch wegen der Verwendung des Wortes „swelling“ in die englische Sprache für beide Vorgänge. Die damit verbundene Gleichsetzung hat jahrzehntelang die Erforschung des Anhydritschwellens behindert. Die Entwicklung von Rechenansätzen und von technischen Lösungen für Tunnel in Anhydritgestein befindet sich letztlich immer noch in einer Frühphase. Dagegen kann das Problem des Tonquellens als weitestgehend gelöst angesehen werden.

1. Grundsätzliche Bedeutung des Quellens für den Tunnelbau

Die Ausdehnung von Gestein infolge von Wasseraufnahme kann sich im Tunnelbau sowohl beim Vortrieb, als auch langfristig während der Nutzungszeit des fertigen Bauwerks auswirken. In manchen Fällen beschränken sich quellbedingte Probleme auf die Phase vor dem Einbau der endgültigen Auskleidung, in anderen beginnen sie erst danach. Vielfach ist das Quellen in beiden Phasen von Bedeutung. Entscheidend ist hierbei, wann der Quellvorgang einsetzt und wann er zum Stillstand kommt.

Quellen von Gestein setzt ein, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

- Ein Spannungszustand, in dem sich das Gestein hinsichtlich des Quellens in einem Ruhezustand befand, wird durch Entlastung gestört.
- Das für den Quellvorgang erforderliche Wasser steht zur Verfügung.

Die erste Voraussetzung wird beim Tunnelbau durch den vorgenommenen Ausbruch eines Hohlraums auf jeden Fall erfüllt. Vom Augenblick seiner Freilegung ist ein grundsätzlich quellfähiges Gestein zur Aufnahme von Wasser bereit.

Die zweite Voraussetzung ist in den für ein Quellen in Betracht kommenden tonigen Gesteinsarten wegen der geringen Durchlässigkeit des Gebirges häufig am Anfang nicht erfüllt. Solange kein Bergwasser zutritt, kein Brauchwasser verschüttet und das in frischem Spritzbeton enthaltene Wasser von diesem selbst zum Abbinden benötigt wird, findet kein Quellen statt. Allerdings ist dieser Zustand meistens nicht von Dauer. Vor allem bei einer Lage unter dem Bergwasserspiegel findet das Wasser nach kurzer Zeit irgendwo seinen Weg in den Tunnel. Wo ein Tunnel einen wasserführenden Horizont direkt anschneidet, lässt sich ein Vordringen des Wassers in zunächst trockene Bereiche selbst mit aufwändigen Abdichtungsinjektionen und Abschottungen nicht verhindern. Aber auch bei einem größeren Abstand von einem Aquifer über dem Tunnel gibt es immer einmal wieder einen latent angelegten Wasserweg, der durch die neugeschaffene Vorflut aktiviert wird. Hat das Wasser den Hohlraum erst einmal erreicht, verteilt es sich in der Auflockerungszone und vor allem in der Sohle auch längs des Tunnels. Als Regel ist davon auszugehen, dass sich die Bewässerung von quellfähigem Gestein im Tunnelbau zumindest nicht auf Dauer verhindern lässt.

Quellen bereits während des Vortriebs beschränkt sich zunächst überwiegend auf die jeweilige Ausbruchsohle. Ist diese Sohle ungesichert, so kommt es zu Hebung, Auflockerung und Zerfall. Hiervon ist anfangs vor allem der Fahrbetrieb betroffen, ähnlich wie bei wasserempfindlichem, aber nicht quellfähigem Gestein. Wo der Zerfall bis unter die Füße der Spritzbetonsicherung des Gewölbes reicht, wird dessen Standsicherheit gefährdet. Als Folge treten Senkungen, Konvergenzen und Grundbrüche auf. Sobald man derartige Vorgänge durch den Einbau einer Sohlsicherung, z.B. eines temporären Kalottensohlgewölbes, zu verhindern sucht, stellt sich eine Bemessungsaufgabe. Die Behinderung der freien Quellhebung durch ein Bauteil ist gleichbedeutend mit dem Aufbau eines Quelldrucks. Dieser muss als Lastfall in die statischen Nachweise für die jeweilige Bauphase einbezogen werden. Ist der Quelldruck größer als die sowieso auftretende Bettungsreaktion, so hat er Einfluss auf die Bemessung. Insbesondere in Sohlmitte kann sich hieraus eine stärkere erforderliche Bewehrung ergeben.

Sehr wesentlich für den weiteren Bauablauf ist es, ob zum Zeitpunkt des planmäßigen Einbaus der Innenschale

- ein zumindest vorläufig stabiler Zustand des gesicherten Hohlraums besteht, und
- der vorhandene Lichtraum trotz der stattgefundenen Quellvorgänge noch für die Innenschale ausreicht.

Gegebenenfalls muss nachprofilert werden, was vom Nachsenken der Sohle bis zum Überfirsten reichen kann. Bei der damit verbundenen Erneuerung der Sicherung kann zugleich auch jede für erforderlich gehaltene Verstärkung vorgenommen werden.

Als schlimmstes Szenario kann es passieren, dass ein angelaufener Quellvorgang zum vorgesehenen Zeitpunkt des Sohleinbaus noch in voller Intensität anhält. Die Hebungsrates ist so groß, dass eine nachprofilerte und erneuerte Sohlsicherung bereits nach kurzer Zeit wieder im Unterprofil liegt oder zerstört wurde. Dann ist entweder schon der Einbau der endgültigen Sohle nicht mehr möglich, oder dieses Bauteil wird bis zum endgültigen Ringschluss (Gewölbeeinbau) in einem unzulässigen Ausmaß angehoben. Derartige Vorfälle hat es mehrfach beim Tunnelbau in anhydrithaltigem Tonstein gegeben, worauf im Kapitel 4 noch näher eingegangen wird.

Im Prinzip setzen sich die Quellvorgänge aus der Vortriebsphase nach dem Einbau der Innenschale fort. Es ist aber auch möglich, dass sie dann überhaupt erst einsetzen, weil das Wasser nur sehr langsam seinen Weg zum quellfähigem Gestein gefunden hat. Im Gegensatz zur Vortriebsphase kann man in der Nutzungsphase eines Tunnels weder Hebungen einer befahrenen Sohle, noch Beschädigungen der Auskleidung hinnehmen. Das Offenlassen der Sohle als einfachstes Mittel, den Aufbau von Quelldruck zu vermeiden, scheidet daher in der Regel aus. Eine planmäßige Nutzung der Fahrbahn wäre bald nicht mehr möglich. Zugleich würde die Standsicherheit des Gewölbes durch die an den Füßen stattfindenden Auflockerungen und Verschiebungen ernstlich gefährdet.

Zur Beherrschung des Quellens über die volle vorgesehene Nutzungsdauer eines Tunnels gibt es drei Möglichkeiten:

- Die Innenschale wird erst eingebaut, wenn das Quellen in einem hinreichenden Maße abgeklungen ist.

- Die Innenschale wird so stark ausgebildet, dass sie den bei Behinderung der Quelldehnung zu erwartenden Druck aufnehmen kann.
- Dem quellfähigen Gestein wird außerhalb der Innenschale in einem gewissen Umfang Gelegenheit zur Ausdehnung gegeben. Die Innenschale wird auf einen reduzierten Quelldruck bemessen. Der Bemessungsdruck kann einem irgendwann erwarteten stabilen Gleichgewichtszustand entsprechen, in dem sich das Quellpotential erschöpft hat. Bei sehr lang anhaltenden Vorgängen ist grundsätzlich auch eine Bemessung auf den bei Ablauf der vorgesehenen Nutzungsdauer erwarteten Quelldruck möglich.

Für alle drei Konzepte ist als Grundlage der Planung eine genaue Kenntnis des Quellverhaltens unverzichtbar. Auf die Versuchstechniken und Bewertungskriterien wird im Kapitel 2 näher eingegangen. Wegen der niemals ganz auszuräumenden Unsicherheiten ist es zumindest bei starker und langanhaltender Quellneigung des Gesteins erforderlich, das fertige Tunnelbauwerk hinsichtlich Lage, Verformung und Beanspruchung auf Dauer messtechnisch zu überwachen. Hieraus kann sich im Sinne der Beobachtungsmethode sowohl eine verkürzte, als auch eine verlängerte Nutzungsdauer ergeben.

2. Versuchstechniken und theoretische Ansätze

Zur Untersuchung des Setzungsverhaltens von Böden werden seit Terzaghi Kompressionsgeräte (Ödometer) verwendet. Jedes bodenmechanische Labor besitzt derartige Versuchseinrichtungen. Die Probe wird – gestört oder ungestört – in einen Ring von 7 – 10 cm Durchmesser eingebaut. Nach unten und oben wird die ca. 2 cm dicke Probe durch starre, aber poröse Platten begrenzt. Die Belastung findet über diese Platten statt, ebenso ein möglicherweise erforderlicher Abbau von Porenwasserüberdruck. Die Last wird als Gewicht über einen Hebelmechanismus aufgebracht und kann durch Hinzufügen oder Wegnehmen einzelner Gewichte geregelt werden. Sie wirkt als Totlast, ändert sich also nicht durch den Versuchsablauf. Die infolge der Belastung eintretende Setzung wird mit Messuhren erfasst.

Die Setzung von nicht auskonsolidiertem Ton beruht zu einem großen Teil auf dem Auspressen von Porenwasser. Als Umkehrung dieses Vorgangs führt die Aufnahme von Wasser zu einer Hebung. Dies bezeichnet man als Quellen. Ödometer sind bei Bewässerung der Proben über die Filterplatten auch zur Untersuchung des Quellverhaltens geeignet. Dies gilt nicht nur für Boden, sondern auch für Gestein. Die Proben müssen hierbei

durch eine geeignete mechanische Behandlung genau auf die Form des Begrenzungsringes gebracht werden. Unbedingt zu beachten ist, dass der natürliche Wassergehalt der Probe bei deren Vorbereitung verändert werden kann. Das Quellvermögen des Gesteins wird dann möglicherweise aufgrund des Versuchsergebnisses falsch eingeschätzt. Eine nass bearbeitete Probe quillt zu wenig, eine ausgetrocknete Probe täuscht bei ihrer Bewässerung eine zu hohe Quellfähigkeit vor. Gerade der letztgenannte Effekt führt an Tonstein häufig zur Ermittlung unrealistisch großer Quelldrücke.

Ein anderer verfälschender Effekt ist das Aufblättern der Probe bei einem Quellen ohne nennenswerte Auflast. Bei der Wasseraufnahme quillt das Gestein nicht einheitlich, was auf eine lokal variierende Quellfähigkeit, aber auch auf Unterschiede der Durchlässigkeit zurückzuführen ist. Infolge dessen kommt es zu einer Zerlegung in Schichten, die sich unterschiedlich verformen und dabei Hohlräume entstehen lassen. Die hiermit verbundene scheinbare Volumenzunahme kann die eigentliche Quelldehnung übersteigen. Zur Verhinderung einer solchen Verfälschung müssen Quellhebungsversuche immer mit einer Mindestauflast, beispielsweise 100 kN/m^2 , gefahren werden.

Zur Ermittlung des maximal möglichen Quelldruckes werden Quelldruckversuche durchgeführt, bei denen die Dehnung der Probe nach deren Bewässerung vollständig verhindert wird. Unter Verwendung der überall verfügbaren Ödometer lassen sich Quelldruckversuche in einfacher Weise durch Aufbringen einer möglichst großen Auflast realisieren. Übersteigt die dadurch erzeugte Druckspannung den maximal möglichen Quelldruck, so findet keine Hebung statt. Die Last kann dann schrittweise verringert werden, bis die Messuhren erstmals eine Hebung anzeigen. Nach dem Abklingen dieser Hebungsphase wird die Last in mehreren Schritten weiter reduziert, wobei auf jeder Stufe der jeweilige Endwert der Hebung abgewartet wird. Dies wird fortgesetzt, bis das Quellvermögen aufgebraucht ist bzw. der Quellvorgang wegen zu geringer Auflast irregulär wird.

Vorstehend beschriebene Versuchstechnik, üblicherweise als Quelldruckversuch nach Huder und Amberg bezeichnet, ist für Quelldruckversuche an Tonsteinproben grundsätzlich gut geeignet. Die mit einem Standardgerät aufbringbare Spannung in der Größenordnung von 4 MN/m^2 reicht immer aus, um sich dem gesuchten maximalen Quelldruck von oben zu nähern. Ausgehend von diesem Wert kann für das Wertepaar Quelldruck/zugelassene Dehnung eine Kurve abgefahren werden. Auf diese Weise bekommt man z.B. eine Aussage, welchen Quelldruck eine Probe nach Zulassung einer Dehnung um 1 % oder 2 % noch entwickeln kann.

Ein nicht zu übersehender Nachteil des Huder-Amberg-Versuches liegt darin, dass man den Anstieg des Quelldrucks nach der Bewässerung der Probe nicht messen kann. Es muss immer erst abgewartet werden, bis der entstandene Quelldruck die aufgebrachte Totlast überwindet. Senkt man die Totlast angesichts fehlender Reaktion der Probe ab, so besteht die Gefahr, dass der tatsächliche Maximalwert dabei unterschritten und deshalb gar nicht festgestellt wird. Bei manchen quellfähigen Gesteinen ist auch nicht auszuschliessen, dass sich bei den beiden möglichen Annäherungen an den Maximalwert unterschiedliche Vorgänge abspielen. Ein Quellen unter hoher Auflast könnte zu einem anderen Endwert führen als bei einem Druckaufbau allein durch Quellen unter Verhinderung der Ausdehnung. Der Autor ist überzeugt, dass der letztgenannte Ablauf realistischer ist.

Völlig anderer Versuchsabläufe lassen sich mit speziell für Quellversuche gebauten oder in geeigneter Weise umgerüsteten Geräten durchführen. Derartige Geräte werden sehr steif ausgebildet und erlauben alternativ die völlige Blockierung jeder Probenhebung, einen kraftgesteuerten und einen weggesteuerten Versuchsablauf. Probendehnung und Belastung können jederzeit gemessen, aber auch entsprechend dem gewählten Ablauf beliebig geregelt werden. Damit ist es möglich, z.B. zwischen Phasen mit Hebung unter konstanter Belastung und Phasen des Druckaufbaus bei konstanter Probenhöhe zu wechseln. Diese Steuerungstechnik hat sich vor allem bei den Quellversuchen an Proben vom Freudensteintunnel als sehr nützlich erweisen. Hierauf wird im Kapitel 4 noch näher eingegangen.

Zur Bewertung und weiteren Verwendung von Versuchsergebnissen ist es wünschenswert, die zugehörige Gesetzmäßigkeit zu kennen. Bei rein elastischem Verhalten wäre dies beispielsweise der Elastizitätsmodul. Bei einem Quellvorgang geht es hauptsächlich um die Relation zwischen der bei einer bestimmten Spannung maximal möglichen Dehnung bzw. dem bei Zulassung einer bestimmten Dehnung maximal entstehenden Druck. Weitere Parameter wären der Wassergehalt und die zeitliche Entwicklung. Die beiden letztgenannten Aspekte sind für Quellvorgänge von Ton und Tonstein eher von nachrangiger Bedeutung. Das Quellen geschieht relativ schnell, und der Wassergehalt interessiert nicht, wenn nur nach möglichen Hebungen oder Drücken gefragt ist. In diesem Sinne erfüllt das sogenannten Grob'sche Gesetz

$$\varepsilon = k (1 - \log \sigma / \log \sigma_0)$$

für das Tonquellen aus bautechnischer Sicht alle Anforderung. Diese Beziehung bildet alle möglichen Endzustände des Quellens einer bestimmten Probe ab. σ_0 ist der bei völliger Dehnungsbehinderung entstehende Quelldruck, k ist die bei der Spannung 1,0 mögliche

Dehnung. In halblogarithmischer Darstellung $\varepsilon / \log \sigma$ ergibt sich eine Gerade. Eine so einfache Gesetzmäßigkeit erlaubt, solange sie tatsächlich zutrifft, die Beschränkung des Versuchs auf wenige verschiedene Zustände. Theoretisch reichen zwei Messwerte aus, um das Quellverhalten komplett zu beschreiben. Allerdings wirken sich Zufälligkeiten beim Versuchsablauf und Messungenauigkeiten wegen des logarithmischen Ansatzes gegebenenfalls stark verfälschend auf extrapolierte Ergebnisse aus.

Besonders falsch kann ein maximal möglicher Quelldruck sein, der rechnerisch aufgrund von Zuständen auf weit geringerem Spannungsniveau ermittelt wird. Solche Fehler können durchaus die Größenordnung von $\pm 50\%$ überschreiten. Hiermit muss besonders dann gerechnet werden, wenn das Quellen sehr lange andauert und die Messwerte tatsächlich gar keine Endwerte darstellen. Dieser Effekt hat lange Zeit zur Fehleinschätzung des Quellpotenzials von anhydrithaltigem Tonstein geführt. Hinzu kam dabei, dass bei der Auswertung mit der größten Selbstverständlichkeit vom Grob'schen Gesetz ausgegangen wurde. Diese Annahme war zunächst wegen der phänomenologischen Ähnlichkeit zum Tonquellen naheliegend. Seit mindestens 20 Jahren ist aber bekannt, dass die Vorgänge beim Schwellen von Anhydritgestein viel komplexer sind und durch das Grob'sche Gesetz noch nicht einmal näherungsweise beschrieben werden können. Solange die richtige Gesetzmäßigkeit noch nicht gefunden ist, muss man die Versuchsergebnisse als solche nehmen.

Die Quellversuche an anhydrithaltigem Tonstein vom Freudensteintunnel haben mehr als 20 Jahre gedauert, bis sich die Proben auch bei weitestgehender Belastung nicht mehr gerührt haben. Zwischendurch wurden viele stabile Gleichgewichtszustände erreicht, allerdings immer auf einem sehr hohen Spannungsniveau. Eine Antwort auf die Frage, wie künftige Tunnel in derartigem Gestein konstruiert und dimensioniert werden sollten, war hieraus noch nicht abzuleiten. Das Verhalten der Proben legt den Schluss nahe, dass sowohl der zeitliche Ablauf, als auch die Art der Versuchssteuerung von wesentlicher Bedeutung sind.

3. Tunnel in quellfähigem Tongestein

Quellfähige Gesteine wie vor allem Tonstein und mergeliger Tonstein sind zugleich in aller Regel auch wasserempfindlich. Kommt solches Gestein beim Vortrieb mit Wasser in Berührung, so setzen Zerfall und Schlamm bildung oft innerhalb kürzester Zeit ein. Die daraus resultierenden Probleme sind durch schnelle Versiegelung, Entspannungsbohrungen, Wasserfassung und das Einbringen von Festgestein als Sohlbefestigung durchaus lösbar. Allerdings bedeuten diese Maßnahmen eine deutliche Vortriebserschwerung. Die

Quellfähigkeit als solche macht sich in diesem Szenario kaum bemerkbar. Wo eine Sohle sowieso zerfahren wird oder aufgeschottert wird, fällt eine quellbedingte Hebung nicht auf. Wird eine Senkung oder horizontale Konvergenz gemessen, so lassen sich diese Verschiebungen auch schon mit der wasserbedingten Gebirgsverschlechterung hinreichend begründen.

Anders liegen die Dinge, wenn der Vortrieb in zunächst trockenem Gebirge stattfindet. Eine schließlich doch einsetzende Durchfeuchtung und das dadurch ausgelöste Quellen führen in diesem Fall zu Auffälligkeiten, die nur mit einem Quellvorgang erklärt werden können. Hierzu gehören beispielsweise die Bildung von Längsrissen in einer unbefestigten Fahrsohle oder die typische Beschädigung einer Sohlsicherung mit Biegerissen und Scherbrüchen. Gegebenenfalls muss eine Sanierung vorgenommen werden, um die ordnungsgemäße Ausführung der nächsten Arbeitsschritte (Strosse, Sohle, Innenschale) zu ermöglichen. Hierauf kann aber verzichtet werden, wenn das beschädigte Bauteil ohnehin wieder abgebrochen werden muss, der Quellvorgang bereits abgeklungen und kein bautechnisch relevantes Unterprofil entstanden ist.

Tunnel in quellfähigem Gebirge werden zur Gewährleistung ihrer dauernden Nutzbarkeit grundsätzlich ringsum mit einer Auskleidung versehen. Soweit kein Wasserdruck aufgenommen werden muss, richtet sich der erforderliche Sohlstich nur nach der über die Sohle abzutragenden Vertikallast und dem zu erwartenden Quelldruck. Bei der Überlagerung dieser beiden Lastfälle ist an jeder Stelle der dort größere Wert anzusetzen und nicht etwa deren Summe. Wenn die Bettungsreaktion größer ist als der mögliche Quelldruck, findet kein weiterer Druckanstieg statt. Die aus den Wänden kommenden Vertikallasten werden bereits an den Rändern des Sohlgewölbes in den Untergrund abgetragen. In Sohlmitte gibt es dann allenfalls eine sehr geringe Bettungsreaktion. Hier kann sich eine Quellhebung einstellen, die bei zunehmendem Kontakt mit dem Sohlgewölbe in einen Quelldruck übergeht. Dieser stellt eine bemessungsrelevante Belastung dar, deren richtige Prognose von bisweilen großer technischer und wirtschaftlicher Bedeutung ist.

Der im Baugrundgutachten angegebene und gemäß Ausschreibung der Tunnelbemessung zugrunde zu legende Quelldruck von Tonstein ist häufig unrealistisch hoch. Dies liegt teils an falschen Versuchsergebnissen, teils an fehlendem Verständnis des Quellvorgangs :

- Bei der Erstbewässerung entwickelt eine Probe oft einen Druck, der gar nicht einem echten Quellen zuzuordnen ist. Solche Erscheinungen gibt es gelegentlich sogar bei überhaupt nicht quellfähigem Gestein. Es handelt sich hierbei möglicherweise um einen Benetzungseffekt.

- Der maximal bei starrer Einspannung der Probe entstehende Quelldruck kann bereits durch Zulassung einer sehr geringen Dehnung wesentlich reduziert werden. Diese Entspannung ist endgültig, d.h. der Druck baut sich nicht wieder auf. Sofern sichergestellt ist, dass eine Tunnelauskleidung erst eingebaut wird, wenn bereits eine bestimmte quellbedingte Ausdehnung des hohlraumnahen Gebirges stattgefunden hat, kann der Bemessungsdruck entsprechend niedriger angesetzt werden. Bei der Spritzbetonbauweise kann eine Dehnung um 2 % bis zum Einbau der Innenschale als gesicherte Annahme angesehen werden.

Derartige Betrachtungen sind selbstverständlich nur möglich, wenn auf hierfür geeignete Versuchsergebnisse zurückgegriffen werden kann. Weder klassische Quelldruckversuche, noch reine Quellhebungsversuche liefern für sich genommen oder auch gemeinsam eine für die Bemessung nutzbare Information. Der Versuch muss tatsächlich die Kurve möglicher Endzustände des Wertepaares Spannung/Dehnung im bautechnisch relevanten Bereich abfahren.

Beim reinen Tonsteinquellen liegen die Quelldrücke ohne Zulassung einer Dehnung in aller Regel unter 2 MN/m². Dies würde zur Not erlauben, die Innenschale bei geeigneter Formgebung und Dimensionierung auch für den vollen Quelldruck zu bemessen. Allerdings wäre dies fast nie erforderlich. Es ist ein Gebot der Wirtschaftlichkeit, den entlastenden Effekt einer zugelassenen Dehnung bei der Festlegung der Lastannahmen zu nutzen. Zugleich sollte auch klargestellt werden, wie die Kombination mit anderen Lastfällen aussehen soll. Beispiel:

Max. Quelldruck bei voller Einspannung:	2000 kN/m ²
Quelldruck bei Zulassung einer Dehnung von 2 %:	400 kN/m ²
Wasserdruck in der Tunnelsohle:	300 kN/m ²

Falscher Ansatz für den Sohlldruck: $2000 \text{ kN/m}^2 + 300 \text{ kN/m}^2 = 2300 \text{ kN/m}^2$.

Richtiger Ansatz: Es wirkt der größere Wert von 300 kN/m² und 400 kN/m², also 400 kN/m².

Ein derartiger Unterschied kann maßgebend dafür sein, ob ein Tunnel überhaupt gebaut wird. Auf jeden Fall aber ist er von großer wirtschaftlicher Bedeutung.

Zusammenfassend kann zum Tunnelbau in quellfähigem Tonstein festgestellt werden, dass sowohl Vortrieb, als auch Auskleidung nicht mit unlösbaren Problemen verbunden sind. Schwierigkeiten beim Vortrieb lassen sich durch ein geeignetes Ausbruchs- und Sicherungskonzept vermeiden oder zumindest beherrschen. Beim Entwurf der Innenschale

sollte ein rundum geschlossenes Tragwerk eine Selbstverständlichkeit sein. Wenn bei der statischen Berechnung von sinnvoll gewählten Lasten ausgegangen wird, ist im Regelfall des Verkehrstunnelbaus auch eine wirtschaftliche Dimensionierung möglich. Die größte Gefahr für die Wirtschaftlichkeit geht von zu ungünstigen, ohne spezielle Kenntnis des Tonquellens festgelegten Lastannahmen aus.

Beim Katzenbergtunnel der DB, der über weite Strecken durch quellfähigen Ton- und Mergelstein führt, wurden zwei getrennte Planungen und Ausschreibungen für die Spritzbetonbauweise und den Schildvortrieb durchgeführt. Hinsichtlich des Quelldrucks wurde für die NÖT von einer Dehnung um 2 % ausgegangen, für den Schildvortrieb dagegen von nur 1 %. Dem lag die Annahme zugrunde, dass beim Schildvortrieb das Quellen möglicherweise erst nach dem Erhärten des Ringspaltmörtel beginnt und daher die Dehnung stärker behindert wird als durch eine Spritzbetonschale. Der so ermittelte höhere Quelldruck war bemessungsrelevant für die Tübbingauskleidung. Beim Vortrieb zeigte sich allerdings, dass überhaupt keine quellbedingte Beanspruchung gemessen werden konnte. Offenbar war der Quellvorgang im Kontakt mit dem frischen Mörtel bei dessen Erhärtung bereits abgeschlossen.

4. Tunnel in quellfähigem anhydrithaltigem Tonstein

Gegenüber den vorstehend behandelten Tunneln in Tonstein gibt es bei Tunneln in anhydrithaltigem Tonstein sehr bedeutsame Unterschiede:

- Der Vortrieb findet in aller Regel zunächst unter weitgehend trockenen Verhältnissen statt. Damit sind Ausbruch und Sicherung nicht durch Wassereinwirkung erschwert.
- Wasserzutritte von benachbarten Nassbereichen stellen sich erst allmählich, dann aber praktisch unaufhaltsam ein. Das Wasser verteilt sich weitgehend unbemerkt hinter der Spritzbetonschale und unter der Sohle. Der dadurch ausgelöste Schwellvorgang wirkt sich auf die bereits lange ausgehärtete Sicherung schnell als große, den Gebirgsdruck weit übersteigende Belastung aus.
- Wo die Sicherung durch den Schwelldruck überbeansprucht wird und bricht, kommt es zu großen Verschiebungen der Leibung. Dies gilt insbesondere für die Sohle, wo meistens ein frühes Einsetzen des Schwellens und eine geringe Tragfähigkeit der Sicherung zusammentreffen.

- Der Schwellvorgang setzt nach der Bewässerung – wie beim Tonstein – spontan ein, um sich schon bald zu verlangsamen. Es hat dann den Anschein, dass der Vorgang bereits seinem Ende entgegen geht. Dies ist allerdings eine Täuschung. Der weitaus größte Teil des gesamten Schwellvermögens steht nach der ersten Phase noch zur Verfügung und wird in einem vergleichsweise langsamen Prozess erst im Lauf vieler Jahre aufgebraucht.
- Durch die Zulassung großer Dehnungen lässt sich die Fähigkeit zum Aufbau großer Drücke auf Dauer nicht nennenswert verringern. Der Grund hierfür liegt einerseits in der Größe des Schwellpotenzials, andererseits in dessen sehr langsamer Freisetzung. Wegen der Langsamkeit ist eine Vorgehensweise wie im Tonstein, nämlich den Quellvorgang vor dem Einbau der Innenschale weitgehend auslaufen zu lassen, beim Anhydrit nicht möglich.
- Der im Quelldruckversuch maximal mögliche Schwelldruck eines anhydrithaltigen Tonsteins ist so groß, dass er noch niemals in einem korrekt ausgeführten Versuch ermittelt wurde. Die Langzeitversuche an Proben vom Freudensteintunnel mussten bei Erreichen von 10 MN/m^2 entlastet werden, weil die Messdosen auf keinen höheren Druck ausgelegt waren. Allerdings interessierte der echte Maximalwert dann auch nicht mehr, weil sich ein Tunnel darauf sowieso nicht bemessen lässt. Die Versuche wurden deshalb mit regelmäßigen größeren Entlastungen und langen Hebungsphasen gefahren, weil ein allmähliches Abnehmen der Quellfähigkeit erwartet wurde. Diese Erwartung hat sich nicht erfüllt. Nach 20 % Hebung hat eine Probe immer noch einen Quelldruck von 4 MN/m^2 aufgebaut.
- Die völlige Verhinderung des Druckaufbaus durch Zulassung eines freien Quellens des Gesteins ist eine auf den ersten Blick verlockende Vorstellung. Sie ist jedoch durch bautechnische Schwierigkeiten zum Scheitern verurteilt. Jede Tunnelauskleidung muss auf Dauer lagesicher sein, um eine uneingeschränkte Nutzung zu gewährleisten. Freies Quellen führt zu unkontrolliertem Gesteinszerfall, wodurch die Lagerung des Tunnels in Frage gestellt wird. Der Einbau einer Auskleidung ohne flächigen Kontakt zur Leibung des vorläufig gesicherten Hohlraums wäre als solcher schon eine bautechnische Herausforderung. Die Auskleidung müsste dabei durch einzelne, nicht vom Quellvorgang beeinflusste Stützelemente praktisch freischwebend im Raum gehalten werden. Der Freiraum zwischen Sicherung und Auskleidung müsste zuverlässig groß genug gewählt oder aber bei Bedarf wieder von gequollenem Gestein geräumt werden. Letztlich stünde hierbei

einem enormen Aufwand doch kein zuverlässig auf Dauer nutzbares Bauwerk gegenüber. Das totale Ausweichprinzip ist demnach in der Praxis nicht ausführbar.

Sobald man akzeptiert, dass die Quellfähigkeit anhydrithaltigen Tonsteins eine stärkere Auskleidung als sonst üblich erfordert, ergeben sich verschiedene Lösungsansätze auch unterhalb eines maximal möglichen Quelldruckes. Angesichts der Langsamkeit des Quellens ist es eine realistische Option, die Tunnelauskleidung auf eine zum geplanten Ende der Nutzung erwartete Belastung auszulegen. Hierbei wird die Entwicklung eines höheren Quelldrucks durch Zulassung einer Dehnung stark verzögert.

Wichtig ist, dass die Dehnung durch vollflächige, von Anfang an vorhandene Stützung kontrolliert ohne Möglichkeit zu Auflockerung und Zerfall abläuft. Nur so bleiben die Tragfähigkeit des Gebirges und die Lage des Tunnels erhalten. Am einfachsten lässt sich dieses Konzept durch den Einbau einer kompressiblen Schicht zwischen Gebirge und Innenschale verwirklichen („Knautschzone“). Die Dicke dieser Schicht und ihre Materialeigenschaften müssen so gewählt werden, dass im Endzustand bzw. am geplanten Nutzungsende die der Bemessung zugrunde gelegte Belastung auf die Auskleidung wirkt.

Die Bemessung besteht dementsprechend aus drei Schritten:

- Festlegung eines Belastungsbildes, für das sich eine Tunnelauskleidung noch realisieren lässt.
- Abschätzung der Hohlraumrandverschiebung, die sich infolge des Schwellens unter einem dem Belastungsbild entsprechenden Stützdruck einstellt.
- Wahl eines kompressiblen Materials und Festlegung dessen Einbaudicke. Bei einer der abgeschätzten Hohlraumwandverschiebung entsprechenden Kompression darf die dabei entstandene Druckspannung nicht größer sein als die Bemessungslast der Innenschale.

Wenngleich ein Schwellen grundsätzlich überall am Hohlraumrand auftreten kann, macht sich ein solcher Vorgang zunächst und hauptsächlich in der Sohle bemerkbar. Dies hat mehrere Gründe:

- In der Sohle sammelt sich das Wasser
- Die vortriebsbedingte Entlastung des Gebirges senkrecht zur Schichtung ist in der Sohle am größten. In dieser Richtung ist die Schwelldehnung erheblich größer als in der Sedimentationsebene.

- Der Radius der Auskleidung ist in aller Regel in der Sohle größer als im Gewölbe. Damit bildet die Sohle die Schwachstelle des Tragwerks bei einer Belastung durch Schwelldruck.

Es ist deshalb naheliegend, eine Knautschzone nur in der Sohle herzustellen. Dies ist zugleich bautechnisch erheblich einfacher als eine Abpolsterung am gesamten Tunnelumfang. Allerdings scheint dem finanziellen Vorteil der einfachen Realisierbarkeit der mögliche Nachteil einer verkürzten Wirksamkeit gegenüber zu stehen. Bei mehreren Anhydrittunneln mit ausschließlicher Druckentlastung in der Sohle hat sich mittlerweile herausgestellt, dass jetzt der Seitendruck zur Hauptbelastung wird. Es wird eine horizontale Konvergenz gemessen, die Sohle wird nach unten gebogen. Wo die Tunnelauskleidung oder die Einbauten hierfür nicht bemessen sind, kommt es zu Schäden. Offenbar kann eine zu starke Abschirmung der Tunnelsohle vom Schwelldruck genauso zu Problemen führen wie eine zu schwache Abschirmung. Der hierfür maßgebende Mechanismus ist zur Zeit noch nicht bekannt. Es hat allerdings den Anschein, dass der Seitendruck nicht nur deshalb zur Hauptbelastung wird, weil der Sohldruck reduziert wurde. Die Größe des Seitendrucks deutet eher darauf hin, dass es sich dabei auch um eine „umgelenkte“ Komponente des ferngehaltenen Sohldrucks handeln könnte.

Wegen der in letzter Zeit aufgetretenen Probleme kann das Konstruktionsprinzip der begrenzten Sohlentlastung nicht mehr als die Patentlösung schlechthin angesehen werden. Es sollte deshalb in jedem Einzelfall sorgfältig geprüft werden, ob es nicht bessere Alternativen gibt. Wo aufgrund der Form und Größe des Tunnelquerschnitts die Bemessung auf einen nennenswerten Schwelldruck definitiv nicht möglich ist (etwa bei breiten Straßentunneln), müsste über Möglichkeiten einer seitlichen Abpolsterung nachgedacht werden. Dagegen erscheint bei vergleichsweise kleinen kreisrunden Querschnitten, wie sie insbesondere die neuen eingleisigen Tunnelröhren der DB aufweisen, der Verzicht auf jeglichen Druckabbau als durchaus noch realistische Option. Hierauf soll nachstehend näher eingegangen werden.

Eingleisige Eisenbahntunnel bieten sowohl wegen ihrer Form und Größe, als auch wegen der Möglichkeit eines maschinellen Vortriebs völlig neue Perspektiven für die Anwendung des Widerstandprinzips. Das erste konkrete Projekt, bei dem dieser Ansatz in die Praxis umgesetzt werden könnte, ist der Fildertunnel im Rahmen des Projekts Stuttgart 21 der DB. Die ursprüngliche, noch aus der Zeit einer strikten TBM-Ablehnung stammende Planung sah einen NÖT-Vortrieb mit anschließendem Einbau der Innenschale vor. Vorteil dieser Bauweise ist, dass die Abmessungen des Ausbruchquerschnitts örtlich an die erforderliche Dicke der Innenschale angepasst werden können. In Strecken mit schwellfähigem Gestein

kann Platz für eine gegebenenfalls mehrere m dicke Auskleidung vorgesehen werden. Außerhalb dieser Strecken reicht eine nach den üblichen Bemessungsansätzen festgelegte dünne Innenschale.

Der große Nachteil eines NÖT-Vortriebs in schwellfähigem Gebirge liegt im Risiko eines vorzeitigen Einsetzens des Schwellens. Bekanntlich ist es bei verschiedenen Tunneln bereits beim Vortrieb zu einem so heftigen Schwellen in der Sohle gekommen, dass ein planmäßiger Einbau der Innenschale nicht mehr möglich war. Im Engelberg-Basistunnel bei Stuttgart hat sich die Sohle trotz sorgfältigster und bewusst trockener Arbeit in der Anhydritstrecke um 1,5 m gehoben. Das Projekt konnte erst nach einer völligen Umplanung mit tiefem Sohlaushub und Einbau eines Zwischensohlgewölbes über einer Knautschzone zu Ende geführt werden. Auch im Freudensteintunnel und im Chienbergtunnel ist es bereits während des Vortriebs zu schwellbedingten Störungen gekommen, die sich entscheidend auf das weitere Baugeschehen ausgewirkt haben. Geht ein geplantes Baukonzept fest davon aus, dass es erst nach dem Einbau der hierauf bemessenen Innenschale zu ersten Schwellvorgängen kommt, so bedeutet jedes frühere Schwellen bautechnisch und damit auch finanziell eine Katastrophe.

Als bemerkenswert erscheint der häufig genannte Grund, für die Ablehnung eines TBM-Vortriebs in schwellfähigem Gebirge: Die Furcht vor einem Einklemmen des Schildes infolge eines schnell einsetzenden Schwellens. Während hier mit der größten Selbstverständlichkeit das sofortige Schwellen als nicht zu vermeiden angesehen wird, wird dasselbe Szenario bei der Planung eines NÖT-Vortriebs kategorisch ausgeschlossen. Bei vorurteilsfreier Bewertung dieser Frage müsste man zu einem genau entgegengesetzten Ergebnis kommen. Hierfür sprechen vor allem folgende Aspekte:

- Der maschinelle Vortrieb ist extrem gebirgsschonend, die Auflockerung ist minimal.
- Der zeitliche Abstand zwischen Öffnung des Hohlraums und Ringschluss des vorläufigen Ausbaus liegt – je nach Vortriebsgeschwindigkeit der TBM – in der Größenordnung von nur einem halben bis einem Tag.
- Ein eventueller Wasserzutritt kann durch Druckluft in der Abbaukammer verhindert werden.
- Nach dem Erhärten des Ringspaltmörtels steht mit der Tübbingschale sofort ein starker Ausbau zu Verfügung.
- Ein in üblicher Weise mit Dichtrahmen versehener Tübbingausbau ist wasserdicht. Damit verliert der Tunnel bereits nach kurzer Zeit seine Funktion als Vorfluter für Bergwasser. Ein Wasserzufluss auf Klüften kann dann nicht mehr stattfinden.
- Bei Verwendung eines dichten Ringspaltmörtels wird auch ein Wasserzufluss längs des Tunnels zuverlässig verhindert.

Aufgrund dieser spezifischen Vorteile kann davon ausgegangen werden, dass beim Schildvortrieb bis zum Wirksamwerden der Stützung allenfalls ein oberflächlicher Schwellvorgang begonnen hat. Es wird hier die Überzeugung ausgesprochen, dass ein solcher Schwellvorgang schnell auf einem vergleichsweise niedrigen Druckniveau zum Stillstand kommt. Noch günstiger ist selbstverständlich der Fall, dass bis zum Einbringen des Ringspaltmörtels überhaupt kein Schwellen stattgefunden hat. Ob es danach überhaupt noch zu einem Schwellen kommt, hängt unter anderem vom primären Spannungszustand und dem nach dem Erhärten des Ringspaltmörtels verbliebenen radialen Stützdruck ab. Theoretisch dürfte das Schwellen völlig ausbleiben, wenn vor dem ersten Wasserzutritt, z.B. infolge von Kapillarwirkung, der ursprüngliche Spannungszustand wiederhergestellt wäre. Denn unter diesem Spannungszustand hat vor dem Tunnelvortrieb auch kein Schwellen stattgefunden.

In der Praxis dürfte die sofortige Wiederherstellung des primären Spannungszustandes durch die Ringspaltverpressung nicht möglich sein. Infolge der nach dem Aushärten des Mörtels verbliebenen Differenz wird ein gewisses Schwellen wohl unvermeidlich sein. Damit aber unterscheidet sich der Zustand des Gebirgsringes um den Tunnel letztlich doch unumkehrbar vom Ausgangszustand. Es kann deshalb nicht als gesichert gelten, dass der entstehende Schwellendruck durch die Größe des primären Spannungszustandes begrenzt ist. Dieser Zustand dürfte eher als untere Schranke für die zu erwartende Belastung der Tunnelauskleidung angesehen werden. Um wieviel die tatsächliche Belastung darüber liegt, hängt von mehreren Faktoren ab:

- Schwellvermögen des Gesteins, beschrieben durch die Maximalwerte von Druck und Dehnung sowie den Ablauf eines sinnvoll gesteuerten Laborversuchs. Der hierbei ermittelte Schwellendruck bildet die obere Schranke für die mögliche Belastung. Diese würde allerdings einen nicht realisierbaren Ausbauwiderstand erfordern.
- Bis zum Einbau der Auskleidung entstandene Störungen des ursprünglichen Gebirgszustandes und Abweichungen von der statischen Idealform:
 - ausbruchbedingte Auflockerung
 - wasserführende Klüfte und Kluffüllungen
 - Zerfall und Schlamm bildung in der Sohle
 - bereits begonnene Schwellvorgänge
- Durchlässigkeitsparameter:
 - Durchlässigkeit des ungestörten Gesteins
 - Durchlässigkeit des vortriebsbedingt gestörten Gebirges
 - Spannungszustand, bei dem kein Wassertransport im Gestein mehr stattfindet.

Nach dem heutigen Wissenstand hat es den Anschein, dass ein durch Tunnelvortrieb ausgelöster Schwellprozess bei hinreichend hohem Ausbauwiderstand schließlich durch Wassermangel zum Stillstand kommt. Dieser Wassermangel in der relevanten näheren Tunnelumgebung entsteht durch das Schwellen selbst, indem alle Wasserwege zusammengedrückt oder durch Gips ausgefüllt werden und die Gesteinsdurchlässigkeit infolge des zunehmenden Druckes immer geringer wird. Sobald der „Stagnationsgradient“ unterschritten wird, unterhalb dessen aus physikalischen Gründen keine Wasserbewegung mehr stattfinden kann, ist der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt. Das Gebirge besitzt zwar noch Schwellpotenzial, doch ist dieses mangels Wasser nicht mehr aktivierbar.

Die Hypothese einer Selbstabdichtung des schwellenden Gebirges wurde vom Autor erstmals 1993 veröffentlicht. Sie wurde in der Folge leider in der Weise missverstanden, dass eine rechnerische Simulation dieses Vorgangs versucht wurde. Schließlich wurde sogar die bloße Durchführung einer solchen rechnerischen Untersuchung als die Problemlösung selbst propagiert. Derartige Vorschläge sind allerdings zum Scheitern verurteilt. Einerseits gibt es nach wie vor kein konsistentes Stoffgesetz für das Anhydritschwellen, andererseits weiß das Gebirge naturgemäß nichts davon, dass irgendwo seine Selbstabdichtung beschlossen wurde.

Dessen ungeachtet ist die Vorstellung eines durch Selbstabdichtung zum Stillstand kommenden Schwellprozesses mit großer Wahrscheinlichkeit der Schlüssel zum Erfolg. Wenn sich der als Belastung der Tunnelauskleidung anzusetzende Schwelldruck auch nicht genau vorhersagen lässt, so weiß man doch wenigstens, was für seine Minimierung getan werden kann: Der für quellfähigen Tonstein geltende Grundsatz, die Belastung durch Zulassung von Dehnung zu reduzieren, würde bei schwellfähigem Anhydritgestein genau das Gegenteil bewirken. Hier kommt es darauf an, die Auskleidung so schnell wie möglich in ein möglichst wenig aufgelockertes Gebirge einzubauen. Je besser dies gelingt, desto niedriger ist das beim Stillstand des Schwellens erreichte Druckniveau. Selbstverständlich funktioniert dieses Prinzip nur, wenn die Tunnelauskleidung nicht vor dem Erreichen des möglichen stabilen Endzustandes versagt.

Es ist offensichtlich, dass der maschinelle Vortrieb eines kreisrunden Tunnels mit sofortigem Tübbingeinbau die vorstehend beschriebenen Voraussetzungen weitaus am besten erfüllt. Im Vergleich hierzu hat ein Sprengvortrieb nach der NÖT mit sehr spätem Einbau der Innenschale selbst unter Einhaltung der Kreisform nur Nachteile. Noch ungünstiger liegen die Verhältnisse bei einem stark von der Kreisform abweichenden Profil.

Wo Tunnel aufgrund ihrer vorgesehenen Nutzung mit einer vom Kreis abweichenden Form in schwellfähigem Anhydritgebirge gebaut werden müssen, scheidet ein TBM-Vortrieb von

vornherein aus. Hier gibt es keine Alternativen zu einer Konstruktion mit Knautschzone, trotz aller damit möglicherweise verbundenen Probleme. Wo dagegen die Möglichkeit eines TBM-Vortriebs grundsätzlich besteht, sollte die darin liegende Chance zur Beherrschung des Schwellproblems unbedingt genutzt werden. Wie hoch auch immer der letztlich wirkende Schwelldruck sein wird: Auf jeden Fall wird er geringer sein als bei einer konventionell hergestellten Konstruktion.

Der Versuch, die gesamte Bemessungslast allein der Tübbingschale zuzuordnen, könnte an verfahrenstechnische Grenzen der Vortriebsanlage stoßen. Es bietet sich in solchen Fällen an, die Tragfähigkeit einer relativ leichten Primärauskleidung mit Tübbings üblicher Dicke schon dicht hinter der TBM durch eine zweite Schale zu ergänzen. Diese könnte beispielsweise aus unbewehrtem, aber hochfestem Beton bestehen, der fortlaufend dicht hinter der Vortriebsanlage in eine Gleitschalung gepumpt wird. In diesem Sinne böte der maschinelle Vortrieb die Möglichkeit für eine Fülle von Innovationen zur wirtschaftlichen Realisierung eines dauerhaften Tunnels in schwelfähigem Gebirge. Es bleibt zu hoffen, dass sich bald einmal ein aufgeschlossener Bauherr und eine hinlänglich risikobereite Baufirma zusammenfinden, um auf einer fairen vertraglichen Basis dem technischen Fortschritt auch auf diesem Gebiet zum Durchbruch zu verhelfen.