Numerische Modellierung von Wasserzutritten für tiefliegende Tunnel

R. Leitner[1], H. Müller[2]

[1] **Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, TU Graz**
[2] **3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH**

1 Einleitung

Beim Bau tiefliegender Tunnel stellen allein die Gebirgsspannungen eine Herausforderung an den Vortrieb und den Ausbau dar. Störungen, die während des Baus angetroffen werden, sind mit einem zum Teil erheblichen Mehraufwand verbunden. Kommt es im Zusammenhang mit Störungen zusätzlich zu (unerwarteten) Wassereinbrüchen, so sind die Probleme, die sich daraus ergeben, vielfältig. Stillstandszeiten sind meist unvermeidbar und Bauzeitverlängerungen vorprogrammiert. Auf jeden Fall ist eine Steigerung der kalkulierten Baukosten unvermeidbar.

Während der Planungsphase eines Projektes ist ein stimmiges (hydro) geologisches Modell für die Lokalisierung von Wasserwegigkeiten erforderlich. Es ist sowohl der geologische Bau ausreichend zu erkunden, wie auch das geologische Inventar (z.B. die Störungen) richtig zu charakterisieren (Steidl 2006). Die hydraulische Modellierung stellt in diesem Zusammenhang ein wichtiges Planungsinstrument dar um Größenordnung und Verlauf von Wasserzutritten zu tiefliegenden Tunnel zu berechnen. Bei den üblichen analytischen Ansätzen wird die Schüttung auf Basis einfacher 2D-Modelle einzig für einen stationären Endzustand ermittelt. Eine Beurteilung der transienten Entwicklung erfolgt nicht.

Bei kontinuierlichen Vortrieben ist jedoch vor allem im Zusammenhang mit Störungszonen der zeitliche Druck- und Schüttungsverlauf von besonderem Interesse. Zur Berechnung sind numerische 3D-Modelle von Nöten, wobei zu beachten ist, dass der Untergrund entsprechend dem geologischen Modell abgebildet und entsprechend dem Erkundungsstand mit realistischen Eigenschaften belegt wird. Anhand eines derartigen Modells lassen sich wichtige hydraulische Erkenntnisse gewinnen, die eine entsprechende Maßnahmenplanung zur Verminderung der Einflüsse durch das Grundwasser auf den späteren Bau ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit präsentiert vereinfacht einen derartigen Zugang am Beispiel eines Vortriebs in kristallinen Gesteinen. Gewonnene Erkenntnisse sind für eine weiterführende Planung essentiell. Zum Beispiel zeigt vorliegende Arbeit, dass bei einer bestimmten Abfolge von hydraulischen Eigenschaften innerhalb einer Störungszone, das Gefährdungspotential durch „fließendes Gebirge“ (Wassereinbruch mit Materialeintrag) erhöht ist.

2 Störungszonen

Im Untergrund sind maßgebende Wasserwegigkeiten sehr häufig an Störungszonen gebunden. Für den Untertagebau bedeutsame Störungszonen weisen meist eine durch ihre Genese bedingte komplexe interne Struktur auf. Vereinfacht können Störungen im bautechnischen Sinn als heterogene Abfolge von Zonen unterschiedlichster Eigenschaften dargestellt werden. Geotechnische Probleme bereiten hierbei nicht nur die häufigen und mitunter auch hohen Festigkeitskontraste, sondern vor allem auch die unterschiedlichen hydrogeologischen Verhältnisse innerhalb von Störungszonen.

Unterschiede im Deformations- und Umwandlungsgrad des Ausgangsgesteins bewirken die Entstehung der unterschiedlichen „Störungsgesteine“ (Riedmüller et al. 2001). Stark zerlegte Bereiche wechseln sich mit kataklastisch zerscherten Zonen und geringer deformierten Gesteinsschollen ab. Je nach Gesteinsart bzw. tektonischem Beanspruchungsgrad lassen sich somit Bereiche mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten abgrenzen. Innerhalb der einzelnen Zonen einer Störungszone sind durchaus auch unterschiedliche Druckniveaus möglich.

Im Rahmen einer hydraulischen Modellierung kann das „kammernartige“ System einer komplexen Störungszone näherungsweise als Abfolge von Aquicluden bzw. Aquitarden und Aquiferen beschrieben werden. Für die vorliegende numerische Simulation wurden folgende vereinfachte Grundtypen unterschieden:

- **1-Schicht-Struktur**
  Die 1-Schicht-Struktur besteht einzig aus einer praktisch undurchlässigen bzw. einer durchlässigen Zone in einem gering durchlässigen Gebirge.

- **2-Schicht-Struktur**
  Die 2-Schicht-Struktur besteht aus einer praktisch undurchlässigen und einer unmittelbar angrenzenden, durchlässigen Zone in einem gering durchlässigen Gebirge.

- **3-Schicht-Struktur**
  Die 3-Schicht-Struktur besteht aus einer praktisch undurchlässigen bzw. durchlässigen Zone und einem Kern mit einer gegengleichen Durchlässigkeit in einem gering durchlässigen Gebirge.

Geologisches Pedant der durchlässigen 1-Schicht-Strukturen sind die „Zerrüttungszonen“, also sprödtektonische Zonen hoher Trennflächenintensität, -konnektivität und entsprechender -öffnung. Praktisch undurchlässige 1-Schicht-Strukturen sind zum Beispiel schicht- bzw. schieferungsparallele Störungszonen. 2- und 3-Schicht-Strukturen repräsentieren komplexe Störungszonen mit „core zone(s)“, „transition zone(s)“ und „damage zone(s)“ (Brosch et al. 2006). Die praktisch undurchlässigen Bereiche innerhalb von Störungszonen werden in der Natur meist durch bindige „fault gauges“ aufgebaut. Isolierte, geringer deformierte Scherlinsen aus dem Ausgangsgestein können jedoch auch als quasi undurchlässige Barrieren fungieren. Durchlässige Bereiche sind zum Beispiel grobkörnige Kataklasite, vor allem aber auch stark zerlegtes Gebirge („blocky rock mass“, Riedmüller et al. 2001).

Komplexere Strukturen wurden im Rahmen dieser Arbeit vorerst numerisch nicht simuliert. Außerdem wurden innerhalb der einzelnen Zonen die Druckniveaus vorläufig nicht variiert.

3 Analytische Ansätze

Die Wasserzutritte zum Tunnel können mit analytische Ansätze abgeschätzt werden. Die gebräuchlichsten Ansätze nach Muskat, Goodmann, Karlsrud, Rat, Schleiss, Lei und Lombardi wurden von EL Tani (2003) zusammengefasst. Die Voraussetzungen für diese analytischen Ansätze sind:

- Zweidimensionale (Scheibe)
- Stationärer Zustand
- Kreisrunder Tunnel, konstante Druckhöhe
- Homogene und isotrope Durchlässigkeit

Diese Ansätze unterscheiden sich nur geringfügig und ergeben für die Abschätzung der Wasserzutritte zu tiefliegenden Tunnels nur geringe Unterschiede. Die Ansätze nach (1) und (2) weisen dabei die geringsten Abweichungen für seichtliegende Tunnels auf (El Tani 1999, Lombardi 2002). Für die Kontrolle der numerischen Simulationen werden diese Ansätze verwendet.

$$Q_{MG} = 2\pi K \frac{H}{\left(1 + 0.4\left(\frac{r}{H}\right)^2\right)\ln\left(\frac{2H}{r}\right)} \qquad (1.)$$

$$Q_{MG} = 2\pi KH \frac{1 - 3\left(\frac{r}{2H}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{r}{2H}\right)^2\right]\ln\left(\frac{2H}{r}\right) - \left(\frac{r}{2H}\right)^2} \qquad (2.)$$

In diesen Ansätzen bedeutet H [m] das hydraulische Potential, r [m] den Tunnelradius, und K [m/s] den Durchlässigkeitsbeiwert. Aus den Ansätzen ist ersichtlich, dass die berechneten stationären Wasserzutritte zum Tunnel linear mit der Durchlässigkeitsbeiwert des Gebirges zusammenhängen.

4 Numerische Simulation

Mit Simulationen (FLAC3D 2006) wird die zeitliche Entwicklung der Wasserzutritte zu einem Tunnel analysiert und Näherungen (Potenzfunktionen) für die zeitliche Entwicklung erstellt. Ausgehend von diesen Funktionen wird die Entwicklung der Schüttungen eines kontinuierlich vorgetrieben Tunnels berechnet. Dieses normale Schüttungsverhalten wird durch unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte stark beeinflusst. Speziell das Auffahren von Störungszonen mit unterschiedlichem Internaufbau wird untersucht.

4.1 2D Simulationen

Die analytischen Ansätze gelten für zweidimensionale Scheiben mit unendlicher seitlicher Ausdehnung und isotropen Durchlässigkeitsbeiwerten. In den Ansätzen beginnen die Stromfäden an der Grundwasseroberfläche und strömen auf kreisförmigen Bahnen zum Tunnel (siehe Abb. 2 [1]). Die grauen Linien stellen Äquipotentiallinien dar, die normal auf die Stromfäden (schwarze Linien) stehen. In einem numerischen Modell sind aufwändige Randbedingungen oder große Netze notwendig, um diese Ansätze numerisch nachbilden zu können.

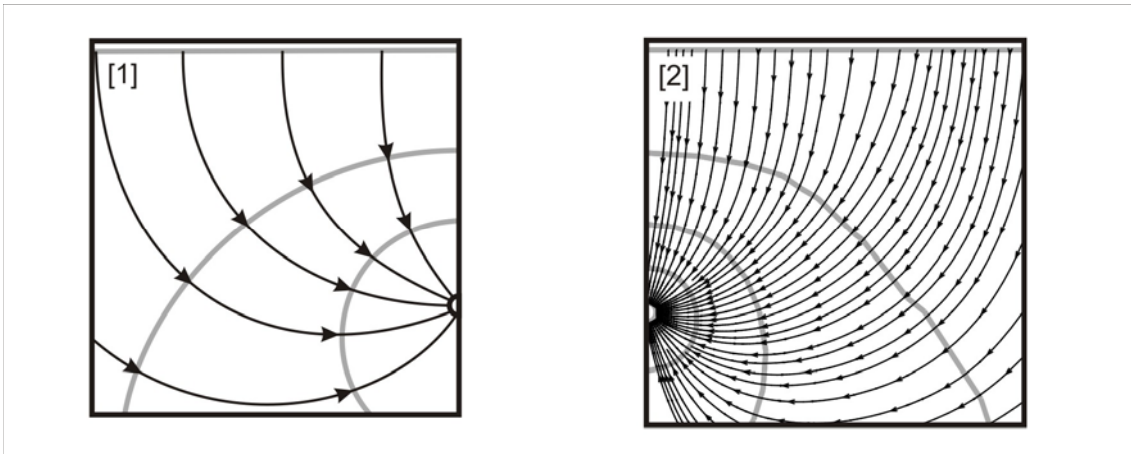

Abb. 1 Fliespfade und Potentiallinie
[1] Analytischer Ansatz; [2] Numerisches Modell

Die verwendeten Randbedingungen in den numerischen Modellen bewirken eine Abweichung dieser Fließpfade vom theoretischen Verlauf. In Abb. 2 [2] sind Stromfäden und Äquipotentallinien des verwendeten Modells dargestellt.

Diese Abbildung stellt den stationären Zustand des Strömungsvorganges dar. Im initialen Zustand herrscht ein konstantes Potential (hydrostatischer Gradient) im gesamten Modell. Für Tunnels ohne Ausbau ist der Wasserdruck an der Laibung Null. Für Tunnel mit Ausbau herrscht bei einwandfreier Funktion der Drainage kein Wasserdruck in der Drainage bzw. Tunnellaibung. Am Anfang der transienten Berechnung ergibt dies hohe Gradienten in Tunnelnähe und einen hohen initialen Wasserzutritt. Mit der Zeit werden diese hohen Gradienten abgebaut und die Wasserzutritte nähern sich asymptotisch den stationären Wasserzutritten.

Im Gebirge entsteht durch die Topographie, unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwasserneubildungen eine Grundwasserströmung. Diese Strömung ist meist nicht normal auf den Tunnel und beeinflusst daher den Wasserzutritt zum Tunnel zum Teil erheblich. In Abb. 2 sind die stationären zweidimensionalen Strömungsverhältnisse im Nahbereich des Tunnels für zwei Grundwasserströmungen mit Strömungsrichtung normal zum Tunnel dargestellt. In der Abbildung sind links die Strömungsverhältnisse für einen Tunnel in einer horizontalen [1] und rechts in einer vertikalen [2] Grundwasserströmung dargestellt. Die Strömungsfäden für die beiden Strömungen erscheinen nur rotiert, da sich die Einflüsse der Gravitation erst in der unmittelbaren Nähe des Tunnels auswirken.

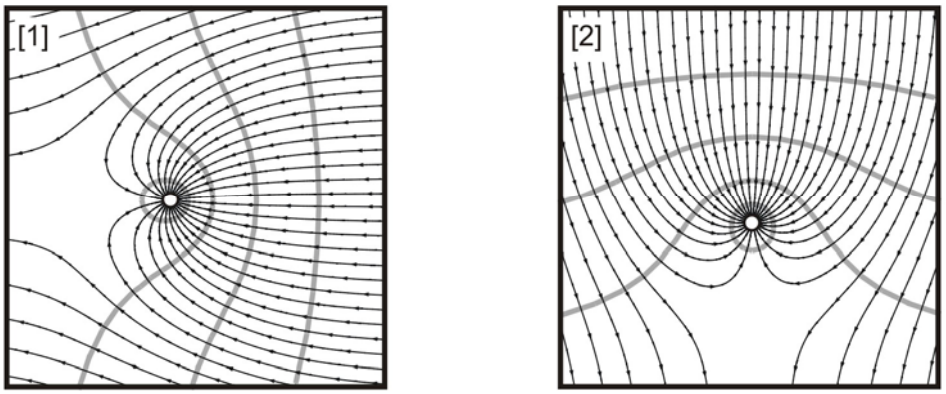

Abb. 2 Wasserzutritte [1] Horizontale Strömung; [2] Vertikale Strömung

Im Folgenden wird die zeitliche Abnahme des Wasserzutrittes zu einem Tunnel mit 10 m Durchmesser und einem hydraulischen Potential von 700 m auf Tunnelniveau analysiert. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Gebirges beträgt 1.0×10^{-8} [m/s]. In der Simulation wird das hydraulische Potential an der Grundwasseroberfläche konstant gehalten. In Abb. 3 ist zeitliche Entwicklung

der Schüttung dargestellt. Die Schüttung eines 10 m Abschnitt beträgt nach 60 Stunden ca. 0,15 [l/s] und nimmt nach 230 Tagen ($2.0x10^7$ Sec) auf ca. 0,09 [l/s]. Die Ansätze (1) und (2) ergeben eine stationäre Schüttung von 0,079 [l/s]. Nach 230 Tagen hat sich der stationäre Zustande noch nicht eingestellt. Die stationäre Schüttung stellt erst sich nach ca. 3 Jahren ein. Die zeitliche Abnahme der Wasserzutritte kann sehr gut mit einer Potenzfunktion (3) beschrieben.

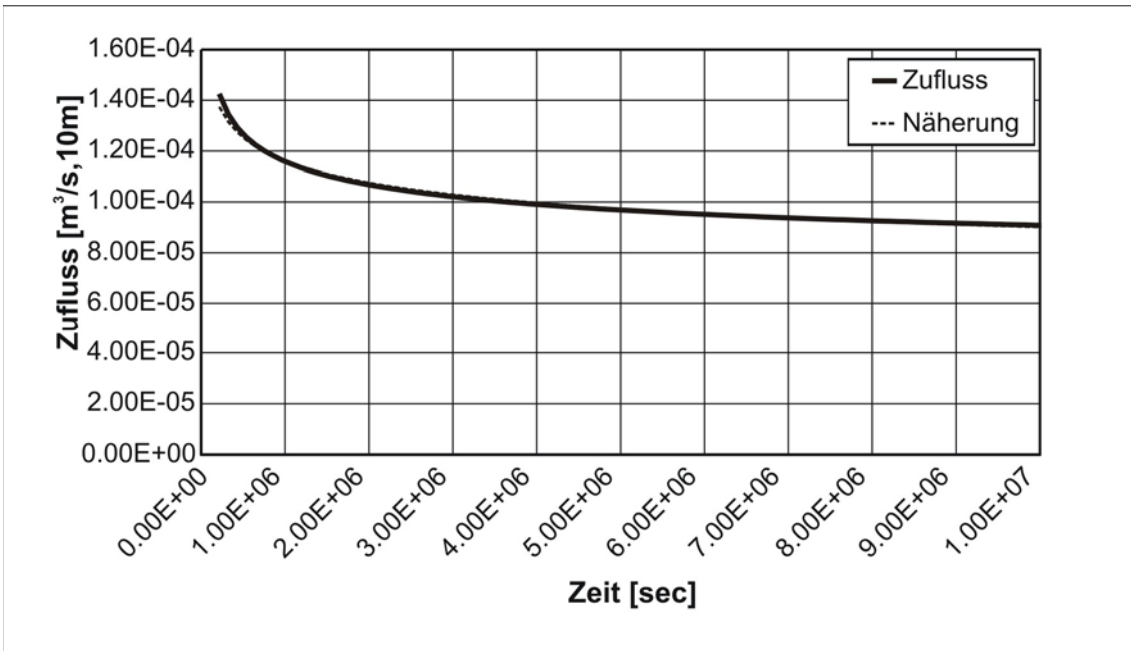

Abb. 3 Abnahme der Schüttungen mit der Zeit und eine Näherung nach (4)

$$Q(t) = C \times Zeit[\sec]^D \quad (3.)$$

$$Q(t) = 0.0057 \times Zeit^{-0.110} \quad (4.)$$

Die Parameter C und D für eine Potenzfunktion zur Näherung der Abnahme der Schüttungen werden für Durchlässigkeiten von $1.0x10^{-10}$ bis $1.0x10^{-6}$ berechnet und in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1 Parameter C und D der Potenzfunktion (3) für ein hydraulisches Potential von 700 m und einem Tunneldurchmesser von 10 m.

Durchlässigkeitsbeiwert	*C*	*D*
$1.0x10^{-10}$	$2,61x10^{-5}$	-0,208
$1.0x10^{-9}$	$1,38x10^{-4}$	-0,147
$1.0x10^{-8}$	$5,73x10^{-4}$	-0,110
$1.0x10^{-7}$	$2,56x10^{-3}$	-0,071
$1.0x10^{-6}$	$1.47x10^{-2}$	-0,042

Die Näherung der Schüttungen mit einer Potenzfunktion ist für begrenzte Zeitdauern gültig, da diese Funktion für $t = \infty$ gegen Null strebt. Die Schüttungen können bis zur stationären Schüttung mit der Näherung beschrieben werden. Für spätere Zeitpunkte sind die Schüttungen konstant mit den stationären Schüttungen anzunehmen. Numerische Simulationen können durchaus geringere Schüttungen ergeben, wenn z. B. eine Absenkung des Grundwasser berücksichtigt wird.

4.2 3D Simulationen

Der Vortrieb eines Tunnels in einem Gebirge mit isotropen Durchlässigkeiten weist andere Strömungsfelder auf, als in einer 2D-Simualtion abgebildet werden können. In 3D-Simulationen strömt das Wasser räumlich von allen Seiten zum Tunnel. Mit der Zeit verringern sich die Strömungen bis sich ein stationäres Strömungsfeld eingestellt hat. Bei einem stetigen Vortrieb des Tunnels wird das stationäre Strömungsfeld speziell im Bereich der Ortsbrust nie erreicht. Das stationäre Strömungsfeld stellt sich nur in einiger Entfernung zur Ortsbrust ein.

Die Zeitdauer oder Abstand bis sich das stationäre Strömungsfeld einstellt hat, hängt im Wesentlichen von der Durchlässigkeitsbeiwerten ab. Bei hohen Durchlässigkeitsbeiwerten stellt sich der stationäre Zustand innerhalb kurzer Zeit ein, sofern die Randbedingungen der Strömung gleich bleiben. Änderungen in den Durchlässigkeitsbeiwerten beeinflusst dieses Normalverhalten sehr massiv.

Für die numerische Simulation eines Vortriebs in einem homogenen Gebirge wird eine isotrope Durchlässigkeit des Gebirges von 1.0×10^{-8} [m/s] angenommen. Das hydraulische Potential auf Tunnelniveau beträgt ca. 700 m und der Durchmesser des Tunnel beträgt 10 m. Die angenommene Vortriebsgeschwindigkeit beträgt 4 m/Tag. Der Tunnelvortrieb wird in 10 m Schritten modelliert und berechnet. Die angenommen Zeitdauer für einen 10 m Schritt beträgt 60 Stunden (216.000 sec). In Zuge des Vortriebes werden Störungen mit unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerten durchörtert. Eine Störung wird im numerischen Modell als eine Abfolge von 10 m mächtigen Schichten modelliert. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Schichten werden dabei von Fall zu Fall verändert. In den numerischen Simulationen werden nur die hydraulischen Potentiale und Fließvorgänge simuliert. Eine Kopplung dieser hydraulischen Prozesse mit den mechanischen Prozessen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, ist jedoch für die nahe Zukunft geplant.

4.2.1 Fall I: Homogenes Gebirge

In diesem Abschnitt werden die Wasserzutritte eines Tunnels bei einem Vortrieb in einem homogenen Gebirge mit einer isotropen Durchlässigkeiten von 1.0×10^{-8} [m/s] beschrieben. In Abb. 4 ist das Potentialverteilung im quasi-stationären Zustand während des Vortriebs dargestellt.

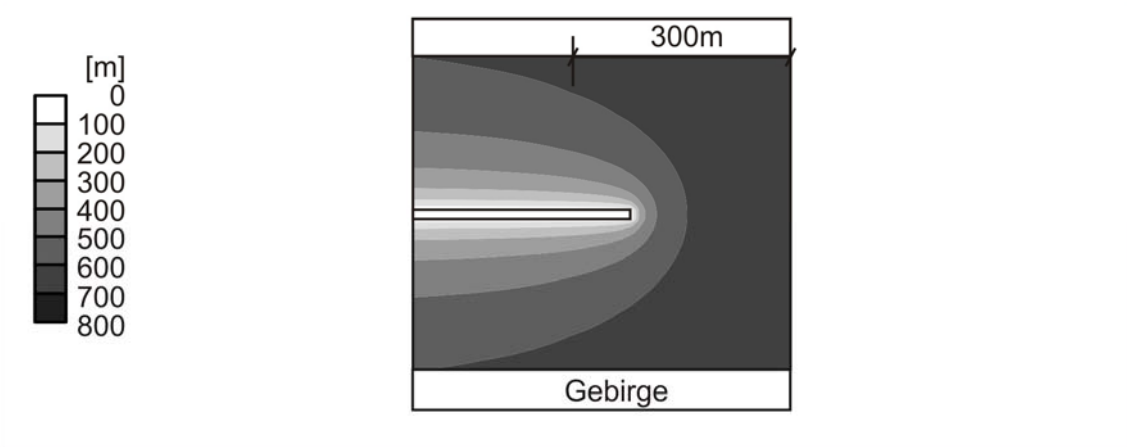

Abb. 4 Hydraulisches Potential für den Vortrieb in einem Gebirge mit isotropen Durchlässigkeitsbeiwerten

Eine Reduktion des hydraulischen Potentials ist bis ca. 60 m vor die Ortsbrust erkennbar. In Abb. 5 ist die Abnahme der Schüttung in einem Querschnitt mit der Zeit und eine Näherung mit einer Potenzfunktion (5) dargestellt.

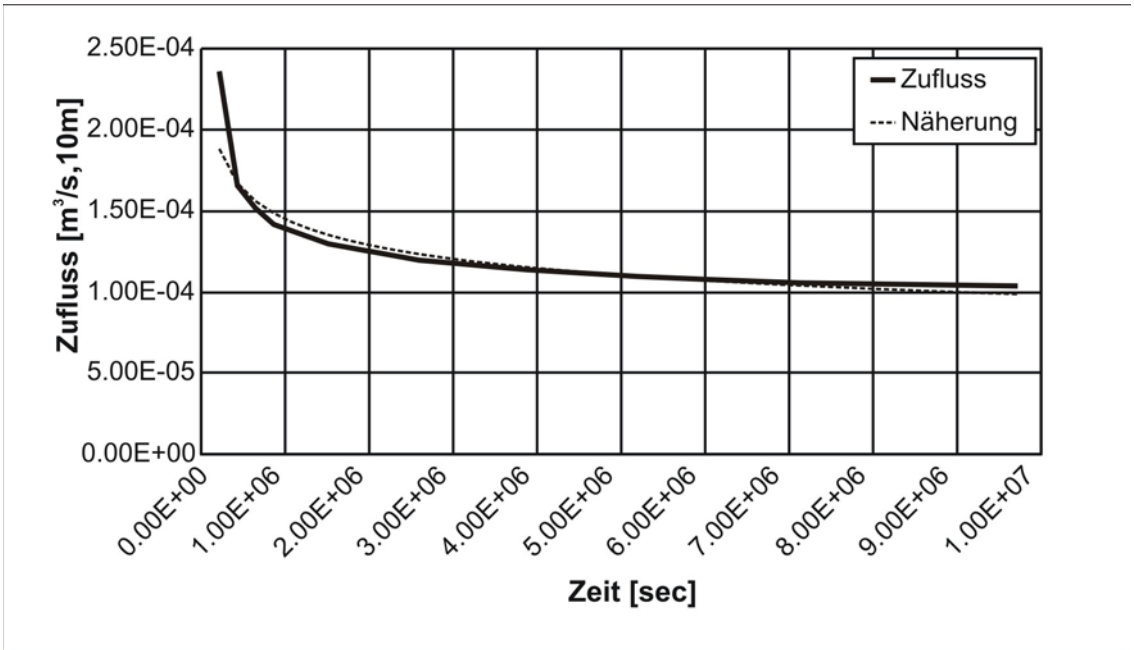

Abb. 5 Zeitliche Entwicklung der Schüttung für einen 10 m Abschnitt bei konstantem Vortrieb und eine Näherung (5) für die Schüttung

Die Parameter für die Näherung (5) unterscheiden sich von den der 2D-Berechnung (4), da der Tunnel schrittweise vorgetrieben wurde. Speziell im Bereich der Ortsbrust weichen die Strömungsfelder von der 2D-Berechnung ab und ergeben größere initiale Schüttungen.

$$Q(t) = 0.00149 \times Zeit[\sec]^{-0.169} \qquad (5.)$$

Die Abb. 6 zeigt die Schüttungen entlang des Tunnels für 4 Stationen des Vortriebs. Die größten initialen Schüttungen eines 10 m Abschnittes treten bei der Ortsbrust auf und betragen ca. 0.23 [l/s]. Diese Schüttungen sind mit Kreisen markiert und ergeben die Trendlinie der initialen Schüttungen. Die Schüttungen nehmen mit der Entfernung zur Ortsbrust (Zeit) bis auf die stationären Schüttungen von ca. 0,10 [l/s] eines Abschnittes ab. Die gesamte Schüttung des Tunnels ergibt sich aus der Summe der Schüttungen der einzelnen Querschnitte.

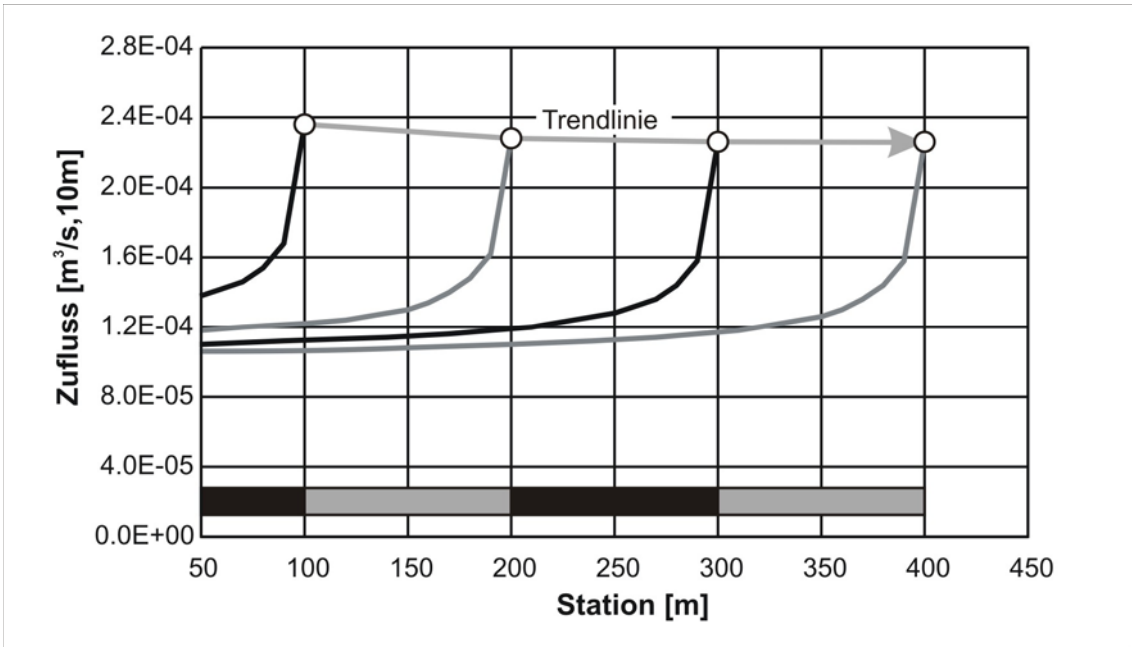

Abb. 6 Schüttungen entlang des Tunnels in Abhängigkeit vom Ortsbruststand

In einem Gebirge mit isotropen Durchlässigkeitsbeiwerten nehmen die Schüttungen näherungsweise mit der Länge des aufgefahrenen Tunnel zu, da sich weite Strecken des Tunnel im stationären Zustand befinden und nur im Bereich der Ortsbrust höhere Schüttungen auftreten.

4.2.2 Fall II: 1-Schicht-Struktur, praktisch undurchlässig

In diesem Abschnitt wird die Wirkung einer Störungszone bestehend aus einer praktisch undurchlässigen Zone mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 1.0×10^{-10} [m/s] in einem Gebirge mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von

1.0×10^{-8} [m/s] diskutiert. Die Störungszone verhindert die entwässernde Wirkung (Potentialabbau) des Vortriebes im Gebirge hinter der Störung. In Abb. 7 ist das Potential dargestellt, dass sich vor (links) bzw. nach (rechts) dem Auffahren der praktisch undurchlässigen Störung dargestellt.

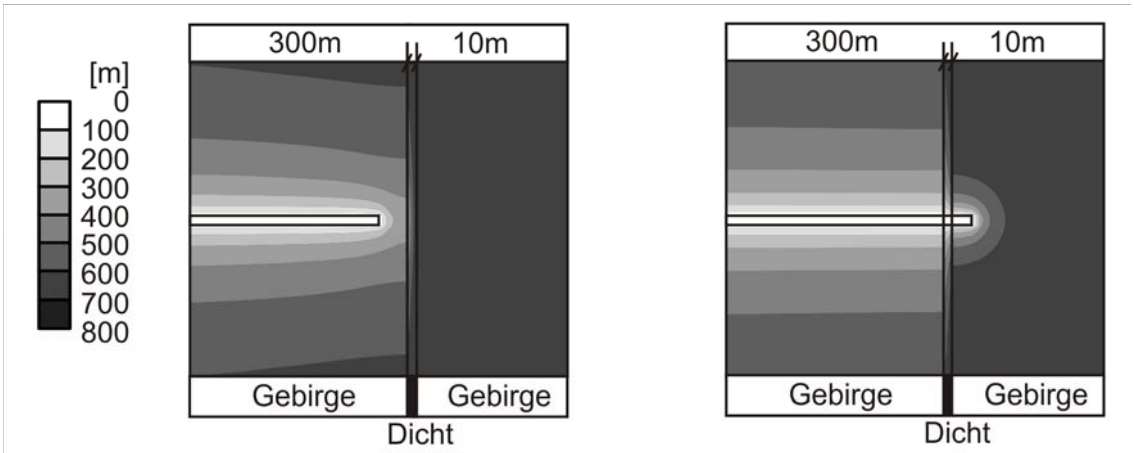

Abb. 7 Potential beim Durchfahren einer dichten Störung

In Abb. 8 sind die Schüttungen entlang des Tunnels während des Vortriebes vermerkt. Zusätzlich ist die Trendlinie der initialen Schüttungen abgebildet. Durch die praktisch undurchlässige Störung wird das Gebirge vor der Störung rascher entwässert und das Potential nähert sich schneller dem stationären Zustand. Diese Abnahme des Potentials vor der Störung bewirkt eine Abnahme der Schüttungen, die deutlich an der Trendlinie erkennbar ist.

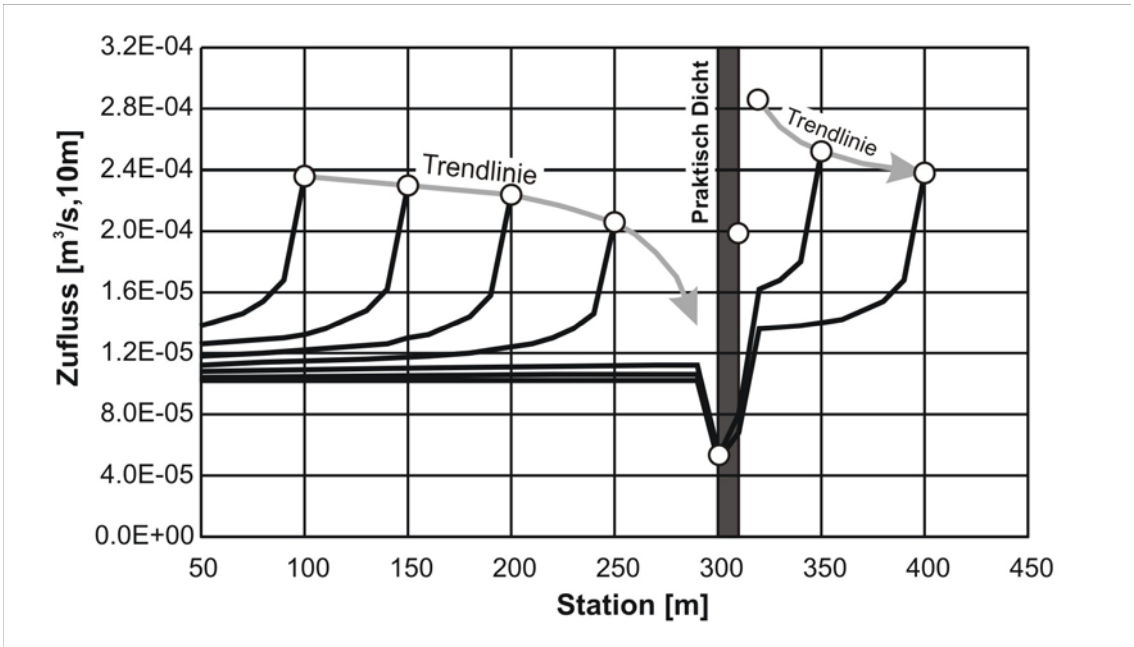

Abb. 8 Entwicklung der Schüttungen beim Durchfahren einer praktisch dichten Störungszone

Während des Auffahrens der dichten Störung (dunkel grau hinterlegt) tritt lokal deutlich weniger Wasser zum Tunnel zu, da die Störung einen geringen Durchlässigkeitsbeiwert aufweist. Nach dem Auffahren der Störung tritt sofort eine höhere Schüttung auf, da das Gebirge hinter der Störung nicht vorauseilend entwässert wurde. Diese höheren initialen Schüttungen nehmen mit dem weiteren Vortrieb wieder auf das ursprüngliche Niveau ab.

4.2.3 Fall III: 1-Schicht-Struktur, durchlässig

Eine Störungszone mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 1.0×10^{-6} [m/s] in einem Gebirge mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 1.0×10^{-8} [m/s] verhindert eine vorauseilende Entwässerung solange die Störung selbst nicht durchörtert wird. Der vergleichsweise hohe Durchlässigkeitsbeiwert sorgt für konstante Druckverhältnisse in der Störung (siehe Abb. 9 links). Erst in unmittelbarer Nähe zur Störung bewirkt der höhere Gradient einen deutlichen Anstieg in den initialen Schüttungen. Bei hohen Wasserdrücken bzw. Gradienten und entsprechenden Materialeigenschaften kann sich ein Gemisch aus Wasser und Material in den Tunnel ergießen. Nach dem Durchfahren der Störung wirkt diese als zusätzlich entwässerndes Element. Die Potentiale werden auch in der Umgebung der Störung abgebaut (siehe Abb. 9 rechts).

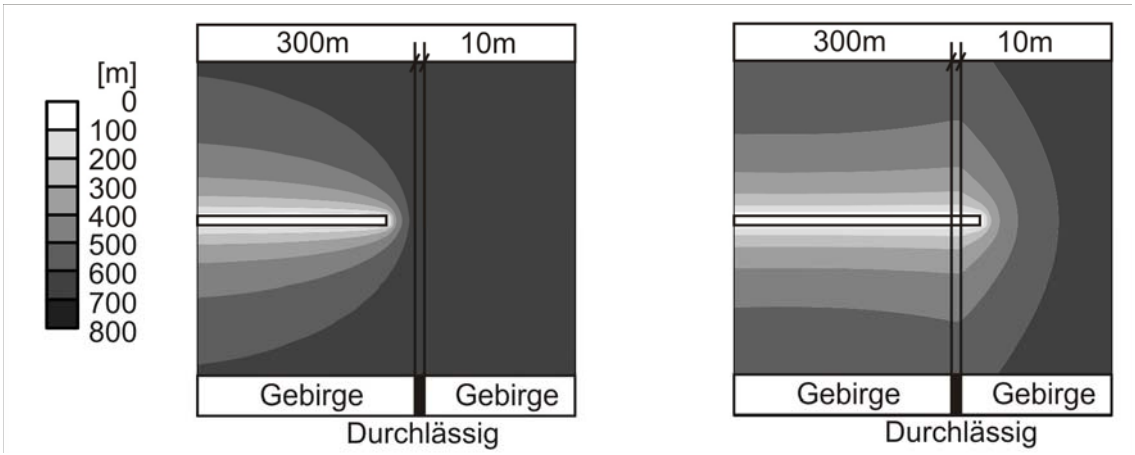

Abb. 9 Potential beim Auffahren einer durchlässigen Störung

Für die Abschätzung der stationären Wasserzutritte einer durchlässigen Schicht sind die analytischen Ansätze geeignet. Für die Berechnung der initialen Wasserzutritte eines 10 m Abschnittes, die in diesem Fall ca. 1,00 [l/s] betragen, liegen in diesem Fall deutlich unter den Schüttungen der 2D-Berechnungen.

4.2.4 Fall VI: 2-Schicht-Struktur

Die vorher beschrieben Mechanismen der Entwässerung und Abschirmung treten beim Auffahren von 2-Schicht-Strukturen zusammen auf. Die modellierten, 20 m mächtigen Zonen weisen Durchlässigkeitsbeiwerte von 1.0×10^{-7} bzw. 1.0×10^{-10} [m/s] auf. Das Gebirge hat einen Durchlässigkeitsbeiwert von 1.0×10^{-8} [m/s].

Das berechnete Verhalten ist davon abhängig, welche Schicht zuerst angefahren wird. Ist dies zuerst die durchlässigere Schicht, baut sich das Potential in dieser Schicht weniger ab als im Fall II, da sich ein zusätzlicher Zufluss in der durchlässigeren Schicht einstellt (Vergleiche Abb. 10 und Abb. 7 links). Der praktisch undurchlässige Kern der Zone verhindert einen Abbau des Potentials im Gebirge dahinter. Die initialen Wasserzutritte beim Anfahren der durchlässigen Zone betragen 1.0 [l/s] in einem 10 m Abschnitt. Diese Schüttung des Abschnittes nimmt bis zum Anfahren des „dichten“ Kerns bis auf 0.6 [l/s] ab. Das Schüttungsverhalten nach dem Durchörten der Störung gleicht Fall III (siehe Abb. 10 und Abb. 7rechts).. Die maximale initiale Schüttung hinter der Störung beträgt 0.3 [l/s].

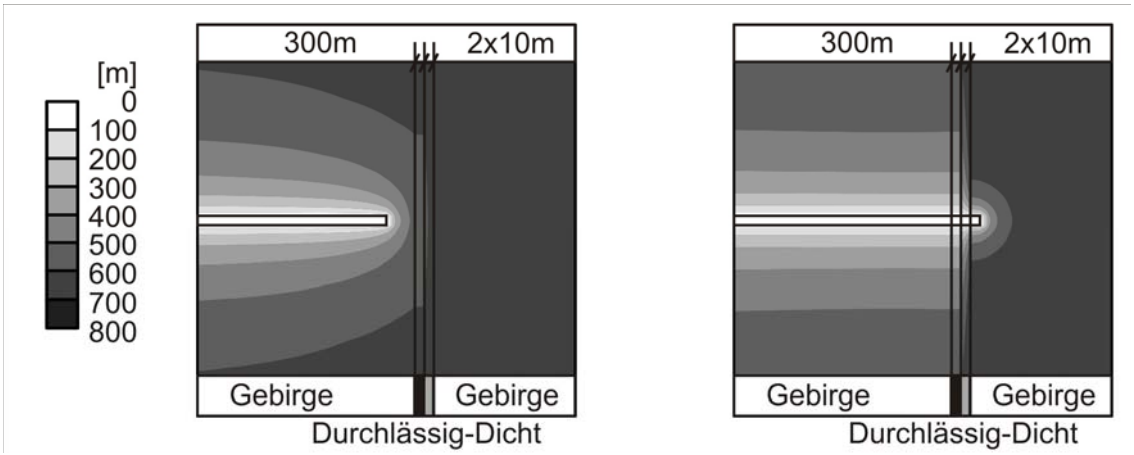

Abb. 10 Potential beim Auffahren einer als 2-Schicht-Sturktur modellierten Störungszone („durchlässig“ ➔ „dicht“)

Wird allerdings die „dichte“ Zone zuerst angefahren, so nimmt die initiale Schüttung bei der Annäherung des Tunnels ab. In Abb. 11 links ist das Potential vor der Durchörterung der Störungszone abgebildet. Das Potential und die Schüttungen verhalten sich vor den Durchörtern der Störung, wie Fall II „praktisch“ undurchlässig . Nach dem Durchörtern gleicht das Verhalten dem Fall III „durchlässig“.

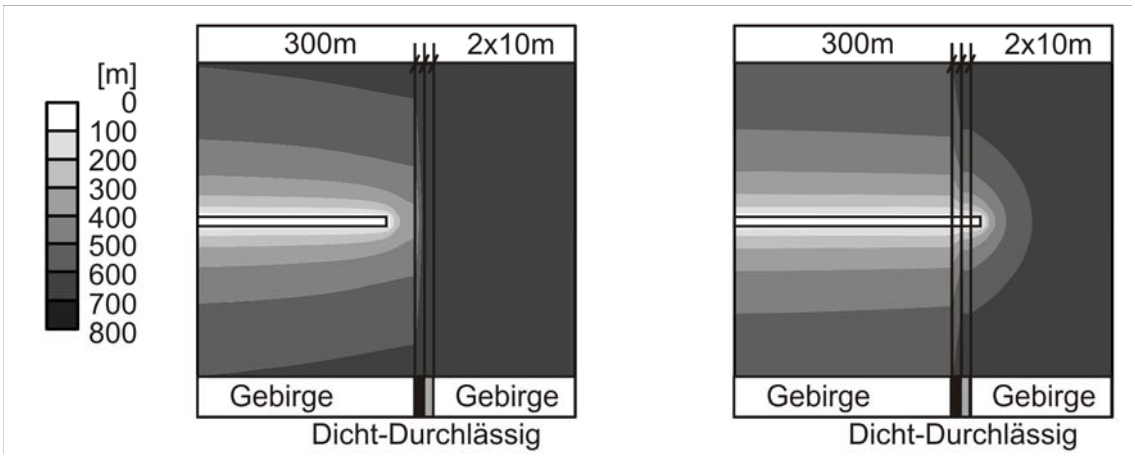

Abb. 11 Potential beim Auffahren einer als 2-Schicht-Struktur modellierten Störungszone („dicht“ ➔ „durchlässig“)

Das Potential nach dem Durchfahren dieser 2-Schicht-Struktur ist in Abb. 11 auf der rechten Seite abgebildet. Wird die durchlässige Schicht angefahren, treten initialen Schüttungen eines 10 m Abschnittes in der Höhe von 1.3 [l/s] auf. Diese Schüttung ist gegenüber der vorigen Anordnung um 30% größer.

Die Schüttungen entlang des Tunnels sind in Abb. 12 dargestellt. Die maximalen Schüttungen treten beim Anfahren der durchlässigen Schicht auf.

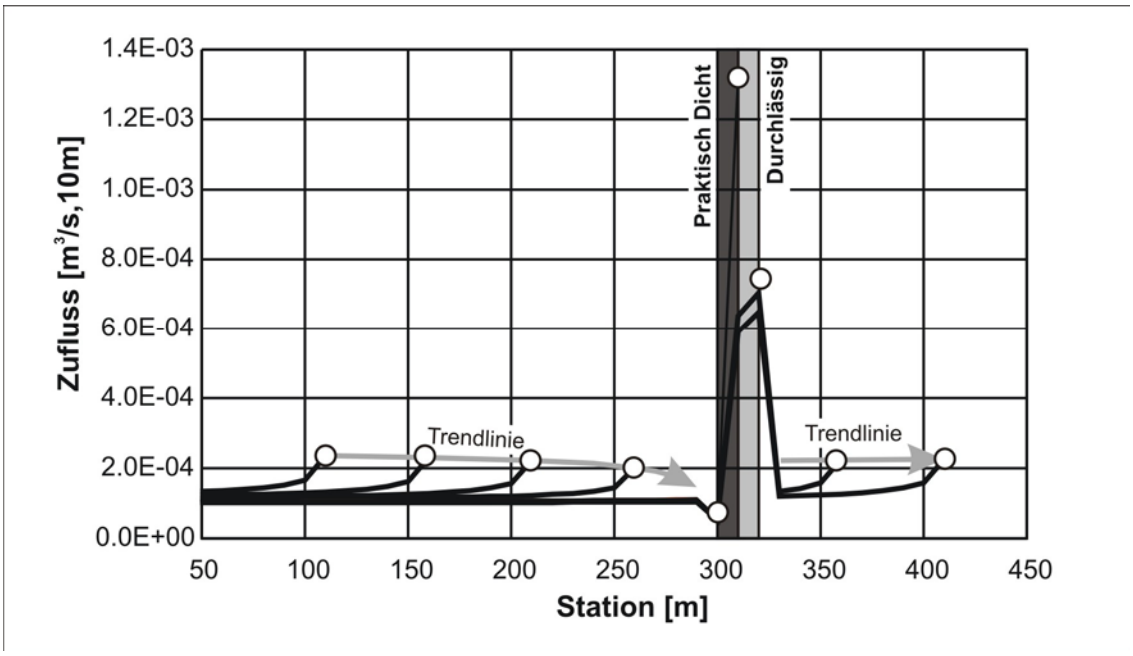

Abb. 12 Entwicklung der Schüttungen beim Auffahren einer als 2-Schicht-Struktur modellierten Störungszone („dicht“ ➔ „durchlässig“)

4.2.5 Fall V: 3-Schicht-Struktur

Die 2-Schicht-Struktur wird um eine zusätzliche Schicht erweitert. Der Durchlässigkeitsbeiwert für die praktisch undurchlässigen Schichten beträgt 1.0×10^{-10} [m/s], während die Beiwerte für die durchlässigen Schichten 1.0×10^{-7} [m/s] beträgt. Ähnlich wie bei 2-Schicht-Strukturen, hängen die Schüttungen von den Durchlässigkeitsbeiwerten der einzelnen Schichten ab. Wenn die praktisch undurchlässigen Schichten außen angeordnet sind, wird eine vorauseilende Entwässerung der durchlässigen Schicht in der Mitte, genauso wie eine Vorausentwässerung des Gebirges dahinter, verhindert. Das Potential vor und nach dem Auffahren ist in Abb. 13 und die Entwicklung der Schüttung ist in Abb. 14 dargestellt.

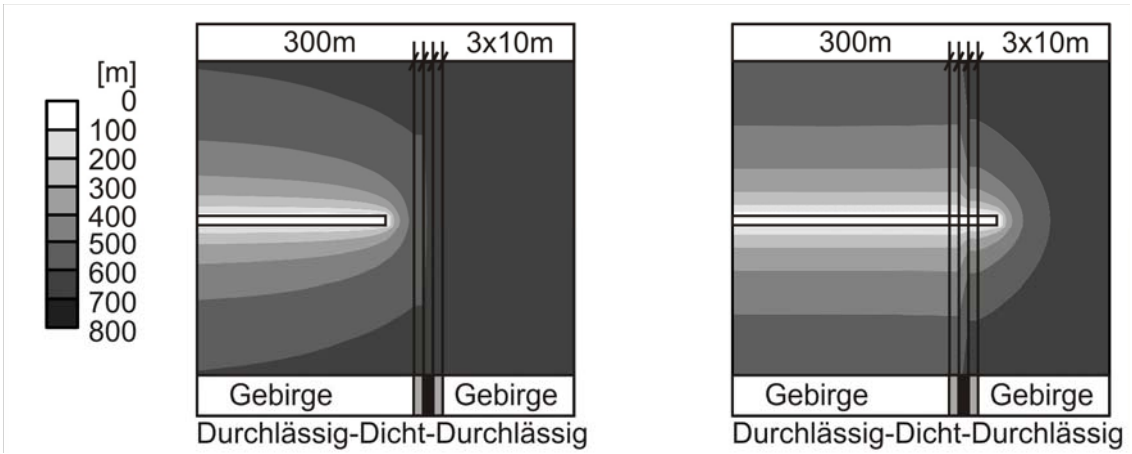

Abb. 13 Potential beim Auffahren einer als 3-Schicht-Struktur modellierten Störungszone („dicht“ ➔ „durchlässig“➔ “dicht“)

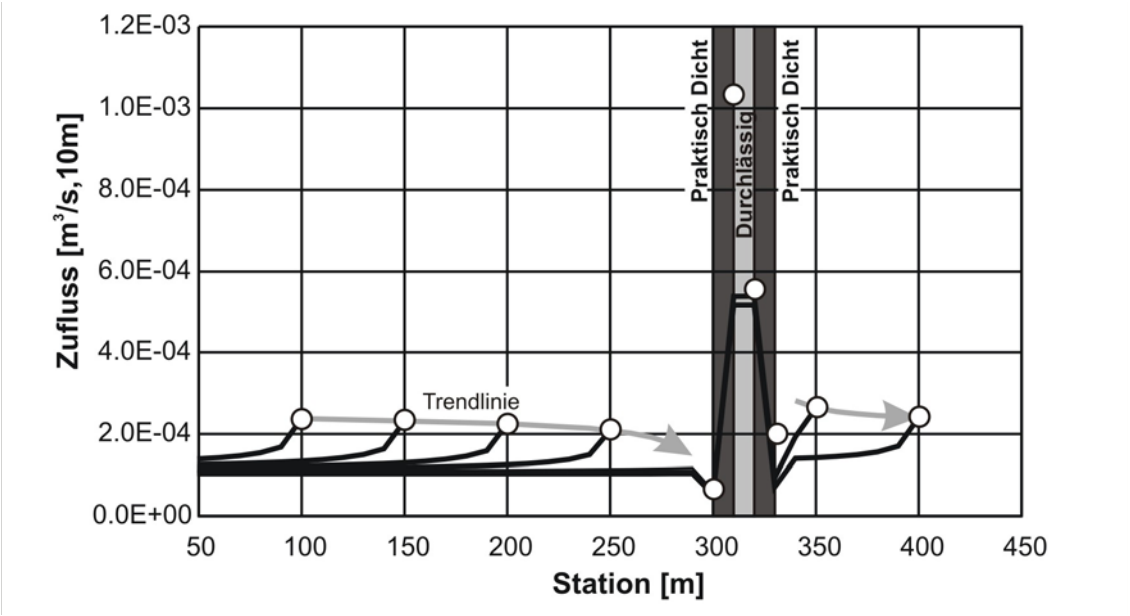

Abb. 14 Entwicklung der Schüttungen beim Auffahren einer als 3-Schicht-Struktur modellierten Störungszone („dicht“ ➔ “durchlässig“ ➔ “dicht“)

Beim einem Vortrieb, der sich auf eine „dichte“ Schicht zubewegt wird das Gebirge davor rascher entwässert. Daher nehmen die initialen Schüttungen während der Annäherung ab. Wird die praktisch undurchlässige Schicht durchstoßen, so stellen sich hohe initiale Schüttungen von 1.0 [l/s] ein. Diese Größenordnung der initialen Schüttung ist mit Fall VI („durchlässig“ ➔ „dicht“) vergleichbar. Beim Durchörten der zweiten „dichten“ Schicht beträgt die initiale Schüttung ca. 0.3 [l/s,10m]. Beim weiteren Vortrieb geht die Schüttung auf die quasi-stationäre Menge zurück. Durch das Abschotten der durchlässigen Schicht, können innerhalb der Störungszone höhere Potentiale herrschen und die initialen Schüttungen zusätzlich verstärken. Dabei erhöht sich die Gefahr dass das Gebirge fließt.

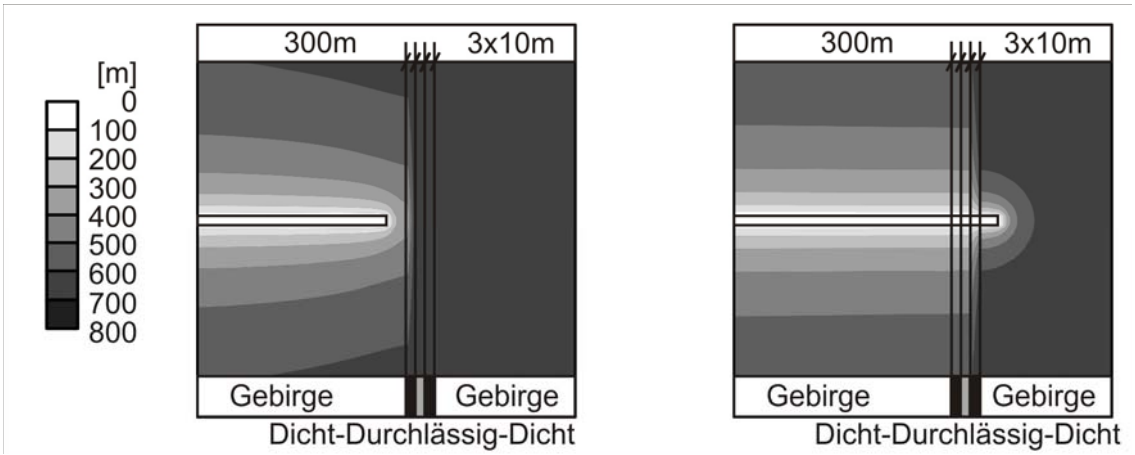

Abb. 15 Potential beim Auffahren einer als 3-Schicht-Struktur modellierten Störungszone (durchlässig ➔ „dicht“ ➔ durchlässig)

Sind die durchlässigen Schichten außen angeordnet, so wird das Modell in zwei, hydraulisch getrennte Bereiche geteilt. Das Potential vor der Störung wird teilweise reduziert während die „dichte“ Schicht eine Entwässerung des Gebirges hinter der Störzone verhindert (siehe Abb. 15). Beim Anfahren der ersten durchlässigen Schicht betragen die initialen Schüttungen eines 10 m Abschnittes ca. 1.0 [l/s]. Beim Durchörtern der „dichten“ Schicht treten initiale Schüttungen von ca. 1.3 [l/s] auf. Die Schüttungen und das Potentialfeld ist mit dem Fall IV („dicht“ ➔ „durchlässig“) vergleichbar.

5 Zusammenfassung

Die Potentialverteilungen in unterschiedlich durchlässigen Schichten einer Störungszone wirken sich beim fortschreitenden Vortrieb in Form von unterschiedlich hohen Gradienten aus. Hohe Gradienten erzeugen höhere Strömungsdrücke. Diese wiederum bewirken eine höhere mechanische Belastung des Gebirges. Störungsgesteine sind jedoch meist durch eine geringe Festigkeit und eine hohe Empfindlichkeit gegen Strömungskräfte (Erosion) gekennzeichnet. Dies kann im schlimmsten Fall beim Tunnelbau zu „fließendem Gebirge“ führen.

Das Auffahren einer Schichtkombination „dicht“ ➔ „durchlässig“ ist hierbei offenbar eine der ungünstigsten Situationen.

Anmerkung: Die verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte sind charakteristisch für kristalline Gesteine. Die berechneten Schüttung eines 10 m Abschnitt für einen Durchlässigkeitsbeiwert von 1.0×10^{-7} [m/s] beträgt maximal 1.3 [l/s]. Eine um 2-10-Potenzen erhöhte Durchlässigkeitsbeiwert würde eine entsprechend höhere Schüttung ergeben. Das prinzipielle Verhalten während des durchörtern der Störung würde davon nicht beeinflusst. Diese höheren Durchlässigkeitsbeiwerte wurden aufgrund extrem langer Rechenzeiten nicht behandelt.

6 Literaturverzeichnis

Brosch, F-J, Kurz, W., Klima, K.(2006)
Definition and Characterization of Faults and Fault Rocks. Felsbau 24 (2006) 5 pp. 13-20, VGE, Essen

El Tani, M. (1999)
Water inflow into tunnels. Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES 1999, Oslo, pp. 61–70, Balkema.

El Tani, M. (2003)
Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunnelling and Underground Space Technology 18 (2003) pp. 49–55

FLAC3D (2006)
Fast Largrangian Analysis Code in 3D. Itasca 2006, Minneapolis

Karlsrud, K., (2001)
Water control when tunnelling under urban areas in the Olso region. NFF publication No. 12, 4, 27–33, NFF.

Lombardi, G (2002)
Zitiert aus: El Tani, M. (2003) Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunnelling and Underground Space Technology 18 (2003) pp. 49–55

Riedmüller, G., Brosch, F-J., Klima, K., Medley, E. W. (2001)
Engineering Geological Characterization of Brittle Faults and Classification of Fault Rocks. Felsbau 19 (2001) 4 pp. 13-19, VGE, Essen

Steidl, A. (2006)
Investigation Strategies and Methods for the Characterization of Fault Zones. Felsbau 24 (2006) 5 pp. 21-27, VGE, Essen

Autor:

Vorname, Name: Roland Leitner
Titel: DI
Firma, Abteilung: TU Graz, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Adresse: Rechbauerstraße 12 8010 Graz
Tel: +43 316 873 8118
Fax: +43 316 873 8618
mail: r.leitner@tugraz.at
internet: www.tunnel.tugraz.at

Nicht Zutreffendes bitte löschen:
Teilnahme: ja
Vortragender: ja

Co-Autor:

Vorname, Name: Herwig Müller
Titel: DI
Firma, Abteilung: 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH
Adresse: Elisabethraße 22/II, 8010 Graz
Tel: +43 316 337799
Fax: + 43 316 337799 DW 11
mail: mueller@3-g.at
internet: www.3-g.at

Nicht Zutreffendes bitte löschen:
Teilnahme: nein
Vortragender: nein