

Sommer:

Standicherheit von Felsböschungen beim Lastfall schnelle Absenkung



# Standicherheit von Felsböschungen beim Lastfall schnelle Absenkung

Dr.-Ing. René Sommer, Projektleiter, WBI – Prof. Dr.-Ing. W. Wittke Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen, Deutschland

Bei der Herstellung von Einschnitten und Böschungen im Grundwasser und der damit verbundenen Grundwasserabsenkung treten in Richtung des Einschnitts gerichtete Strömungskräfte auf, welche die Standicherheit der Böschung ungünstig beeinflussen. Eine Grundwasserabsenkung kann vorab, zum Beispiel durch vorausseilende Entwässerungsbrunnen oder im Zuge der Aushub- und Sicherungsarbeiten, beispielsweise durch Dränagen, erfolgen. Die Grundwasserabsenkung erfolgt zeitlich verzögert (instationäre Sickerströmung). Die Zeit, bis der stationäre Zustand erreicht ist, hängt dabei neben der Aushubtiefe auch von den Eigenschaften des Baugrunds ab. Die aus der Grundwasserströmung resultierenden Strömungs- und Auftriebskräfte müssen bei der Untersuchung der Standicherheit von Böschungen berücksichtigt werden. Für einen wirtschaftlichen und sicheren Entwurf ist daher eine wirklichkeitsnahe Beschreibung der Grundwasserabsenkung einschließlich der zeitlichen Entwicklung notwendig. Eine entsprechende Prognose ist durch numerische Berechnungen, zum Beispiel nach der Methode der Finiten Elemente, möglich. Die Grundlagen der Sickerströmung im Boden und Fels werden im Beitrag beschrieben. Darüber hinaus wird der Einfluss der Durchlässigkeit und des spezifischen Speicherkoeffizienten auf die zeitliche Entwicklung der Grundwasserabsenkung in einer Böschung mithilfe von Beispielberechnungen verdeutlicht.

**Stability of slopes for the load case fast lowering of water table:** *The groundwater lowering due to the excavation of cuts and slopes causes seepage forces that have an unfavorable effect to stability. A drawdown in advance can be accomplished e.g. by means of preceding dewatering wells or during excavation and support work by means of drainages. Groundwater lowering is a transient seepage flow process. The transient flow phase until steady state condition is reached depends on both the depth of excavation and the hydraulic properties of the ground. The seepage and uplift forces resulting from seepage flow must be accounted for the stability analyses for slopes. An economic and safe design therefore requires a realistic modelling of the groundwater lowering including its development in time. The application of numerical methods such as the finite element method allows for a corresponding prediction. The article describes the fundamentals of transient seepage flow in soil and rock. In addition, the results of example analyses are presented which clarify the influence of the permeability coefficient and the specific storage coefficient on the time-dependent groundwater lowering in a slope.*

**B**ei der Herstellung von Einschnitten und Böschungen im Grundwasser kommt es zu einer zur Böschung hin gerichteten Sickerströmung. Falls keine dem Aushub und der Sicherung vorausseilenden Entwässerungsmaßnahmen vorgesehen sind, erfolgt die Grundwasserabsenkung in der Regel im Zuge des Aushubs und des Einbaus der Sicherung. Die aus der Grundwasserströmung resultierenden Strömungs- und Auftriebskräfte müssen bei der Untersuchung der Standicherheit von Böschungen berücksichtigt werden. Für einen wirtschaftlichen und sicheren Entwurf ist daher eine wirklichkeitsnahe Beschreibung der Grundwasserabsenkung einschließlich der zeitlichen Entwicklung notwendig. Eine entsprechende Prognose kann auf der Grundlage von numerischen Berechnungen, zum Beispiel nach der Methode der Finiten Elemente, erfolgen, wenn die Baugrundkennwerte und der ungestörte Verlauf des Grundwasserspiegels in Voruntersuchungen bestimmt wurden. Die Gesetze der Sickerströmung im Boden und Fels werden in diesem Beitrag beschrieben. Darüber hinaus wird die Definition des spezifischen Speicherkoeffizienten erläutert, und es wird der Einfluss der Durchlässigkeit und des spezifischen

Speicherkoeffizienten auf die zeitliche Entwicklung der Grundwasserabsenkung mithilfe von Berechnungsbeispielen verdeutlicht.

## Aufgabenstellung

Betrachtet wird eine 25 m hohe Böschung. Das Grundwasser steht vor der Baumaßnahme circa 3 m unterhalb der Geländeoberfläche an und soll im Zuge des Aushubs abgesenkt werden (Bild 1).

Der Aushub erfolgt lagenweise, wobei sich in jedem Aushubzustand eine bestimmte Sickerlinie einstellt.

Das Diagramm in dem Bild 1 zeigt einen qualitativen zeitlichen Verlauf der Aushubsohle und der Austrittshöhe der Sickerlinie im Bereich der freigelegten Böschung über die Zeit. Die Grundwasserabsenkung stellt sich in der Regel zeitverzögert zum Aushub ein. Der Austrittspunkt des Grundwassers aus der Böschung liegt dabei höher als das jeweilige Aushubniveau. Ein stationärer Zustand stellt sich in der Regel nicht unmittelbar nach Erreichen des Endaushubs zum Zeitpunkt  $t_n$ , sondern zu einem späteren Zeitpunkt ein. Die Zeit bis dahin hängt dabei von der Absenktiefe und den Eigenschaften des Baugrunds ab.

Die aus der Grundwasserströmung resultierenden Strömungs- und Auftriebskräfte müssen bei der Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen berücksichtigt werden.

Im Bild 2 ist eine Böschung dargestellt, bei der sich der Grundwasserspiegel bis zur blauen Sickerlinie abgesenkt hat. Senkrecht zur Sickerlinie verlaufen die Äquipotenziallinien. Entlang dieser Linien ist im Gebirge die gleiche Standrohrspiegelhöhe vorhanden.

Betrachtet man einen unterhalb der Sickerlinie liegenden Kluffkörper, so wird dieser durch den Wasserdruck belastet. Der auf dem Kluffkörper angreifende Wasserdruck kann in zwei Anteile zerlegt werden (Bild 2 oben links). Dies ist zum einen der in grün dargestellte hydrostatische Wasserdruck und zum anderen der in rot dargestellte Strömungsdruck.

Als resultierende Kräfte auf den Kluffkörper ergeben sich aus dem hydrostatischen Druck die Auftriebskraft und aus dem hydrodynamischen Druck die Strömungskraft. Die Auftriebskraft ist der Gravitationskraft entgegengerichtet und entspricht dem Gewicht des durch den Kluffkörper verdrängten Wasservolumens. Die Strömungskraft ist in Richtung des Gradienten gerichtet.

In den Standsicherheitsnachweisen für die Böschung muss für jeden Bauzustand der sich zu diesem Zeitpunkt einstellende Grundwasserstand berücksichtigt werden. Die für die Grundwasserabsenkung erforderliche Zeit hängt neben der Aushubtiefe auch von den Eigenschaften des Baugrunds ab.

Das Bild 3 zeigt qualitativ den Einfluss der Höhe des Grundwasserspiegels auf die Standsicherheit. Oben links im Bild 3 stellt sich beispielsweise keine oder nur eine sehr geringe Absenkung während der Bauphase ein. In diesem Fall ist der Strömungsdruck am größten und die Standsicherheit am geringsten. Mit absinkendem Grundwasserspiegel nehmen die Strömungskräfte in der Böschung ab und die Standsicherheit der Böschung zu.

**Stationäre Sickerströmung im Lockergestein**

Im Lockergestein können die Bodenkörner als undurchlässig angenommen werden, die Strömung findet in den Poren statt. Man spricht deshalb auch von einem Porenwasserleiter. In der Regel kann dabei die Kompressibilität des Korngerüsts und des Porenwassers vernachlässigt werden.

Zur Beschreibung der Sickerströmung wird in der Bodenmechanik das Gesetz von DARCY angewandt. Die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  wird dabei definiert als Quotient aus dem Durchfluss  $Q$  und der Querschnittsfläche  $A$  senkrecht zur Fließrichtung (Bild 4).

Nach dem Gesetz von DARCY ist  $v_f$  proportional zum hydraulischen Gradienten  $I$ . Der hydraulische Gradient  $I$  ist die Änderung der Standrohrspiegelhöhe  $\Delta h$  bezogen auf die durchströmte Länge  $L$ . Der Proportionalitätsfaktor  $k_f$  wird als Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens bezeichnet [1,2,3].

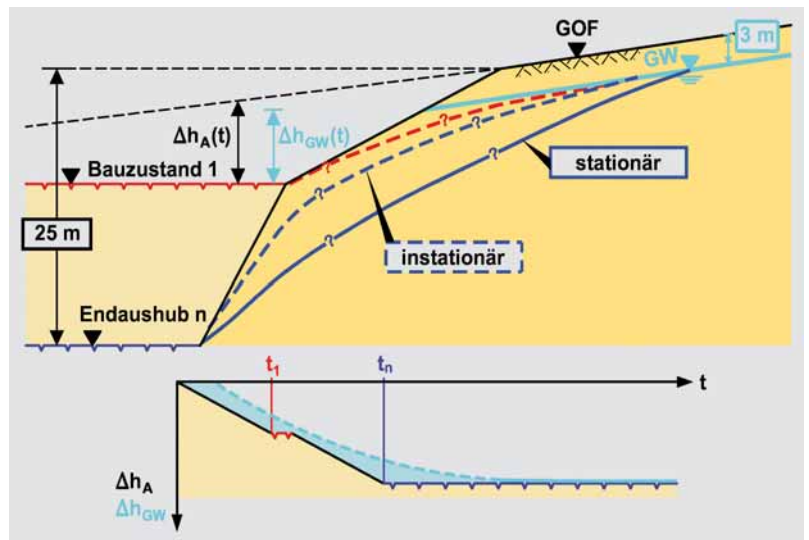


Bild 1. Aushub eines Einschnitts mit gleichzeitiger Grundwasserabsenkung, Prinzip.

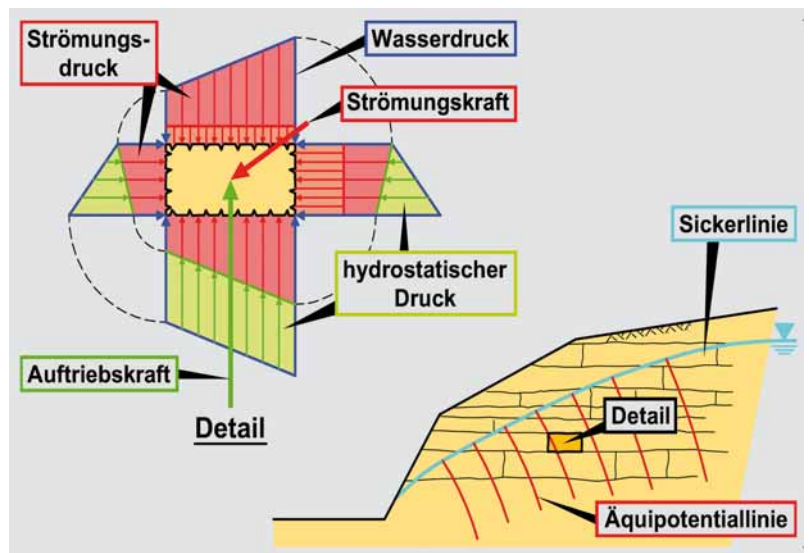
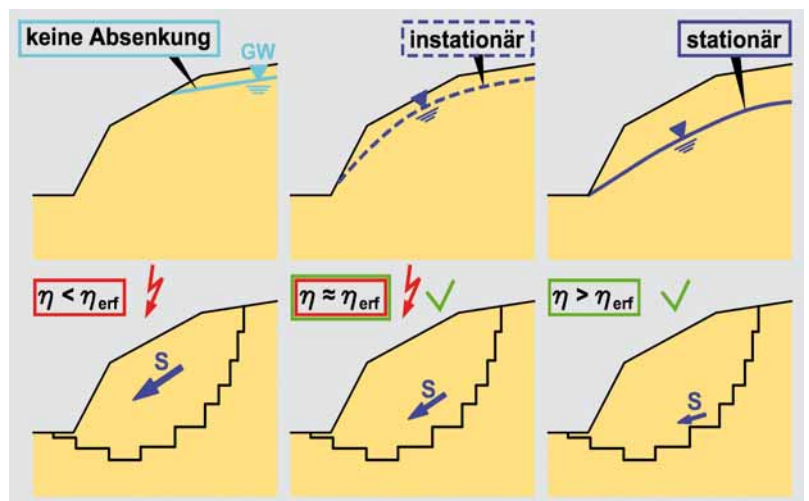


Bild 2. Kräfte auf einen Kluffkörper infolge Wasserdrucks.

Bild 3. Einfluss des Grundwasserspiegels auf die Standsicherheit, Prinzip.



Sommer:  
Standicherheit von Felsböschungen beim Lastfall schnelle Absenkung

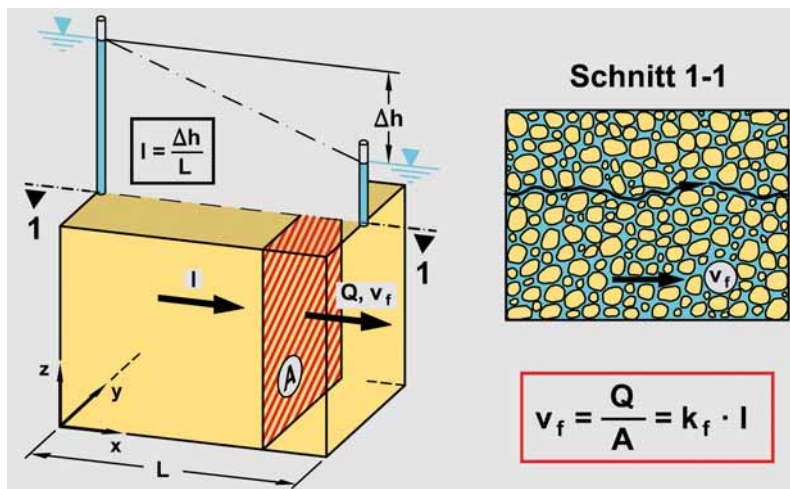


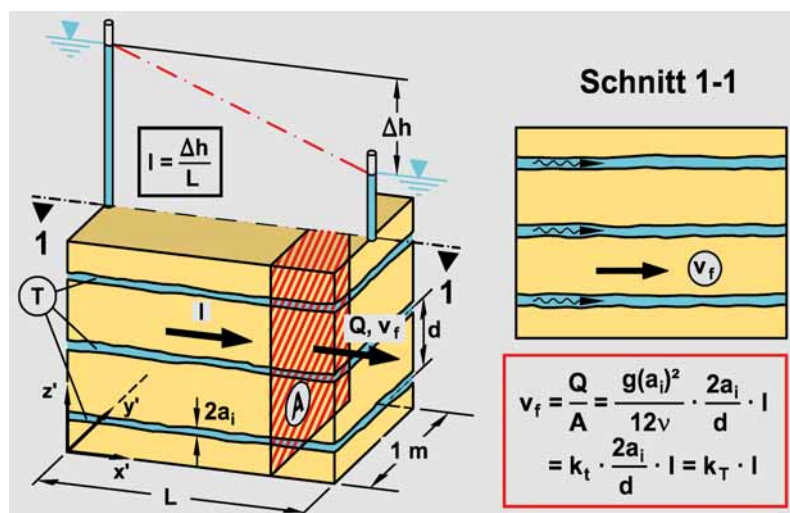
Bild 4. Gesetz von DARCY für einen Boden.

### Stationäre Sickerströmung im Fels

Auch die meisten Gesteine sind sehr gering durchlässig, sodass für klüftigen Fels angenommen werden kann, dass die Sickerströmung nur in den Trennflächen stattfindet. Man spricht dann von einem Kluftwasserleiter. Bei der Beschreibung der Sickerströmung im klüftigen Fels können ebenfalls in den meisten Fällen die Kompressibilität des Gesteins und des Kluftwassers vernachlässigt werden [1, 2, 3].

Zur Beschreibung des hydraulischen Verhaltens von Trennflächen werden in der Literatur verschiedene Ansätze vorgestellt [1]. Wendet man die Gesetze der eindimensionalen Spaltströmung auf die Durchströmung von Trennflächen an, so kann nachgewiesen werden, dass bei der Durchströmung von Trennflächen gewöhnlich laminares Fließen vorherrscht. Turbulente Strömungsverhältnisse treten erst bei vergleichsweise großen Trennflächenöffnungsweiten oder hohen hydraulischen Gradienten auf. Im Allgemeinen kann die Annahme laminarer Strömungsverhält-

Bild 5. Gesetz von DARCY für einen Fels mit einer Trennflächenschar.



nisse im Felsbau als eine hinreichend genaue Näherung angesehen werden.

Zur Beschreibung der Sickerströmung in klüftigem Fels durch ein homogenes Modell wird die aus der Bodenmechanik bekannte Filtergeschwindigkeit  $v_f$  eingeführt, die ebenfalls als Quotient aus dem Durchfluss  $Q$  und der Querschnittsfläche  $A$  senkrecht zur Fließrichtung definiert wird. Die Querschnittsfläche umfasst dabei sowohl den Querschnitt der Trennflächen als auch den des hier als undurchlässig angenommenen Gesteins. Das Bild 5 zeigt die Definition der Filtergeschwindigkeit für einen Fels mit einer Trennflächenschar, der parallel zu den Trennflächen durchströmt wird. Der Proportionalitätsfaktor  $k_f$  wird als Durchlässigkeitsbeiwert der Trennflächenschar  $T$  bezeichnet.

Zur Veranschaulichung der Größenordnung der Durchlässigkeit von klüftigem Fels sind im Bild 6 die Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  parallel zu einer Trennflächenschar mit einem Trennflächenabstand von  $d = 1$  m sowie verschiedenen Öffnungsweiten und Rauigkeiten isotropen Durchlässigkeitsbeiwerten von Lockergestein gegenübergestellt. Danach entspricht zum Beispiel die Durchlässigkeit eines entsprechenden Felses mit einer Trennflächenöffnungsweite von  $2a_i = 2,5$  mm der Durchlässigkeit eines Kieses. Für  $2a_i = 0,05$  mm ergibt sich bereits die Durchlässigkeit eines Schluffs.

Die in dem Bild 5 angegebene Gleichung gilt für den Fall, dass der hydraulische Gradient  $I$  parallel zu den Trennflächen gerichtet ist. Im allgemeinen Fall besitzt der Vektor des Gradienten  $\{I\}$  auch eine Komponente normal zur Trennflächenschar. Da das Gestein als undurchlässig angenommen wird, führt diese Komponente zu keiner Sickerströmung. Nur die Projektion  $\{I_T\}$  des hydraulischen Gradienten  $\{I\}$  auf die Trennflächenebene bewirkt eine Sickerströmung, die in der Regel zweidimensional ist.

Im allgemeinen Fall tritt an die Stelle des Durchlässigkeitsbeiwerts  $k_f$  der Durchlässigkeitstensor  $[k_f]$  [1, 2]. Der Vektor  $\{v_f\}$  der Filtergeschwindigkeit ergibt sich dann aus der Multiplikation des Durchlässigkeitstensors mit dem Vektor  $\{I\}$  des hydraulischen Gradienten. Das Bild 7 zeigt dies beispielhaft für einen Fels mit einem orthogonalen Trennflächengefüge.

Für einen Fall mit mehreren Trennflächenscharen lässt sich der Durchlässigkeitstensor näherungsweise durch additive Überlagerung der Durchlässigkeitstensoren der einzelnen Trennflächenscharen berechnen.

### Instationäre Sickerströmung

Die instationäre Sickerströmung lässt sich durch eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung für die Standrohrspiegelhöhe beschreiben [1, 2]:

Bei der Herleitung dieser Gleichung wird die Kompressibilität des Felses und des Kluftwassers vernachlässigt. In der Differentialgleichung (1) stellen  $q_v$  Quellen oder Senken, das heißt je

Einheitsvolumen und Zeiteinheit eintretende beziehungsweise austretende Wassermengen dar. Durch Integration dieser Gleichung erhält man die Verteilung der Standrohrspiegelhöhen  $h(x, y, z, t)$  im Untergrund in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ .

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{f,xx} \times \frac{\partial h}{\partial x} + k_{f,xy} \times \frac{\partial h}{\partial y} + k_{f,xz} \times \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{f,yx} \times \frac{\partial h}{\partial x} + k_{f,yy} \times \frac{\partial h}{\partial y} + k_{f,yz} \times \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{f,zx} \times \frac{\partial h}{\partial x} + k_{f,zy} \times \frac{\partial h}{\partial y} + k_{f,zz} \times \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_v = S_0 \times \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1) \end{aligned}$$

Im stationären Fall ändert sich die Standrohrspiegelhöhe über die Zeit nicht, sodass die partielle Ableitung der Standrohrspiegelhöhe nach der Zeit (rechte Seite der Differenzialgleichung) gleich Null ist.

In der instationären Phase ändert sich die Standrohrspiegelhöhe über die Zeit (rechte Seite der Differenzialgleichung ungleich Null). Die instationäre Phase der Sickerströmung wird durch den spezifischen Speicherkoeffizienten  $S_0$  des Baugrunds bestimmt.

Der spezifische Speicherkoeffizient  $S_0$  ist bei einer instationären Sickerströmung mit freier Oberfläche als das Wasservolumen definiert, das bei Verringerung beziehungsweise Erhöhung der Standrohrspiegelhöhe um eine Einheit aus einem beziehungsweise in ein Einheitsvolumen  $V$  mit einem anteiligen Kluftvolumen

$$S_0 = \frac{1}{V} \times \frac{\partial V_K}{\partial h} = \frac{\partial n_K}{\partial h} \quad (2)$$

abfließen respektive zufließen kann:

$$n_K = \frac{V_K}{V} \quad (3)$$

Durch die Größe von  $S_0$  wird die zeitliche Veränderung der Verteilung der Standrohrspiegelhöhen, das heißt die Dauer der instationären Phase, bestimmt. Je geringer  $S_0$  ist, umso kürzer ist die instationäre Phase.

Für einen ungespannten Grundwasserleiter lässt sich der spezifische Speicherkoeffizient  $S_0$  aus dem Verhältnis des Porenanteils zur Mächtigkeit  $H$  des Grundwasserleiters bestimmen.

### Einfluss des spezifischen Speicherkoeffizienten auf die Absenkung

Im Bild 8 sind auf der linken Seite  $k_f$ -Werte für drei Bodenarten angegeben. Die Porenanteile dieser Böden liegen in der Regel zwischen 20 und 40 %, obwohl sich die Durchlässigkeitsbeiwerte stark voneinander unterscheiden.

Der für die Berechnung der Strömungsvorgänge maßgebende entwässerbare Hohlraumanteil ist vom bindigen beziehungsweise

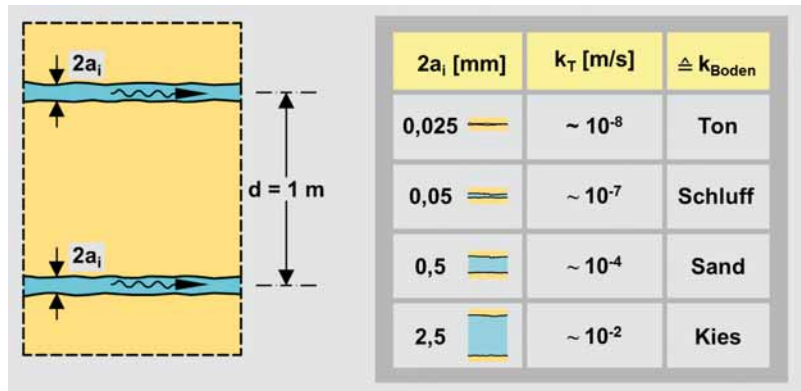


Bild 6. Vergleich von Durchlässigkeitsbeiwerten für einen Fels und einen Boden.

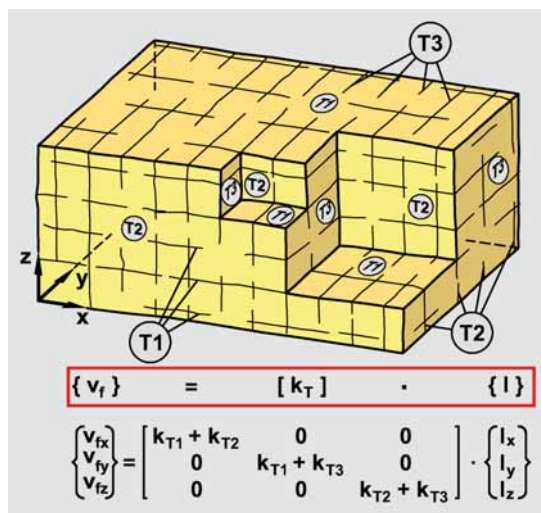


Bild 7. Bestimmung des Durchlässigkeitstensors für einen Fels mit einem orthogonalen Trennflächengefüge.

nicht-bindigen Charakter des Aquifermaterials abhängig [4]. Er ist in der Regel geringer als der Porenanteil des Bodens. In diesem Beispiel wird vereinfachend der entwässerbare Porenanteil der Böden einheitlich zu 30 % angenommen. Unter der Annahme, dass die Mächtigkeit des Grundwasserleiters 20 m beträgt, ergibt sich sowohl für einen Schluff als auch für Sand und Kies jeweils der gleiche spezifische Speicherkoeffizient von  $1,5 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ .

Auf der rechten Seite im Bild 8 sind drei Felsarten mit den gleichen Durchlässigkeitsbeiwerten wie die zuvor vorgestellten Bodenarten dargestellt. Der hier betrachtete Schluffstein, Sandstein und Dolomit sollen jeweils ein orthogonales Trennflächengefüge aufweisen. Die Trennflächenabstände sollen einheitlich circa 1 m betragen. Es wird angenommen, dass die Strömung nur in den Trennflächen erfolgt und dass laminare Strömungsverhältnisse vorliegen.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte und der Kluftanteil können dann in Abhängigkeit von der Öffnungsweite  $2a_i$  und dem Abstand  $d$  der Trennflächen bestimmt werden (Bild 8) [1, 2, 3].

Sommer:  
Standstabilität von Felsböschungen beim Lastfall schnelle Absenkung

Die spezifischen Speicherkoeffizienten unterscheiden sich für unterschiedliche Felsarten voneinander und sind zudem deutlich geringer als für einen Boden (Bild 8). Vergleicht man bei-

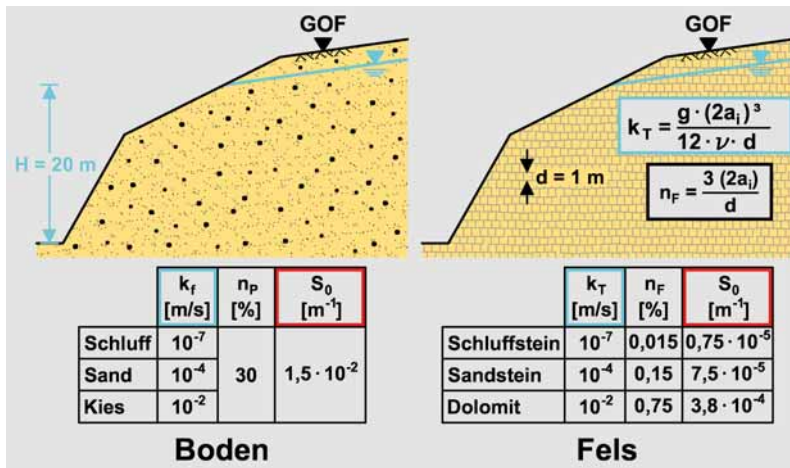


Bild 8. Vergleich der spezifischen Speicherkoeffizienten für einen Fels und einen Boden.

spielsweise einen Schluff mit einem Schluffstein, so ist der Speicherkoeffizient eines Schluffsteins etwa um den Faktor 1.000 kleiner.

Wie die folgenden Beispiele zeigen, kann die Größe des spezifischen Speicherkoeffizienten einen maßgeblichen Einfluss auf die Absenkgeschwindigkeit haben. Betrachtet wird der zu Anfang vorgestellte 25 m hohe Einschnitt (Bild 1).

Vor Beginn der Baumaßnahme zum Zeitpunkt  $t = 0$  steht das Grundwasser circa 3 m unterhalb der Geländeoberfläche an. Im oberen Bereich wird die Böschung mit einer Neigung von 1 : 2 und darunter mit einer Neigung von 60° hergestellt (Bild 1).

Zur Ermittlung der Sickerlinie werden instationäre Sickerströmungsberechnungen auf der Grundlage der FE-Methode unter Verwendung des Programmsystems HYDOPO durchgeführt. Dieses Programmsystem wurde von WBI zur Berechnung dreidimensionaler, instationärer Strömungsvorgänge in porösen und doppelt porösen Medien entwickelt [1, 2, 3].

Das Bild 9 zeigt das FE-Netz und die hydraulischen Randbedingungen. In den Berechnungen wird vereinfachend angenommen, dass der Aushub des Einschnitts in einem Rechenschritt erfolgt.

Für den rechten Rand des FE-Netzes wird angenommen, dass das Grundwasser 3 m unter der Geländeoberfläche (GOF) ansteht. Der untere und der linke Rand des FE-Netzes werden undurchlässig angenommen. Für den Bereich der Böschung wird angenommen, dass Wasser austreten kann.

Das Bild 10 zeigt die Sickerlinien für den Kies, Dolomit und Schluffstein einen Monat nach Beginn der Absenkung. Der Kies weist sowohl eine große Durchlässigkeit von  $10^{-2}$  m/s, als auch aufgrund seines großen Porenanteils einen großen spezifischen Speicherkoeffizienten auf. Beim Dolomit ist aufgrund der großen Öffnungsweiten der Trennflächen die Durchlässigkeit ebenfalls groß (Bild 8). Der spezifische Speicherkoeffizient ist aufgrund des geringen Kluftanteils jedoch klein. Beim Schluffstein sind die Öffnungsweiten der Trennflächen gering, sodass sowohl die Durchlässigkeit mit  $10^{-7}$  m/s als auch der spezifische Speicherkoeffizient klein sind. Im Vergleich zeigen die Absenkkurven einen Monat nach Beginn der Absenkung keinen nennenswerten Unterschied.

Die exemplarisch für einen auf Höhe des Aushubniveaus unterhalb des Böschungsausschnitts liegenden Punkt dargestellten Verläufe der Standrohrspiegelhöhe (Bild 11) zeigen zu Beginn eine relativ rasche Absenkung und haben nach circa fünf Tagen einen stationären Zustand erreicht. Auch bei den Zeitverläufen ist kein nennenswerter Unterschied für einen Kies, Dolomit und Schluffstein zu erkennen, sodass zusammenfassend festgehalten werden kann, dass bei großer Durchlässigkeit die Größe des spezifischen Speicherkoeffizienten keinen

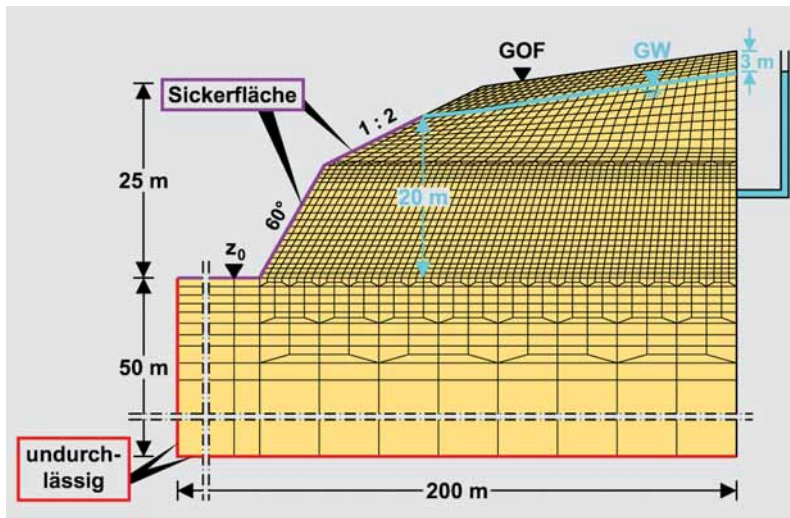
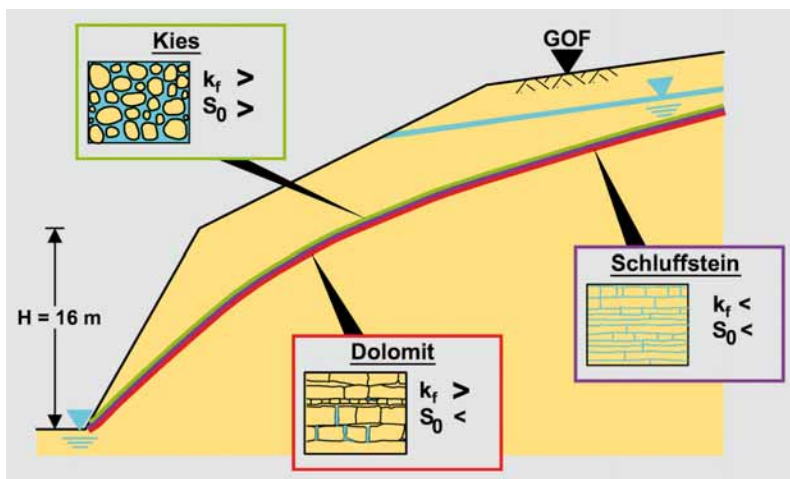


Bild 9. FE-Netz und hydraulische Randbedingungen.

Bild 10. Absenkung nach einem Monat für einen Kies, einen Dolomit und einen Schluffstein.



nennenswerten Einfluss auf die Absenkung hat. Die Absenkung erfolgt immer relativ schnell. Ist der spezifische Speicherkoeffizient wie im Fall des Schluffsteins klein, so erfolgt trotz einer nur geringen Durchlässigkeit die Absenkung ebenfalls schnell.

Bei den im Bild 12 dargestellten Beispielen stellt sich hingegen einen Monat nach Beginn der Absenkung noch keine oder nur eine deutlich geringere Absenkung ein als in den zuvor beschriebenen Fällen. Der Schluff weist eine geringe Durchlässigkeit, aber einen großen spezifischen Speicherkoeffizienten auf. Bei dem dargestellten anisotropen Fels ist in horizontaler Richtung die Durchlässigkeit deutlich größer als in vertikaler Richtung. Ein Beispiel für solch einen Fels stellt beispielsweise eine Wechsellagerung dar, bei der horizontale geringdurchlässige Schichten zwischengeschaltet sind.

Für den Fall, dass der im Bild 11 beschriebene Schluffstein entfestigt und verwittert ist, ist neben dem Trennflächenanteil ein zusätzliches Porenvolumen vorhanden, durch das sich der spezifische Speicherkoeffizient deutlich vergrößert. Die Absenkung dauert in diesem Fall entsprechend länger (Bild 12).

### Schlussfolgerungen

Aufgrund des im Vergleich zum Boden geringen spezifischen Speicherkoeffizienten eines klüftigen und hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit isotropen Felses erfolgt eine Grundwasserabsenkung auch bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit relativ schnell.

Verhält sich der Fels hinsichtlich seiner Durchlässigkeit anisotrop und ist die Durchlässigkeit in vertikaler Richtung deutlich geringer als in horizontaler Richtung, so sind zur Grundwasserabsenkung zusätzliche Entwässerungsmaßnahmen erforderlich. Dies können beispielsweise Entwässerungsbohrungen sein, die vor und während des Aushubs sukzessive hergestellt werden.

In Böden mit einer geringen Durchlässigkeit, wie beispielsweise einem Schluff ist keine Grundwasserabsenkung über die Schwerkraft möglich. Die Absenkung kann in diesem Fall über eine Vakuumentwässerung erfolgen.

Für den Nachweis der Standstabilität ist für die einzelnen Bauzustände die sich tatsächlich einstellende Sickerlinie zu berücksichtigen. Ein wirtschaftlicher und sicherer Entwurf kann neben Sicherungsmaßnahmen auch für die Baugrundverhältnisse angemessene Entwässerungsmaßnahmen beinhalten.

### Quellennachweis

[1] Wittke, W.: Felsmechanik – Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, (1984).

[2] Wittke, W.: Tunnelstatik – Grundlagen. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-Print 4. Verlag Glückauf (heute VGE Verlag GmbH), Essen, (1999).

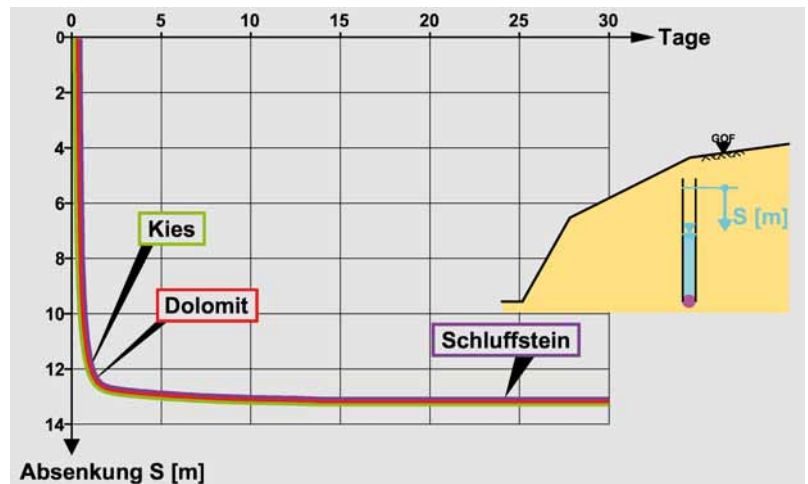


Bild 11. Verlauf der Standrohrspiegelhöhe über die Zeit.

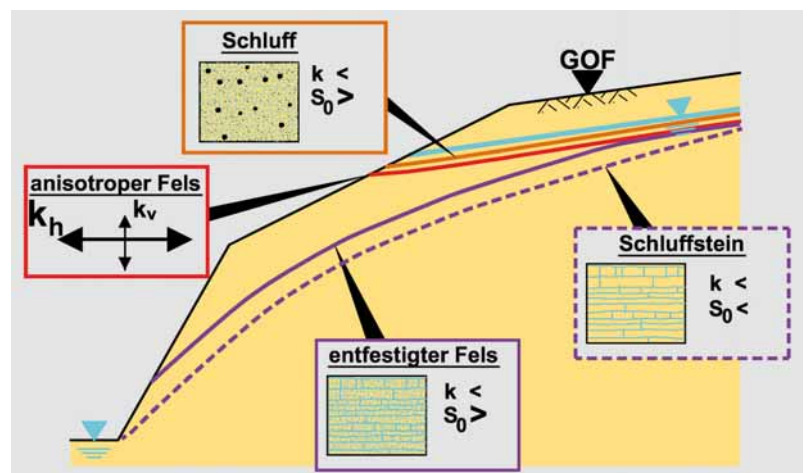


Bild 12. Absenkung nach einem Monat für einen Schluff, einen anisotropen und einen entfestigten Fels.

[3] Wittke, W.; Druffel, R.; Erichsen, C.; Gattermann, J.; Kiehl, J. R.; Schmitt, D.; Tegelkamp, M.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke-Schmitt, B.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe, WBI-Print 6. VGE Verlag GmbH, Essen, (2006).

[4] Beims, U.: Materialien zur Altlastenbehandlung, Simulation von Grundwasserströmungs- und Schadstofftransportprozessen in Lockergesteinsgrundwasserleitern im Rahmen der Altlastenbehandlung. Institut für Forschung und Weiterbildung in der Umwelttechnik, Dresden, (1996).