

Design and Construction of Tunnels in Jointed Rock According to the AJRM Method – Part 2

Planung und Ausführung von Tunnelbauwerken im klüftigen Fels nach der AJRM-Methode – Teil 2

The first part of this article was published in the 3/2021 issue of tunnel [15]. There, the authors present the AJRM method. The rock mechanical model is explained. With the aid of case studies, the advantages of a realistic simulation of the behavior of jointed rock as well as of the interaction of rock mass and structure are illustrated. As announced, part 2 of the article deals with the rock hydraulic model and related case studies as well as with the determination of the required parameters. Thus, an overall method for a safe and economic design of structures as well as for groundwater modeling in jointed rock is available.

Der erste Teil dieses Artikels wurde in tunnel 3/2021 [15] veröffentlicht. Dort wird die AJRM Methode vorgestellt und das zugrunde liegende felsmechanische Modell erläutert. Anhand von Fallstudien verdeutlichen die Autoren die Vorteile einer wirklichkeitsnahen Erfassung des Verhaltens von klüftigem Fels sowie des Zusammenwirkens von Baugrund und Bauwerk. Wie angekündigt, befasst sich der vorliegende Teil 2 des Artikels mit dem felshydraulischen Modell und zugehörigen Fallbeispielen sowie mit der Bestimmung der erforderlichen Kennwerte. Damit liegt eine gesamthafte Methode für einen sicheren und wirtschaftlichen Entwurf von Bauwerken sowie für die Grundwassermodellierung im klüftigen Fels vor.

Dr.-Ing. Martin Wittke, Dr.-Ing. Bettina Wittke-Schmitt, Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann,
Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Management/Geschäftsführer, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

4 Determination of Rock Mechanical Properties

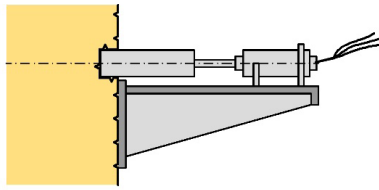
4.1 Laboratory and Field Tests

The discontinuities have a decisive influence on both, the deformability and the strength of a rock mass. Therefore, in order to obtain reliable information on the deformability of the rock mass, strictly speaking, it is necessary to test rock volumes whose size is a multiple of the discontinuity spacing. Since samples with such dimensions can hardly be taken and transported to a laboratory, field tests were developed in the early days of rock mechanics, which enable testing large volumes of rock mass. In Large Flat Jack (LFJ) tests, for example, flat jacks ranging in size from one to several square meters are inserted into sawn slots, and slot openings are measured as a function of applied compressive stress (Fig. 16 [5, 6]). From the measurement results, the deformation modulus of the rock mass can be derived. For cost reasons, these tests are not carried out as often. Instead, borehole expansion tests such as dilatometer or pressiometer tests are often carried out in exploratory drillings. In these tests, only a small rock mass volume is investigated. As a consequence, the influence of the discontinuities on the deformability is usually not recorded in a representative manner. As a result, these tests usually yield deformation moduli that

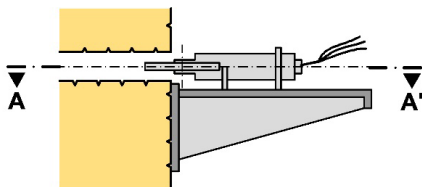
4 Bestimmung der felsmechanischen Kennwerte

4.1 Labor- und Feldversuche

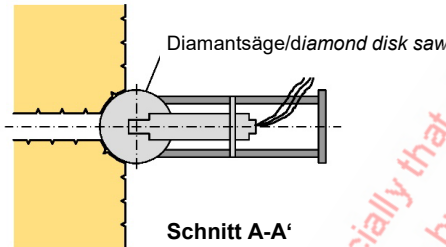
Die Trennflächen haben sowohl auf die Verformbarkeit als auch auf die Festigkeit eines Felses einen entscheidenden Einfluss. Um zuverlässige Angaben zur Verformbarkeit des Felses zu erhalten, muss man deshalb streng genommen Felsvolumina testen, deren Größe ein Mehrfaches des Trennflächenabstands beträgt. Da sich Proben mit derartigen Abmessungen kaum gewinnen und in ein Labor transportieren lassen, wurden schon in den Anfängen der Felsmechanik Feldversuche entwickelt, mit denen sich große Volumina untersuchen lassen. Beim Large Flat Jack Test beispielsweise werden Druckkissen mit der Größe von einem bis mehreren Quadratmetern in gesägte Schlitze eingeführt, und es werden die Schlitzöffnungen in Abhängigkeit von der aufgetragenen Druckspannung gemessen (Bild 16 [5, 6]). Aus diesen Messergebnissen kann man dann auf den Verformungsmodul des Felses schließen. Aus Kostengründen werden diese Versuche nicht so oft durchgeführt. Vielmehr werden im Zuge von Erkundungsbohrungen häufig Bohrlochaufweitungsversuche wie Dilatometer- oder Pressiometerversuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen sind die Abmessungen des getesteten Volumens klein, weshalb der Einfluss der Trennflächen auf die Verformbarkeit meist nicht repräsentativ erfasst wird. In der Folge liefern diese Versuche in der Regel zu große Moduln. Dies muss bei der



Abteufen Pilotbohrung
drilling of pilot hole

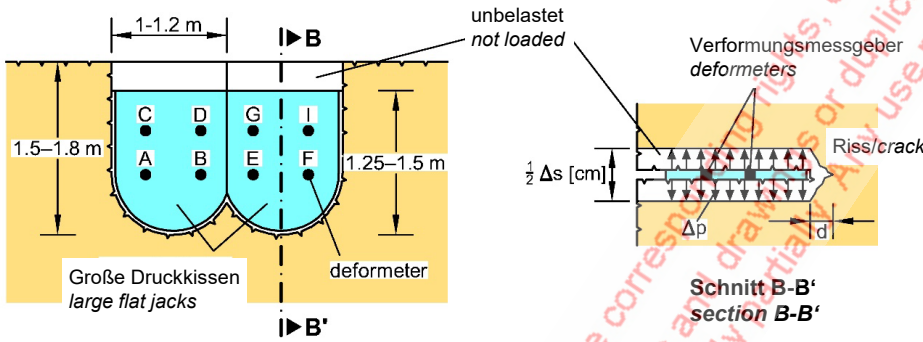


Schlitz sägen
sawing of slot



Schnitt A-A'
section A-A'

16 Large Flat Jack Test
Druckkissenversuch



Abmessung und Anordnung der Druckkissen/
dimension and arrangement of flat jacks

Credit/Quelle: [6]

are too high. This must be taken into account when evaluating the test results and deriving the rock mass parameters.

Also for determining reliable values for the shear strength along discontinuities, large-scale tests are needed. In-situ direct shear tests can be considered for this purpose (Fig. 17 [5, 6]). The strength of the intact rock, however, can be determined in laboratory tests on drill cores.

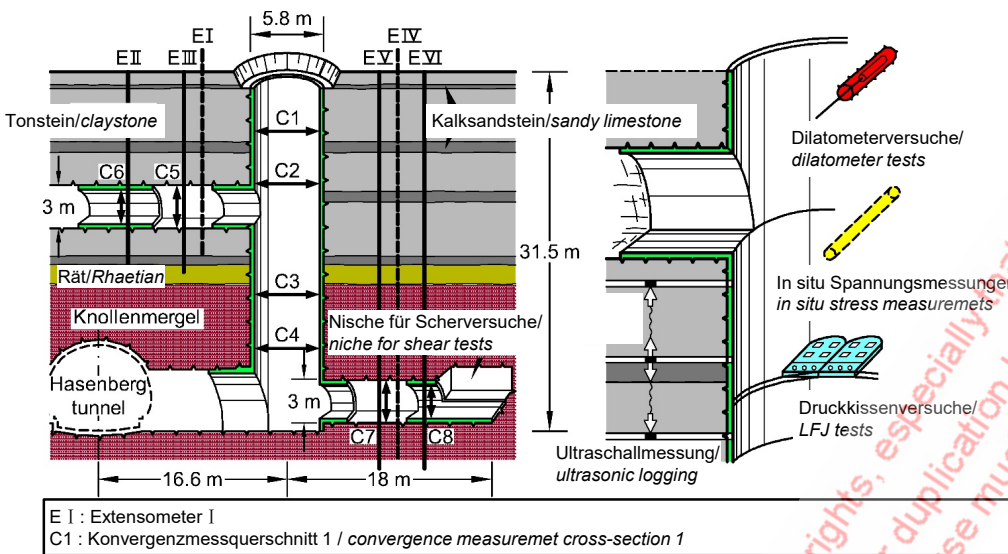
In the case of large scale construction projects for traffic tunnels or hydraulic structures, it is advisable to carry out rock mechanics testing programs in connection with advanced construction measures, such as access tunnels, ventilation shafts or similar. Figure 18 [5, 6, 10] shows a relevant example in which a ventilation shaft and two exploratory galleries were excavated before the start of the main construction work. Here, LFJ tests, in-situ direct shear tests, dilatometer tests, ultrasonic measurements and primary stress measurements were carried out. In addition, excavation-induced displacements were measured using extensometers and convergency measurements. Based on the results of the rock mechanics tests and an interpretation of the measured displacements using numerical calculations, it was possible to develop a reliable rock mechanics model with the required characteristic parameters.

Aus- und Bewertung der Versuchsergebnisse und der Ableitung der Kennwerte entsprechend berücksichtigt werden.

Die Festigkeit der Trennflächen lässt sich zuverlässig auch nur mit großmaßstäblichen Versuchen bestimmen. Hierfür kommen direkte Scherversuche in Betracht (Bild 17 [5, 6]). Die Festigkeit des unzerklüfteten Gesteins lässt sich dagegen in Laborversuchen an Bohrkernen bestimmen.



17 In situ shear test
Großscherversuch



18 Rock mechanical investigation program
Felsmechanisches Untersuchungsprogramm

Credit/Quelle: [5, 6, 10]

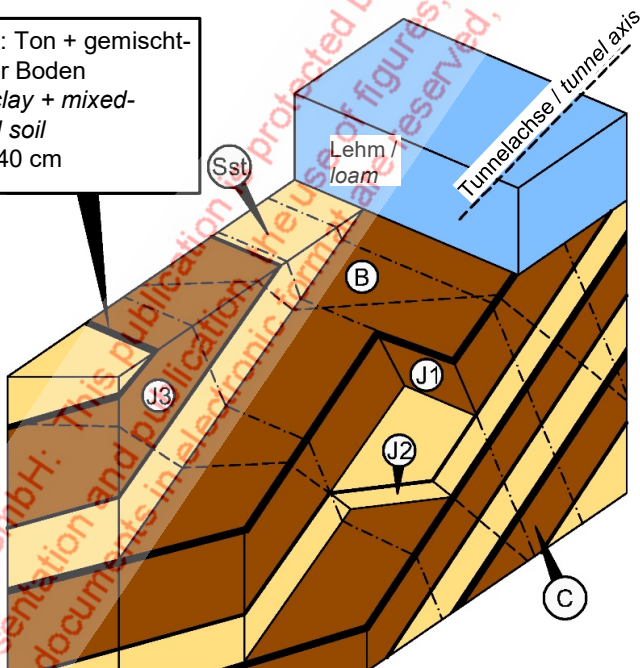
**Schnitt durch Schacht und Stollen/
cross-section through shaft and adits**

Detail

As mentioned above, the investments associated with the rock mechanics investigations can be combined with advanced construction measures. They usually pay off many times over due to the possibilities of safe and economic design and construction on the basis of reliable and realistic characteristic parameters. However, in case the experts contributing to a project have the required experience, it is also possible to determine the required parameters on the basis of small-scale tests (cf. chapters 4.2 and 4.3).

Bei großen Bauvorhaben des Verkehrstunnelbaus oder des Wasserbaus empfiehlt es sich, felsmechanische Untersuchungsprogramme in Verbindung mit vorgezogenen Baumaßnahmen wie Zugangsstollen, Lüftungsschächten o. ä. durchzuführen. **Bild 18** [5, 6, 10] zeigt ein einschlägiges Beispiel, bei dem ein Lüftungsschacht und zwei Erkundungsstollen vor Beginn der Haupt-Baumaßnahme aufgeföhren wurden. Hier wurden Druckkissenversuche (LFI-Tests), Großscherversuche, Dilatometerversuche, Ultraschallmessungen und Primärspannungsmessungen durchgeführt. Außerdem wurden die

Füllung: Ton + gemischt-körniger Boden
filling: clay + mixed-grained soil
 $t = 10-40$ cm



$$E_1 = 1000 \text{ MN/m}^2$$

$$E_2 = 400 \text{ MN/m}^2$$

$$G_2 = 325 \text{ MN/m}^2$$

$$v_1 = 0,25 \text{ MN/m}^2$$

$$v_2 = 0,1 \text{ MN/m}^2$$

$$\varphi_B = 25^\circ$$

$$c_B = 0$$

$$\varphi_J = 30-35^\circ$$

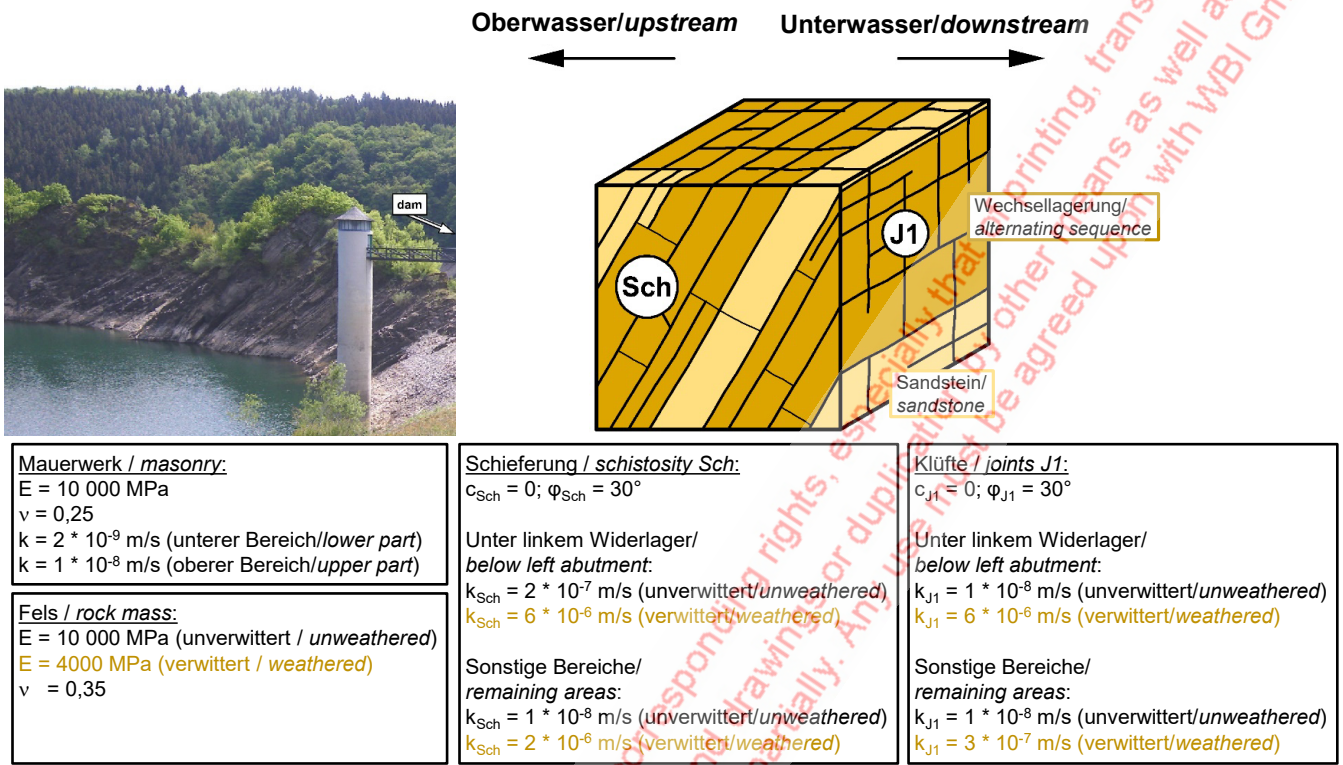
$$c_J = 0-0,02 \text{ MN/m}^2$$

19 Devonian sedimentary rock mass with clay fillings in bedding parallel discontinuities

Sedimentgestein (Devon) mit Tonfüllungen der Schichtfugen

Credit/Quelle: [6, 7]

(Sst) Sandstein sandstone (C) Tonstein claystone (B) Schichtung bedding (J1)-(J3) Klüfte joint sets



Credit/Quelle: [6, 16]

20 Rock mechanical model for the foundation of the Urft dam
Felsmechanisches Modell für die Gründung der Urftstaudammer

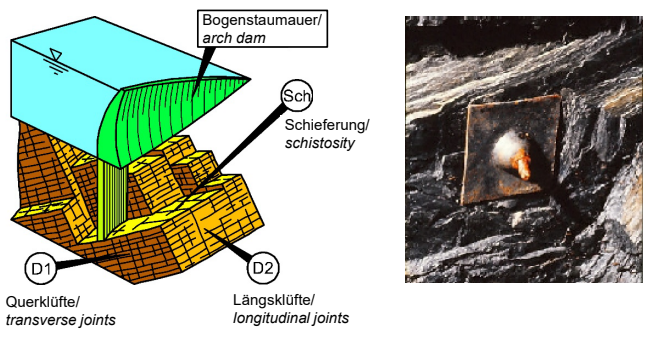
4.2 Interpretation of the Results of Measurements During Construction

In modern tunnel construction, the stability analyses do not only include the design of the temporary support and the internal lining, but also a prognosis of the expected displacements. Furthermore, the displacements of the cavity contour and the surrounding rock mass are continuously measured during heading and compared with the above-mentioned prognosis. On this basis, the tunnelling works and, in particular, the supporting measures are adapted to the conditions. Moreover, the interpretation (calibration) of the measurement results with adequate rock mechanical models and calculation methods allows for deriving reliable rock mechanical characteristic parameters. This makes it possible to compensate for any possible deficits in previous exploration phases (cf. chapter 4.1), if the other conditions of the project (e.g. contractual) enable a flexible adaptation to the encountered rock mass conditions. Also on the basis of such backanalyses, the authors have gained experience in numerous different rock mass conditions and have built up an extensive body of experience.

4.3 Empirical Values

From the above-mentioned body of experience, selected examples are given below.

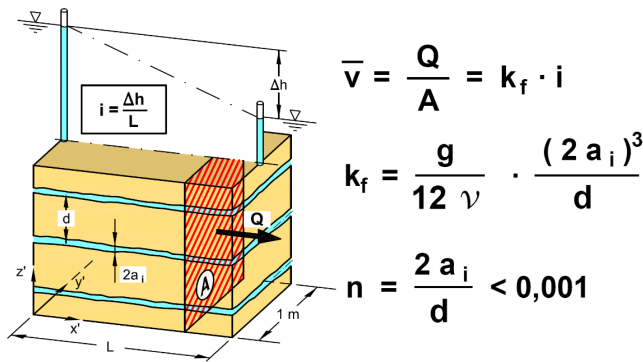
ausbruchbedingten Verschiebungen mit Hilfe von Extensometern und Konvergenzmessgeräten gemessen. Auf der Grundlage der Ergebnisse der felsmechanischen Versuche und einer Interpretation der gemessenen Verschiebungen mit Hilfe numerischer Berechnungen gelang es, ein zuverlässiges felsmechanisches Modell mit den benötigten Kennwerten zu erarbeiten.



<p><u>Elastische Konstanten / elastic constants:</u> $E_1 = 8000 - 12\,000$ MPa $E_2 = 1500 - 2500$ MPa $G_2 = 1000 - 1500$ MPa $\nu_1 = 0,2 - 0,3$ $\nu_2 = 0,02 - 0,1$</p>	<p><u>Gesteinsfestigkeit / intact rock strength:</u> $\varphi_{IR} = 30 - 40^\circ$ $c_{IR} = 10 - 15$ MPa</p>
<p><u>Durchlässigkeit / permeability:</u> $k = 10^{-6} - 10^{-4}$ m/s (abhängig von Tiefe/depending on depth)</p>	<p><u>Festigkeit auf Trennflächen / strength of discontinuities:</u> $\varphi_{Sch} = 25 - 35^\circ$ $c_{Sch} = 0,1 - 0,5$ MPa $\varphi_{D1,D2} = 30^\circ$ $c_{D1,D2} = 4$ MPa</p>

Credit/Quelle: [5, 6, 17]

21 Rock mechanical model for a clay slate
Felsmechanisches Modell für einen Tonschiefer



$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = k_f \cdot i$$

$$k_f = \frac{g}{12 \nu} \cdot \frac{(2 a_i)^3}{d}$$

$$n = \frac{2 a_i}{d} < 0,001$$



$2a_i$	k/D_h	k_D [m/s]	Δk_{soil}
0.025 mm	≤ 0.032	$1.0 \cdot 10^{-8}$	Ton/clay
	0.25	$0.5 \cdot 10^{-8}$	
0.05 mm	≤ 0.032	$0.8 \cdot 10^{-7}$	Schluff/silt
	0.25	$0.4 \cdot 10^{-7}$	
0.1 mm	≤ 0.032	$0.6 \cdot 10^{-6}$	
	0.25	$0.3 \cdot 10^{-6}$	
0.2 mm	≤ 0.032	$0.5 \cdot 10^{-5}$	
	0.25	$0.2 \cdot 10^{-5}$	
0.4 mm	≤ 0.032	$0.4 \cdot 10^{-4}$	Sand/sand
	0.25	$0.2 \cdot 10^{-4}$	
0.7 mm	≤ 0.032	$0.2 \cdot 10^{-3}$	
	0.25	$0.1 \cdot 10^{-3}$	
1.0 mm	≤ 0.032	$0.6 \cdot 10^{-3}$	Kies/gravel
	0.25	$0.3 \cdot 10^{-3}$	

Credit/Quelle: [5, 6]

22 Seepage flow through a set of parallel discontinuities and influence of the opening width of the discontinuities on the permeability of a rock mass

Sickerströmung in Trennflächenscharen und Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Öffnungsweite der Trennflächen

In the course of the design and construction of a road tunnel in Wuppertal [7], the rock mechanics model shown in **Figure 19** was developed. It shows an alternating sequence of sandstones and claystones beneath a cover of cohesive soil. The bedding parallel discontinuities exhibit fillings of clay and mixed-grained soil and lead to an anisotropy of deformability that can be described by the 5 elastic constants shown in **Fig. 19** (cf. also **Fig. 2** in part 1 of this publication [15]). The shear strength along the bedding parallel discontinuities can be described with an angle of friction $\phi_B = 25^\circ$ and a cohesion $c_B = 0 \text{ kN/m}^2$. For the shear strength along joints, a cohesion other than 0 can usually be taken into account in addition to the friction angle (**Fig. 19**).

For the alternating sequence of sandstone and claystone, as encountered in the area of the Urft dam in the Eifel mountains, an isotropic stress-strain behavior in the elastic range was found. However, in this case, a distinction had to be made between a near-surface weathered zone and the deeper unweathered part of the rock mass (**Fig. 20**, [6, 16]). The shear parameters along schistosity and joints are also compiled in **Figure 20**. Furthermore, the permeability coefficients in parallel with the schistosity and joints can be found in this figure. It should be noted that the permeability of the left rock abutment is greater than that in the other areas (cf. chapters 5 and 6).

The rock mechanical model of a clay shale from the Ernstbach valley near the town of Rüdeshcim at the Rhine river is shown in **Figure 21** [17, 6, 5]. It can be noted that the clay shale is strongly anisotropic in terms of both, deformability and strength. This is mainly due to the schistosity.

Die mit den Untersuchungen verbundenen Investitionen lassen sich, wie erwähnt, mit vorgezogenen Baumaßnahmen verbinden. Sie zahlen sich durch die Möglichkeiten einer sicheren und wirtschaftlichen Planung und Bauausführung auf der Grundlage abgesicherter und realistischer Kennwerte in der Regel um ein Vielfaches aus.

Bei Vorliegen einschlägiger Erfahrungen der beteiligten Fachleute ist es allerdings auch möglich, die erforderlichen Kennwerte anhand kleinmaßstäblicher Versuche zu ermitteln (vgl. Kap. 4.2 und 4.3).

4.2 Interpretation der Ergebnisse von Messungen bei der Baudurchführung

Im modernen Tunnelbau beinhalten die Standsicherheitsnachweise außer der Bemessung der temporären Sicherung und der Auskleidung auch Prognosen der zu erwartenden Verschiebungen. Weiterhin werden während des Vortriebs die Verschiebungen der Hohlraumwand und des umgebenden Gebirges fortlaufend gemessen und mit den o. g. Prognosen verglichen. Auf dieser Grundlage werden die Vortriebsarbeiten und dabei insbesondere die Sicherungsmittel an die Gegebenheiten angepasst.

Aus der Interpretation (Kalibrierung) der Messergebnisse mit geeigneten felsmechanischen Modellen und Berechnungsverfahren lassen sich aber auch zuverlässige felsmechanische Kennwerte ableiten. Damit lassen sich etwaige Defizite aus vorherigen Erkundungsphasen (vgl. Kap. 4.1) ausgleichen, wenn die sonstigen Randbedingungen (z. B. vertragliche) eine flexible Anpassung an die Gegebenheiten zulassen. Auch auf diesem Weg der Nachrechnung haben die Autoren Erfahrungen in zahlreichen unterschiedlichen Gebirgsverhältnissen

Further examples of this type can be found in [6]. The characteristic parameters given there for different rock mass conditions can be used as a basis for initial considerations in early project phases, when no other results are yet available, if the project participants have the required experience.

5 Rock Hydraulic Model

According to experience, the intact rock has a very low permeability and can be assumed to be impermeable, with a few exceptions only. Seepage flow in rock mass generally occurs through the discontinuities (cf. **Fig. 22**, bottom left) and is usually laminar. The average flow velocity for one-dimensional flow in a discontinuity can be derived by integrating the Navier-Stokes differential equations. For the one-dimensional seepage flow through a set of parallel discontinuities with constant spacing and constant opening width, a filter velocity related to the total cross-section is defined, following Darcy's law from soil mechanics (cf. [5, 6, 10] and **Fig. 22**, top left). This filter velocity is proportional to the 3rd power of the discontinuity opening width $2a_i$ and inversely

gesammelt und einen umfangreichen Erfahrungsschatz aufgebaut.

4.3 Erfahrungswerte

Aus dem oben erwähnten Erfahrungsschatz werden nachstehend einzelne Beispiele aufgeführt.

Im Zuge der Planung und des Baus eines Straßentunnels in Wuppertal [7] wurde das in **Bild 19** dargestellte felsmechanische Modell erarbeitet. Es zeigt unterhalb einer Lockergesteinsdecke aus bindigem Boden eine Wechsellagerung aus Sand- und Tonsteinen. Die Schichtfugenfüllungen aus Ton und gemischtkörnigem Boden führen zu einer Anisotropie der Verformbarkeit, die sich mit den dargestellten fünf elastischen Konstanten beschreiben lässt (**Bild 19**, vgl. auch **Bild 2** im Teil 1 der Veröffentlichung [15]). Die Scherfestigkeit parallel zur Schichtung lässt sich durch einen Reibungswinkel von $\varphi_B = 25^\circ$ und eine Kohäsion von $c_B = 0 \text{ kN/m}^2$ beschreiben. Für die Klüfte kann in der Regel außer dem Reibungswinkel noch eine Kohäsion in Ansatz gebracht werden (**Bild 19**).

Für die Wechsellagerung aus Sand- und Tonstein, wie sie im Bereich der Urftalsperre in der Eifel angetroffen wurde, konnte ein isotropes Spannungsdehnungsverhalten im elastischen

IF IT
ROLLS ON RAILS,
WE'VE GOT YOU COVERED.

Completely rebuilt and repowered Plymouth 25 ton locomotive, flat cars and muck cars work on SAK's Deer Creek project in St. Louis, Missouri.

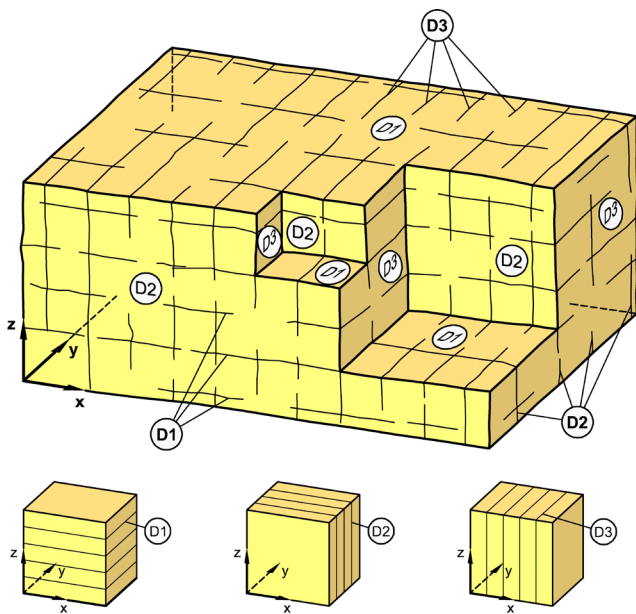


HEAD OFFICE
+1 (970) 259-0412

EUROPEAN OFFICE
+49 (6061) 97969-30

MININGEQUIPMENTLTD.COM

- > LOCOMOTIVES
- > ROLLING STOCK
- > JETAIR VENTILATION SYSTEMS
- > MINE HOISTS & STAGE WINCHES
- > METALLIANCE MSVs
(NORTH AMERICAN, GERMAN DEALER)



$$[K_{D1}] = \begin{bmatrix} k_{D1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{D1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [K_{D2}] = \begin{bmatrix} k_{D2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{D2} \end{bmatrix}; \quad [K_{D3}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{D3} & 0 \\ 0 & 0 & k_{D3} \end{bmatrix}$$

$$[K] = [K_{D1}] + [K_{D2}] + [K_{D3}] = \begin{bmatrix} k_{D1} + k_{D2} & 0 & 0 \\ 0 & k_{D1} + k_{D3} & 0 \\ 0 & 0 & k_{D2} + k_{D3} \end{bmatrix}$$

Credit/Quelle: [5, 6]

23 Permeability of a rock mass intersected by three orthogonal sets of discontinuities

Wasserdurchlässigkeit eines Felses mit drei senkrecht aufeinander stehenden Trennflächenscharen

proportional to the discontinuity spacing δ . Thus, the opening width of the discontinuities $2a$, has a major influence on the seepage flow in rock masses, in addition to the discontinuities spacing and the viscosity of water. For the three-dimensional case of a rock mass with three sets of discontinuities, which are perpendicular to each other, a permeability matrix can be determined by superposing the permeabilities of the individual sets of discontinuities. This matrix has values deviating from 0 only in the main diagonal, and multiplied by the three components of the spatial gradient I , it yields the three components of the filter velocity (Fig. 23 [5, 6]):

$$\{v\} = [K] \cdot \{I\}$$

In this approach, the flow losses along the lines of intersection of the discontinuities are neglected. This assumption is permissible for the low flow velocities occurring in practice. A similar approach is taken in the case of discontinuity sets that are not perpendicular to each other [5, 6].

In most cases, the permeability of the rock mass is strongly anisotropic. Only in the special case of three orthogonal discontinuity sets with equal permeability,

Bereich festgestellt werden. Allerdings musste hier zwischen einem oberflächennahen, verwitterten Bereich und dem tieferen, unverwitterten Bereich unterschieden werden (Bild 20, [6, 16]). Die Scherparameter der Schieferung und der Klüftung sind ebenfalls in Bild 20 zusammengestellt. Weiterhin finden sich dort die Durchlässigkeitsbeiwerte parallel zur Schieferung und Klüftung der Formation. Dabei ist festzuhalten, dass die Wasserdurchlässigkeit des linken Felswiderlagers größer ist als die in den anderen Bereichen (vgl. Kapitel 5 und 6).

Das felsmechanische Modell eines Tonschiefers aus dem Ernstbachtal in der Nähe der Stadt Rudesheim am Rhein zeigt das Bild 21 [17, 6, 5]. Man erkennt, dass der Tonschiefer sowohl hinsichtlich der Verformbarkeit als auch hinsichtlich der Festigkeit stark anisotrop ist. Das ist im Wesentlichen durch die Schieferung bedingt.

Weitere Beispiele dieser Art finden sich in [6]. Die dort für verschiedene Gebirgsverhältnisse genannten Kennwerte können für erste Betrachtungen in frühen Projektphasen, wenn noch keine anderen Ergebnisse vorliegen, zugrunde gelegt werden, wenn die Projektbeteiligten über entsprechende Erfahrungen verfügen.

5 Felshydraulisches Modell

Das unzerklüftete Gestein besitzt erfahrungsgemäß eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit und kann – von wenigen Ausnahmen abgesehen – als undurchlässig angenommen werden. Die Sickerströmung im Fels erfolgt in der Regel durch die Trennflächen (vgl. Bild 22, links unten) und ist zumeist laminar. Die mittlere Fließgeschwindigkeit für die eindimensionale Strömung in einer Trennfläche lässt sich durch die Integration der Navier-Stoke'schen Differentialgleichungen herleiten. Für die eindimensionale Sickerströmung durch eine Schar paralleler Trennflächen mit konstantem Abstand und konstanter Öffnungsweite definiert man in Anlehnung an das Gesetz von Darcy aus der Bodenmechanik eine auf den Gesamtquerschnitt bezogene Filtergeschwindigkeit (vgl. [5, 6, 10] und Bild 22 links oben). Diese Filtergeschwindigkeit ist proportional zur 3. Potenz der Spaltweite $2a_i$ und umgekehrt proportional zum Trennflächenabstand δ . Damit ist die Öffnungsweite der Trennflächen $2a_i$ neben dem Trennflächenabstand und der Viskosität des Wassers ein wesentlicher Einflussfaktor für die Strömung im Fels.

Für den räumlichen Fall eines Felses mit drei senkrecht aufeinander stehenden Trennflächenscharen lässt sich durch Superposition der Durchlässigkeiten der einzelnen Trennflächenscharen eine Durchlässigkeitsmatrix ermitteln, die nur in der Hauptdiagonale besetzt ist und die multipliziert mit den drei Komponenten des räumlichen Gefälles die drei Komponenten der Filtergeschwindigkeit ergibt (Bild 23 [5, 6]):

$$\{v\} = [K] \cdot \{I\}$$

Bei dieser Vorgehensweise werden die Strömungsverluste entlang der Schnittlinien der Trennflächen vernachlässigt. Diese

a rock mass exhibits an isotropic permeability. The anisotropy of permeability strongly affects the direction of the resulting velocity of the seepage flow as well as of the seepage pressure. This makes the study of seepage flow in rock masses quite different from corresponding considerations in coarse-grained soils.

Figure 22 on the right contains a compilation of the permeability coefficients of a rock mass with a set of discontinuities with a constant spacing of 1 m and a constant opening width. It can be noted that the permeability of a rock mass with comparatively small opening widths of the discontinuities of only 0.7 to 1.0 mm already exhibits permeability values of a gravelly sand. On the other hand, the fracture volumes and thus also the storage capacity of the rock mass, are significantly smaller than those of a gravel. Both aspects are very important and have to be taken into account in design. For example, cutting water-filled discontinuities with small opening width during construction can lead to significant water inflows. In addition, the low fracture volume causes the groundwater table to rise much more after precipitation than, for example, in coarse-grained soils. The low fracture volume must also be taken into account when designing water catchment systems.

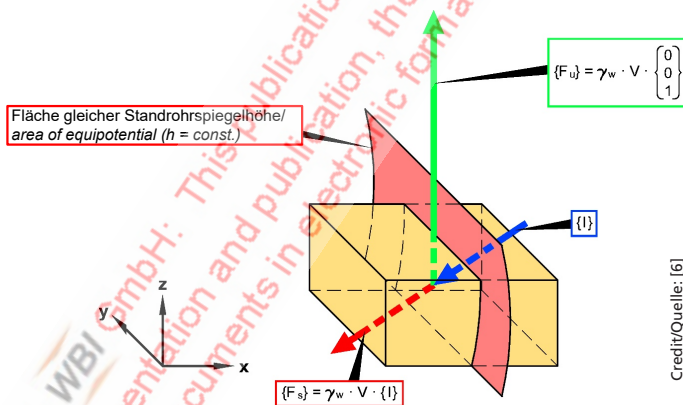
As in soil mechanics, the volume forces transmitted to the rock mass by the seepage flow are divided into the hydrostatic uplift $\{F_u\}$ and the hydrodynamic seepage pressure $\{F_s\}$ acting perpendicular to the areas of equal potentials (Fig. 24 [6]). The seepage pressure can have a considerable influence on the stability of slopes and dam abutments, for example, as well as of the temporary face in tunnel construction. Seepage flow must therefore be taken into account in stability analyses. As already mentioned, it must, however, be borne in mind that the

Annahme ist bei den geringen in der Praxis auftretenden Fließgeschwindigkeiten zulässig. Entsprechend wird im Falle von Trennflächenscharren vorgegangen, die nicht senkrecht aufeinander stehen [5, 6].

In den meisten Fällen ist die Wasserdurchlässigkeit des Felses stark anisotrop. Lediglich in dem Sonderfall dreier senkrecht aufeinander stehenden Trennflächen mit gleicher Durchlässigkeit besitzt ein Fels eine isotrope Durchlässigkeit. Die Anisotropie wirkt sich stark auf die Richtung der resultierenden Geschwindigkeit der Sickerströmung und des Strömungsdrucks aus. Dadurch unterscheidet sich die Untersuchung der Sickerströmung vom Fels deutlich von entsprechenden Betrachtungen in grobkörnigen Böden.

Bild 22, rechts, enthält eine Zusammenstellung der Durchlässigkeitsbeiwerte eines Felses mit einer Trennflächenschar mit einem konstanten Abstand von 1 m und konstanter Spaltweite. Man erkennt, dass die Wasserdurchlässigkeit eines Felses bei vergleichsweise geringen Öffnungsweiten der Trennflächen von 0,7–1,0 mm bereits die Werte eines Kiessandes annimmt. Andererseits sind die Kluftvolumina und damit auch das Speichervermögen des Felses deutlich geringer als die eines Kiesel. Beide Aspekte sind sehr wesentlich und bei Planungsaufgaben zu beachten. So kann beispielsweise ein Anschneiden von wassererfüllten Trennflächen geringer Spaltweite beim Bau zu erheblichen Wasserzuflüssen führen. Auch führt das geringe Kluftvolumen dazu, dass der Grundwasserspiegel nach Niederschlägen wesentlich stärker ansteigt als z. B. in grobkörnigen Lockergesteinen. Außerdem ist das geringe Kluftvolumen bei Wassergewinnungsanlagen zu berücksichtigen.

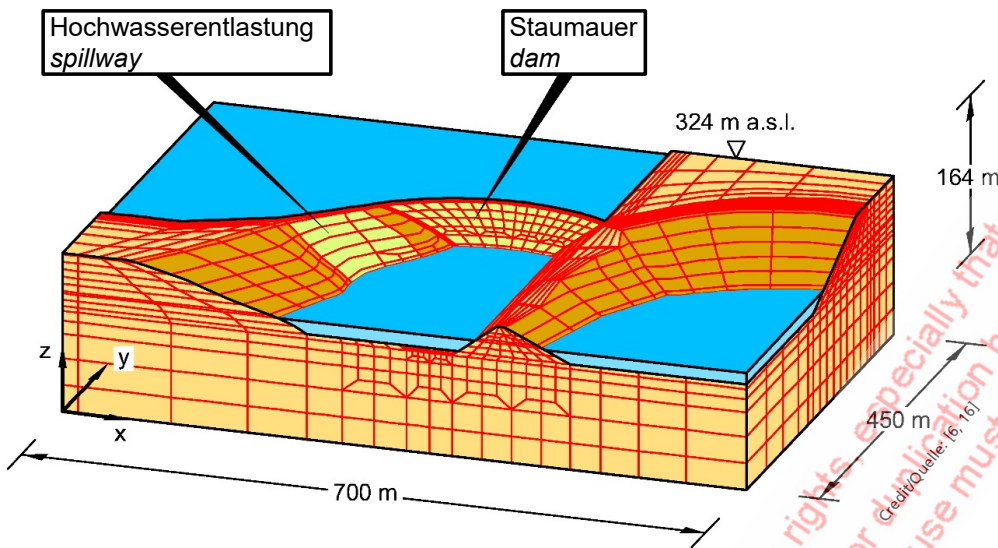
Die von der Sickerströmung auf den Fels übertragenen Volumenkräfte teilen sich wie in der Bodenmechanik in den hydrostatischen Auftrieb $\{F_u\}$ und den senkrecht zu den Flächen gleicher Standrohrspiegelhöhen wirkenden, hydrodynamischen Strömungsdruck $\{F_s\}$ auf (**Bild 24** [6]).



24 Uplift and seepage pressure in a jointed rock mass
Auftrieb und Strömungsdruck im klüftigen Fels



25 Urft dam and reservoir
Urfttalsperre



26 FE mesh for investigation of seepage flow through dam and foundation
FE-Netz zur Untersuchung der Sickerströmung durch Mauer und Untergrund
Credit/Quelle: [6, 16]

permeability of rock mass is anisotropic such that the potential distribution does not result nor can it be determined in the same simple way as for soil mechanics issues in coarse-grained soils. This must be taken into account accordingly in stability considerations.

6 Case History

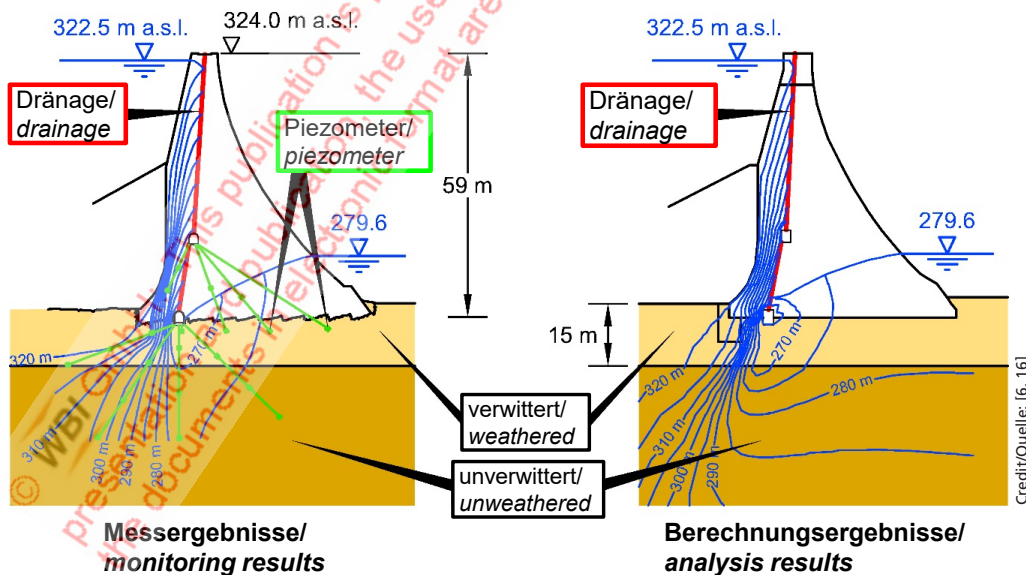
The Urft dam is an approx. 60 m high quarry stone masonry dam, which was designed and built around 120 years ago. It is located in the Eifel region near the city of Aachen (Fig. 25 [16]). According to nowadays criteria [18], the stability of the dam could no longer be verified for all load cases.

The rehabilitation concept required for this reason, provided for the construction of two drainage and inspection galleries as well as the arrangement of vertical

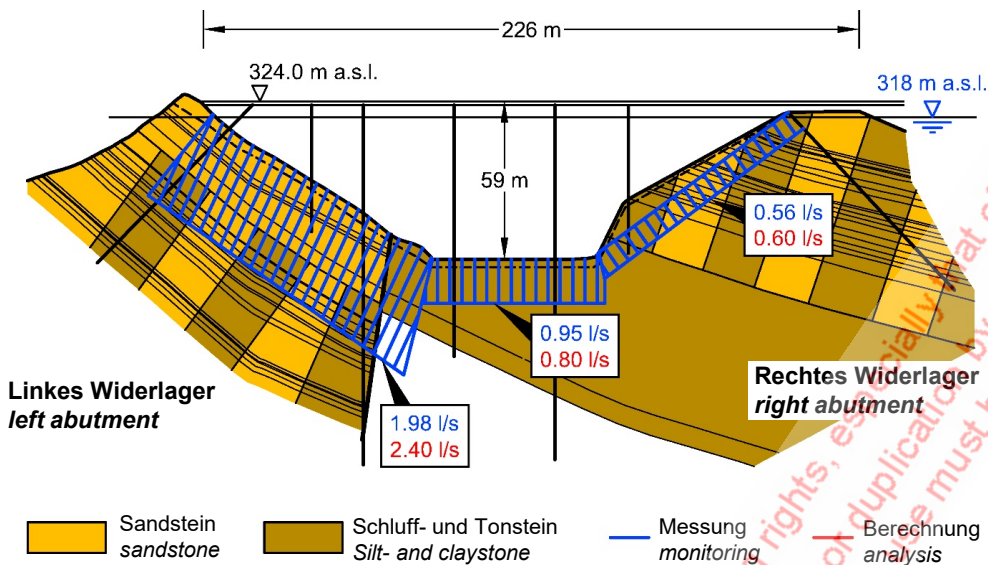
Der Strömungsdruck kann erheblichen Einfluss auf die Standsicherheit beispielsweise von Böschungen und Staumauerwiderlagern sowie auch der Ortsbrust im Tunnelbau haben. Die Sickerströmung muss deshalb in Standsicherheitsnachweisen berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, ist allerdings auch hier zu bedenken, dass die Wasserdurchlässigkeit des Felses anisotrop ist und sich die Potentialverteilung nicht in der gleichen einfachen Weise einstellt und ermitteln lässt, wie bei bodenmechanischen Fragestellungen in grobkörnigen Böden. Das ist bei Standsicherheitsnachweisen entsprechend zu berücksichtigen.

6 Fallbeispiel

Die ca. 60 m hohe Urfttalsperre wurde ungefähr vor 120 Jahren als Schwergewichtsmauer geplant und aus Bruchsteinmauerwerk gebaut. Sie liegt in der Eifel in der Nähe der Stadt



27 Seepage flow through dam and foundation, comparison of analyses and monitoring results
Sickerströmung durch Mauer und Untergrund, Vergleich Rechnung und Messung
Credit/Quelle: [6, 16]



28 Seepage losses, comparison of analyses and monitoring results
Sickerwasserverluste, Vergleich Rechnung und Messung

Credit/Quelle: [6, 16]

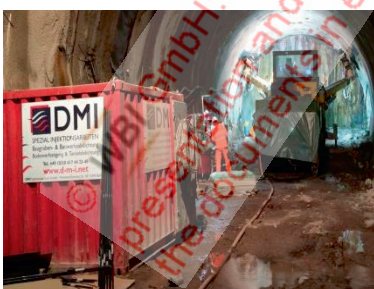
drainage boreholes in the dam [6]. In addition, the arching effect of the double-curved dam was taken into account in the stability analyses, i.e. it was considered that part of the water pressure acting on the dam's upstream surface is transferred to the rock abutments. This assumption entails that the analyses do not anymore result in tensile stresses at the level of the dam foundation on the upstream side [16]. The approval authority agreed to this solution with the condition that the load-bearing behavior assumed and demonstrated in the 3D FE calculations be confirmed by measurements carried out on the structure after its rehabilitation. This also included the investigation of the seepage flow underneath and aside the dam, which is founded on a clay slate.

The rock mechanical model and characteristic parameters derived from the results of the preliminary investigations and the calibration carried out after the rehabilitation works, are compiled in Fig. 20. The

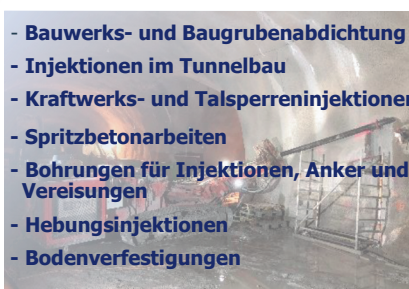
Aachen (Bild 25 [16]). Nach heutigen Kriterien [18] ließ sich die Standsicherheit der Staumauer nicht mehr für alle Lastfälle nachweisen.

Das aus diesem Grunde erforderliche Sanierungskonzept sah den Bau von zwei Drainage- und Inspektionsstollen sowie die Anordnung vertikaler Drainagebohrungen in der Staumauer vor [6]. Außerdem wurde im Standsicherheitsnachweis die Gewölbewirkung der doppelt gekrümmten Mauer in Anspruch genommen und somit berücksichtigt, dass ein Teil des auf die Oberwasserseite der Mauer wirkenden Wasserdrucks in die Felswiderlager eingeleitet wird. Diese Annahme führt dazu, dass in Höhe der Gründung auf der Oberwasserseite keine Zugspannungen mehr auftreten [16]. Die Genehmigungsbehörde stimmte dieser Lösung mit der Auflage zu, dass das in den 3D-FE-Berechnungen nachgewiesene Tragverhalten mittels nach der Sanierung am Bauwerk durchgeführter Messungen bestätigt wird. Dazu gehörte auch die Untersuchung der Um- und Unterläufigkeit der auf Tonschiefer gegründeten Mauer.

Mit innovativen Lösungen für die Zukunft bauen



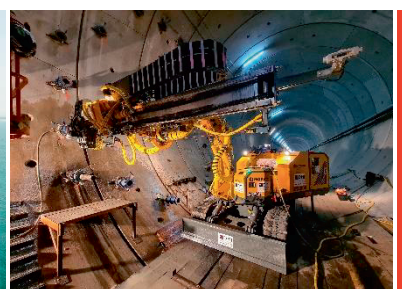
Stuttgart 21 Los 1b



Kramertunnel

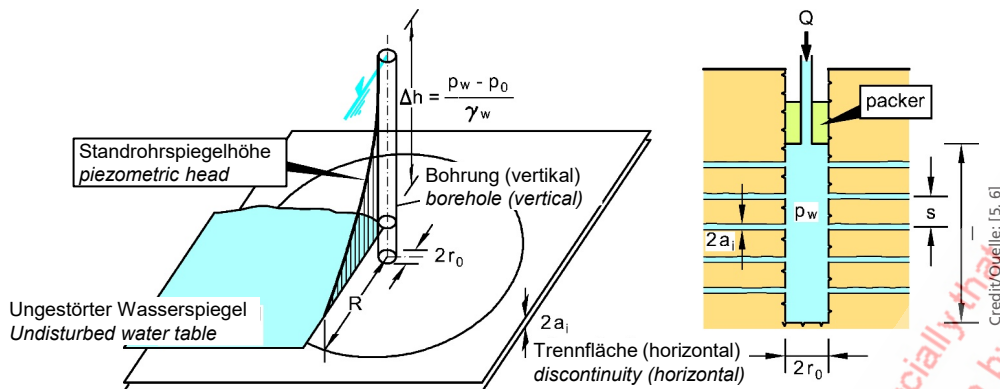


Golf von Mexiko



Rijnlandtunnel Niederlande

- Bauwerks- und Baugrubenabdichtung
- Injektionen im Tunnelbau
- Kraftwerks- und Talsperreninjektionen
- Spritzbetonarbeiten
- Bohrungen für Injektionen, Anker und Vereisungen
- Hebungsinjektionen
- Bodenverfestigungen



$$k_D = \frac{Q}{2\pi \cdot l \cdot \Delta h} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) = \frac{g \cdot (2a_1)^3}{12\nu \cdot s}$$

29 Evaluation of a standard packer test

Auswertung eines Lugeon-Versuchs

discontinuities, which are decisive for the seepage flow, are the vertical joint set $J1$, striking from the upstream to the downstream side, and the schistosity Sch , which is striking perpendicularly to the valley and dipping steeply towards the upstream side. For both discontinuity sets, a distinction must be made between a weathered zone near the ground surface and an underlying unweathered zone. The permeability coefficients are in the order of magnitude of 10^{-6} to 10^{-8} m/s. The schistosity has a higher permeability than the joints, or in some cases the permeabilities are the same, respectively.

In view of the low permeabilities, a grout curtain was not considered to be necessary. Nor were drainage drillings in the bedrock required, since the schistosity dipping towards the upstream side acted as a drainage due to its permeability.

The 3D FE analyses determining the seepage flow underneath and aside the dam (Fig. 26) resulted in the potential distributions shown in Figure 27, which were confirmed by the results of the piezometric measurements in the bedrock and the dam.

Also, the seepage flow rates measured in the lower control gallery are in good agreement with the calculated results (Fig. 28).

7 Determination of the Rock Hydraulic Parameters

The characteristic parameters required for the application of the rock hydraulic model described in the preceding chapters can be determined using the generally accepted and used investigation methods. Therefore, these are only briefly touched upon below.

In a standard packer test (Lugeon test), water is injected under pressure from a defined borehole section, which

Das aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen und der nach der Sanierung durchgeführten Kalibrierung resultierende felsmechanische Modell und die charakteristischen Kennwerte sind in Bild 20 zusammengestellt. Die für die Sickerströmung maßgebenden Trennflächen sind die vertikale, vom Ober- zum Unterwasser streichende Kluftchar $J1$ und die senkrecht zum Tal streichende, steil zum Oberwasser einfallende Schieferung Sch . Für beide Trennflächenscharen ist zwischen einer oberflächennahen, verwitterten Zone und einem darunterliegenden unverwitterten Bereich zu unterscheiden. Die Durchlässigkeitsbeiwerte liegen in der Größenordnung von 10^{-6} – 10^{-8} m/s. Die Schieferung weist dabei eine größere Durchlässigkeit auf als die Klüftung, bzw. zum Teil sind die Durchlässigkeiten auch gleich. In Anbetracht der geringen Durchlässigkeiten wurde ein Injektionsschleier als nicht erforderlich angesehen. Auch ein Dränagefächer im Fels war nicht erforderlich, weil die zum Oberwasser einfallende Schieferung aufgrund ihrer Durchlässigkeit wie eine Drainage wirkte.

Aus der 3D-FE-Berechnung zur Um- und Unterläufigkeit der Mauer (Bild 26) ergaben sich die in Bild 27 dargestellten Potentialverteilungen, die durch die Ergebnisse der im Untergrund und der Mauer durchgeführten piezometrischen Messungen bestätigt wurden.

Auch die im unteren Kontrollgang anfallenden Sickerwassermengen stimmen mit den Rechenergebnissen gut überein (Bild 28).

7 Bestimmung der felshydraulischen Kennwerte

Die für die Anwendung des beschriebenen felshydraulischen Modells erforderlichen Kennwerte lassen sich mit den allgemein üblichen Untersuchungsmethoden bestimmen. Deshalb werden diese nachstehend nur kurz angerissen.

Beim Lugeon-Versuch wird in einem nach oben durch einen Packer abgesperrten Bohrlochabschnitt unter Druck Wasser

is sealed at the top by a packer, into the surrounding rock mass. The permeability coefficient of the rock mass is then determined from the amount of water absorbed and the pressure applied (Fig. 29 [6]). In order to determine the permeability of the discontinuity sets and thus the components of the permeability matrix, it is advisable to arrange the boreholes at least approximately perpendicular to the respective discontinuity sets.

Constant or falling head tests are also suitable for determining the permeability of a rock mass [19, 6].

While in the above tests the area investigated is limited to the immediate vicinity of the borehole in question, pumping tests – when combined with piezometer measurements in the vicinity of the pressurized borehole – can be used to determine the permeabilities of larger areas of a rock mass [20]. For rock masses with low permeability coefficients, pulse tests and also air permeability tests are suitable [6, 21].

A test equipment that can measure permeability coefficients down to 10^{-10} m/s using acrylic gel or even water as test fluid, has been developed and used by WBI GmbH [22].

8 Summary and Conclusions

For a safe and economic design of structures in a jointed rock mass, a realistic consideration of the interaction between rock mass and structure is required. This requirement is neither fulfilled by the subgrade reaction method nor by classification systems (Q, RMR, RMI). Also the procedure on the basis of the GSI and the Hoek-Brown failure criterion, introduced by Hoek-Brown, in many cases is not adequate, since it assumes isotropic rock mass behavior.

The given two-part paper (part 1 in [15]), however, presents a model for anisotropic jointed rock mass that has been used by the authors for many years in the design

in den umgebenden Fels gepresst. Aus der aufgenommenen Wassermenge und dem aufgetragenen Druck wird dann der Durchlässigkeitsbeiwert des Felses ermittelt (Bild 29 [6]). Um die Durchlässigkeit der anstehenden Trennflächenscharen zu ermitteln und damit die Komponenten der Durchlässigkeitsmatrix bestimmen zu können, empfiehlt es sich, die Bohrlöcher zumindest annähernd senkrecht zu den jeweiligen Trennflächenscharen auszurichten.

Schluckversuche in Bohrlöchern mit konstanter oder fallender Druckhöhe eignen sich ebenfalls zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit eines Felses [19, 6].

Während sich bei den vorstehend genannten Versuchen der untersuchte Bereich auf die unmittelbare Umgebung des jeweiligen Bohrlochs beschränkt, lassen sich mit Pumpversuchen, wenn diese durch Piezometermessungen in der Umgebung des beaufschlagten Bohrlochs ergänzt werden, Durchlässigkeiten für größere Felsbereiche ermitteln [20]. Für Fels mit geringen Durchlässigkeitsbeiwerten eignen sich Puls-tests und auch Luftdurchlässigkeitsversuche [6, 21].

Eine Versuchseinrichtung, mit der unter Verwendung von Acrylatgel oder auch Wasser als Versuchsmedium Durchlässigkeitsbeiwerte bis zu 10^{-10} m/s gemessen werden können, wurde von der WBI GmbH entwickelt und eingesetzt [22].

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Eine sichere und wirtschaftliche Planung von Bauwerken in klüftigem Fels setzt eine realitätsnahe Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Baugrund und Bauwerk voraus. Das Bettungsmodulverfahren sowie Klassifizierungsmethoden (Q, RMR, RMI) erfüllen diese Voraussetzung nicht. Auch das von Hoek-Brown eingeführte Verfahren auf der Basis des GSI und des Hoek-Brown Bruchkriteriums erfüllt die Anforderungen in vielen Fällen nicht, da es von isotropem Verhalten des Felses ausgeht.



ITC SA
1971 - 2021
Seit 50 Jahren zu Ihren Diensten

and construction of structures in rock mass with great success. With a realistic description of the mechanical and hydraulic behavior of jointed rock under consideration of anisotropy, it is possible to find safe and economic solutions.

In the two-part article, both the mechanical and the hydraulic model are explained. The determination of the required characteristic parameters is discussed, and some case studies are presented. This way, the fundamentals and selected case studies are explained, on one hand side for the statical consideration, dimensioning and design of structures in rock mass and, on the other hand, for hydrogeological considerations (groundwater models), always bearing in mind that the forces resulting from seepage flow must, of course, also be taken into account in the statical proof.

In dem vorliegenden zweiteiligen Beitrag (Teil 1 in [15]) wird dagegen ein Modell für den anisotropen, geklüfteten Fels vorgestellt, das von den Autoren bereits seit vielen Jahren in der Planung und beim Bau von Felsbauwerken mit großem Erfolg angewendet wird. Mit einer realitätsnahen Beschreibung des mechanischen und hydraulischen Verhaltens von klüftigem Fels unter Berücksichtigung der Anisotropie gelingt es, sichere und wirtschaftliche Lösungen zu finden.

In dem zweiteiligen Beitrag werden sowohl das mechanische als auch das hydraulische Modell erläutert. Es wird auf die Bestimmung der erforderlichen Kennwerte eingegangen, und es werden einige Fallbeispiele dargestellt. In der Gesamtheit werden damit die Grundlagen und Anwendungsbeispiele einerseits für die statische Betrachtung, Bemessung und Planung von Bauwerken im Fels und andererseits für hydrogeologische Betrachtungen (Grundwassermodelle) erläutert, wobei die aus der Sickerströmung resultierenden Kräfte selbstverständlich auch im statischen Nachweis zu berücksichtigen sind.

ANTRIEBSTECHNIK *** INNOVATION *** AQUA-POWER

R. LEIMBACH GmbH

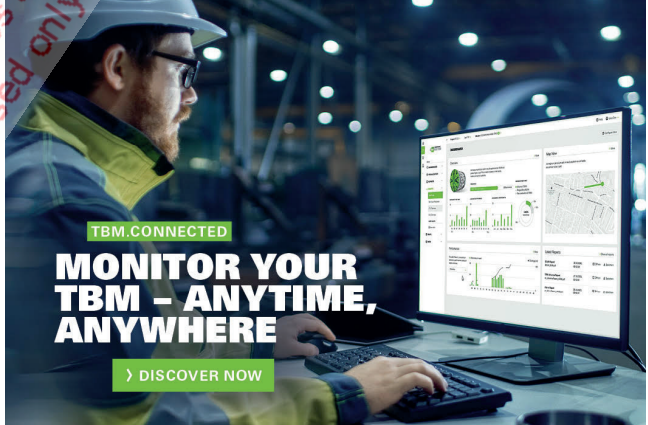
www.leimbach-innovation.de

Since 30 years the R. Leimbach GmbH from Germany is supplying 'electric & hydraulic high pressure pumps' and 'Installation Arms' for bolting **Expandable Rock Bolts** worldwide.

- Extremely fast bolting with up to 21 ltr. water per minute at 300 bar
- Low maintenance cost due to high quality parts and many safety features on board (automatic turn off, lack of water device, overpressure safety, stainless steel frame and plate, etc.)
- Necessary service can usually be done on site by easy to use Spare Part KITS.



bolting.leimbach-innovation.com
info@leimbach-innovation.com



TBM.CONNECTED

MONITOR YOUR TBM - ANYTIME, ANYWHERE

DISCOVER NOW



intermetric
Das richtige Maß

TUNNEL-VERMESSUNG

von Anfang bis Ende

STUVA-Expo 2021
24.-25. November 2021
Messe Karlsruhe / Stand C135

intermetric GmbH | T +49 (711) 780039-2 | www.intermetric.de

The authors would like to explicitly encourage technical discussion and hope that further research work on refining the AJRM method will be done. Already now, a broad application of the presented approach would lead to more cost-effective and safer solutions than are possible with conventional design methods.

Die Autoren möchten ausdrücklich zur fachlichen Diskussion einladen und hoffen, dass auch in der Forschung weiter an der Verfeinerung der AJRM-Methode gearbeitet wird. Schon jetzt würde eine breite Anwendung der vorgestellten Vorgehensweise zu kostengünstigeren und sichereren Lösungen führen, als sie mit den herkömmlichen Methoden der Planung möglich sind.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] Abbas, S.M.; Konietzky, H.: Rock mass classification systems. Chapter 10 of E-Book "Introduction into geomechanics". Download from "<https://tu-freiberg.de/fakultaet3/gt/felsmechanik/forschung-lehre/e-book>" on April 26, 2021, 11.15h.
- [2] Sommer, R.: Kritische Wertung der Methoden der Gebirgsklassifizierung im Tunnelbau. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 16, VGE: Essen, 2009.
- [3] Wittke W., Sommer, R.: Designs in jointed rock. World Tunneling July/August 2011, pp. 30 to 34.
Corresponding discussion:
+ Barton, N.: A measured response. World Tunneling September 2011, pp. 13 to 17.
+ Wittke, W.; Sommer, R.: Answer to the "measured response". World Tunneling, 6.10.2011.
- [4] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B.: Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. In: Hammah, R.; Bawden, W.; Curran, J. and Telesnicki, M., eds., Mining and Tunneling Innovation and Opportunity.
- [5] Wittke, W.: Felsmechanik, Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer-Verlag, Berlin 1984. ISBN-Nr.: 3-540-13016-0 / 0-387-13016-0.
English Version:
Wittke, W.: Rock mechanics – Theory and application with case histories. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1990. ISBN-Nr.: 3-540-52719-2 / 0-387-52719-2
- [6] Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014. ISBN-Nr.: 978-3-433-03079-0.
- [7] Wittke, W.; Pierau, B.; Erichsen, C.: Statik und Konstruktion der Spritzbetonbauweise. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-Print 5, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2002. ISBN-Nr.: 3-7739-1305-2.
English version:
New Austrian Tunneling Method (NATM) – Stability Analyses and Design. Available for download in WBI-Library on www.wbionline.de.
- [8] Wittke, W.; Wittke, M. Druffel, R., Rath, A.; Osthoff, G.: Großquerschnitte im Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd, Statische Berechnungen, Senkungsprognosen und Baubetriebliche Aspekte. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-Print 22, Weinheim, 2019. ISBN-Nr.: 978-3-00-063255-6.
- [9] <https://mobil.hessen.de/a44> mobil.hessen.de: A44 Kassel – Herleshausen (abgerufen am 22.10.2019, 13.22 Uhr).
- [10] Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.: Das Modell AJRM als Grundlage für wirtschaftliches und sicheres Planen und Bauen im klüftigen Fels. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-Print 22, Weinheim, 2019. ISBN-Nr.: 978-3-00-063255-6
- [11] Green Line in Katar: Baugrube Station Education City South East. Projektunterlagen von anderen Projektbeteiligten (Planer), 2014. Unveröffentlicht.
- [12] www.rocsience.com/documents/pdfs/uploads/8079.pdf: RocLab 1.0 Rock Mass strength analysis using the generalized Hoek-Brown failure criterion. (Abgerufen am 27.04.2021, 11.25 Uhr)
- [13] Wittke-Schmitt, B.; Küpper, H.-J.; Wenkenbach, H.: Green Line in Qatar, bergmännische Unterfahrung einer 8spurigen Straße in Doha. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017. ISBN-Nr.: 978-3-00-057227-2
- [14] Wenkenbach, H.; Wittke, M.; Wittke-Schmitt, B.; Küpper, H.-J.: Green Line Katar: Konventionelle Tunnelvortriebe, Planung und Ausführung auf der Grundlage der AJRM-Methode. Veröffentlichung in der Zeitschrift „Tunnel“, Jahrgang 37, 05/2018, S. 16 bis 26, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.
- [15] Wittke, M.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke, W.: Sichere und wirtschaftliche Planung und Ausführung von Tunnelbauwerken im klüftigen Fels nach der AJRM-Methode – Teil 1. In Zeitschrift Tunnel 3/2021. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2021.
- [16] Wittke, W.; Wittke, M.; Kiehl, J. R.: Interaction of a masonry dam and the rock foundation. Geotechnical and Geological Engineering 30, Special Issue on Selected Topics in Rock Mech. and Rock Eng., 581–601, 2012.
- [17] Wittke, W.; Schetelig, K.: Gründung einer Bogengewichtsmauer in Schiefer. In: Proc. Baugrundtagung, Berlin, 1978.
- [18] DIN 19700-11 (German standard): Stauanlagen - Teil 11: Talsperren (Dam plants – Part 11: Dams). Beuth: Berlin, 2004.
- [19] Schreiner, M.; Kreysing, K.: Geotechnik Hydrologie S. 495–508. Springer 1998.
- [20] Wittke-Gattermann, P.; Druffel, R.: Vortrieb eines Autobahntunnels unter einem Flußtal. Taschenbuch für den Tunnelbau 2015, Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2015
- [21] Wittke, B.: Permeabilität von Steinsalz, Theorie und Experiment. WBI-PRINT 3, Verlag Glückauf, Essen, 1999. ISBN: 3-7739-1303-6.
- [22] Wittke, M.; Schmitt, D.; Osthoff, G.: Einpressungen von Acrylatgel und Polyurethan zur Abdichtung des anhydritführenden Gipskeupers im Bereich der Tunnel nach Ober- und Untertürkheim. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI Center am 23.05.2019. WBI-PRINT 22. Weinheim, 2019. ISBN: 978-3-00-063255-6.
- [23] Polczyk, H.: Mehrjährige Beobachtungen des Verhaltens der Urftalsperre. In: 20 Jahre WBI, Vorträge des Seminars aus Anlass des 20-jährigen Bestehens der WBI GmbH. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-PRINT 10, Glückauf: Essen, 2001.