

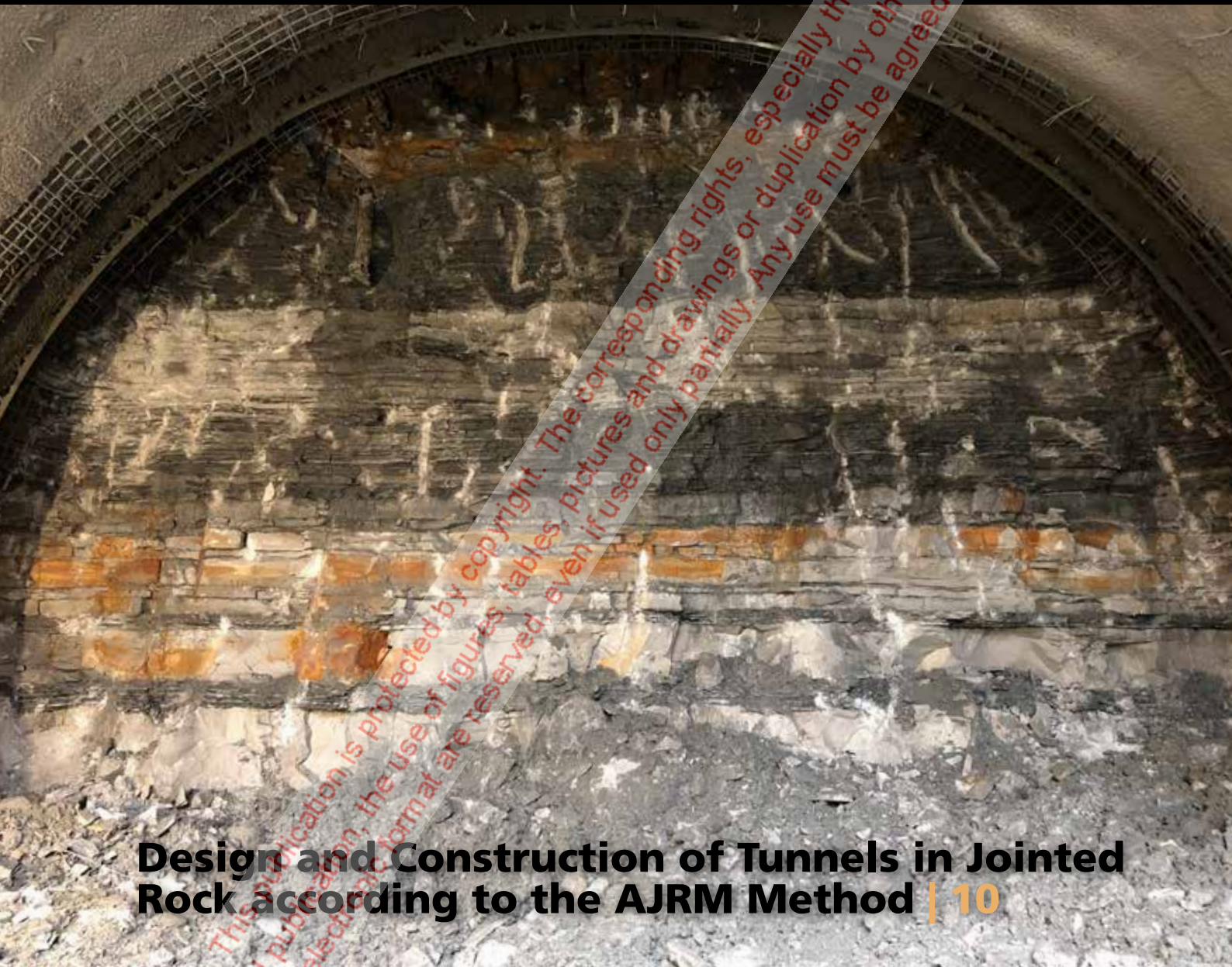


www.tunnel-online.info

tunnel

Offizielles Organ der STUVA · Official Journal of the STUVA

3
2021



Design and Construction of Tunnels in Jointed Rock according to the AJRM Method | 10

USA's Largest Hard Rock TBM

Undergoes Planned In-Tunnel Conversion | 24

Face Support Pressure, Soil Conditioning and Material Transport in Hydro and EBP Shields | 32

The Rohtang Road Tunnel in the Indian Himalayas | 36

© Bauverlag. This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplication by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved, even if used only partially. Any use must be agreed upon with Bauverlag.

Design and Construction of Tunnels in Jointed Rock according to the AJRM Method – Part 1

Planung und Ausführung von Tunnelbauwerken im klüftigen Fels nach der AJRM-Methode – Teil 1

For a safe and economical design of structures in jointed rock, 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 AJRM-Method however, which is explained in the given article by means of examples, allows for a realistic description of the jointed rock mass behavior under consideration of the frequently prevailing anisotropy, and thus enables for a safe and economic design. The AJRM-Method can also be applied to groundwater modelling. This as well as the determination of the required parameters will be outlined in the second part of the given article.

Dr.-Ing. MARTIN WITTKÉ, Dr.-Ing. BETTINA WITTKÉ-SCHMITT, Dr.-Ing. PATRICIA WITTKÉ-GATTERMANN, Prof. Dr.-Ing. WALTER WITTKÉ, Management/Geschäftsführer, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

1 Background

A safe and economical design of underground structures in jointed rock requires a realistic consideration of the interaction between rock mass and structure.

The subgrade reaction method, which is still used for the design of reinforced concrete segments, in which an assumed load acts on an elastically bedded segmental ring, does not fulfill this requirement for the final state, nor can it be used to accurately describe the important stages of construction from the installation of the segments to the final state. Even for tunnels constructed with the shotcrete method, there are still a few cases, in which stability analyses are carried out according to this approach.

The classification methods that are repeatedly praised, do also not meet the requirements, which have to be placed on the design. With these methods – such as e.g. the Q-system – an attempt is made to consider the complex rock mass behavior with the aid of a characteristic number on the basis of a product approach with data on the discontinuity fabric and a so-called stress reduction factor. Using this characteristic number as input parameter, the support measures required for a tunnel can be read-off from diagrams available in literature [1]. It has

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 Bruckkriteriums erfüllt die Anforderungen in vielen Fällen nicht, da es von isotropem Verhalten des Felses ausgeht. Dagegen erlaubt die im Beitrag anhand von Beispielen erläuterte AJRM-Methode eine realitätsnahe Beschreibung des Verhaltens von klüftigem Fels unter Berücksichtigung seiner häufig vorliegenden Anisotropie und somit einen sicheren und wirtschaftlichen Entwurf. Die AJRM-Methode kann auch zur Beschreibung von Grundwasserströmungen verwendet werden. Hierauf und auf die Ermittlung der erforderlichen Kennwerte wird im zweiten Teil des Beitrags eingegangen.

1 Veranlassung

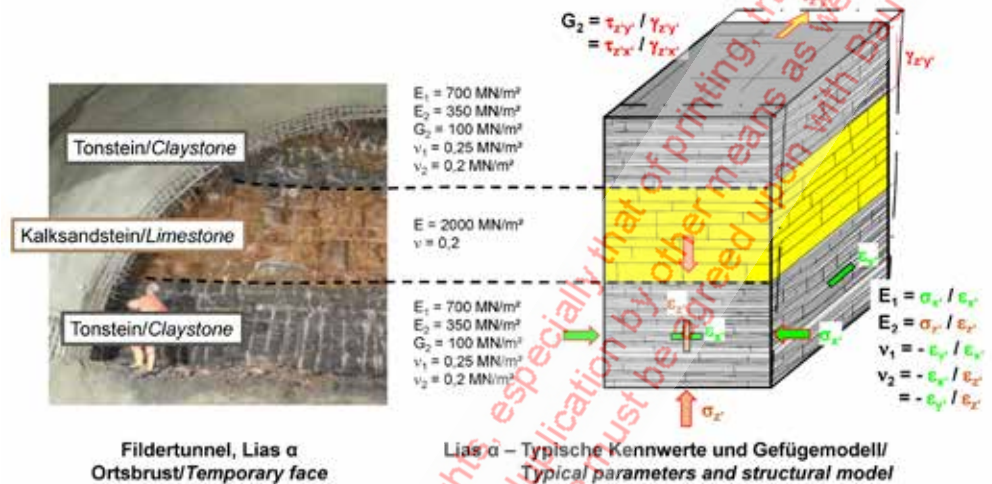
Ein sicherer und wirtschaftlicher Entwurf von Hohlraumbauten in klüftigem Fels setzt eine realitätsnahe Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Baugrund und Bauwerk voraus.

Das zur Bemessung von Stahlbetontübbingungen immer noch angewendete Bettungsmodulverfahren, bei dem eine angenommene Last auf einen elastisch gebetteten Tübbingring wirkt, erfüllt diese Voraussetzung weder für den fertigen Zustand, noch können damit die wichtigen Bauzustände vom Einbau der Tübbinge bis zum Endzustand zutreffend beschrieben werden. Selbst bei nach der Spritzbetonbauweise aufgefahrener Tunneln findet man vereinzelt noch Standsicherheitsnachweise, die diesem Ansatz folgen.

Auch die immer wieder angepriesenen Klassifizierungsmethoden erfüllen die an die Planung zu stellenden Anforderungen nicht. Mit ihnen wird – wie beispielsweise beim Q-System – versucht, das komplexe Gebirgsverhalten anhand eines Produktansatzes mit Daten zum Trennflächengefüge und einem sogenannten stress reduction factor mit Hilfe einer Kennziffer zu erfassen. Mit dieser Kennziffer kann man dann die für einen Tunnel erforderlichen Sicherungsmaßnahmen aus verfügbaren Diagrammen ablesen [1]. Dass diese Methode zu nicht stand-sicheren oder aber zu unwirtschaftlichen Lösungen führen

1 Lias α – Photo of temporary face, structural model and elastic constants as part of the rock mechanical model

Lias α – Foto Ortsbrust, Gefügemodell und elastische Konstanten als Teil eines felsmechanischen Modells



already been demonstrated in [2, 3] that these classification methods may lead to unstable or to uneconomical solutions and thus are not very reliable. This will be briefly discussed in the following article.

The approach of Hoek-Brown [1, 4] is certainly suitable for stability analyses - at least at first sight. Hoek-Brown provide a figure that can be used to determine the so-called geological strength index (GSI) based on a qualitative-quantitative description of the discontinuity fabric of the rock mass. Knowing the unconfined strength of the intact rock, the GSI value can then be used to derive a nonlinear relationship between the largest and smallest principal normal stresses for the failure state and thus the failure criterion for the rock mass in question. As an approximation, according to Hoek-Brown, one can also apply Mohr Coulomb's failure criterion and calculate an equivalent friction angle and a cohesion for the jointed rock mass. Furthermore, a relationship is given for determining the deformation modulus of the rock mass using the GSI.

Unfortunately, this approach assumes isotropic elastic behavior and isotropic strength and neglects the anisotropy of jointed rock mass, which in most cases cannot be disregarded neither in the elastic domain nor in terms of strength. It is added that in many cases the users of this method derive too low shear parameters for the rock mass, thus treating the rock mass like a soil in the design. This can lead to very expensive solutions, as shown in this article with the help of an example.

In view of these aspects, the authors have been successfully using the Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM) and the corresponding methods for stability analyses and displacement predictions for many years. The experience on many executed tunnel and other structures in rock mass and the observations and measurements carried out in the process, have shown how successful this design concept is.

kann und somit wenig zuverlässig ist, wurde bereits in [2, 3] gezeigt und wird im folgenden Artikel kurz aufgegriffen.

Für Standsicherheitsnachweise zumindest auf den ersten Blick geeignet ist sicherlich die Vorgehensweise von Hoek-Brown [1, 4]. Hoek-Brown stellen eine Abbildung zur Verfügung, mit deren Hilfe man anhand einer qualitativ-quantitativen Beschreibung des Trennflächengefüges eines Felses den sogenannten geological strength index (GSI) bestimmen kann. Mit diesem Wert kann man bei Kenntnis der einaxialen Festigkeit des jeweiligen Gesteins dann eine nichtlineare Beziehung zwischen der größten und kleinsten Hauptnormalspannung für den Bruchzustand und damit das Bruchkriterium für den jeweiligen Fels herleiten. Näherungsweise kann man nach Hoek-Brown auch das Mohr Coulomb'sche Bruchkriterium anwenden und einen äquivalenten Reibungswinkel sowie eine Kohäsion für den klüftigen Fels errechnen. Weiterhin wird eine Beziehung für die Ermittlung des E-Moduls des Felses mit Hilfe des GSI angegeben.

Leider geht dieser Ansatz von isotropem elastischen Verhalten und von isotroper Festigkeit aus und vernachlässigt die Anisotropie von klüftigem Fels, die man in den meisten Fällen weder im elastischen Bereich noch hinsichtlich der Festigkeit außer Acht lassen darf. Es kommt noch hinzu, dass die Anwender dieser Methode in vielen Fällen zu geringe Scherparameter für das anstehende Gebirge ableiten und damit den anstehenden Fels in der Planung wie einen Boden behandeln. Auf diese Weise kann es zu sehr teuren Lösungen kommen, wie im vorliegenden Artikel anhand eines Beispiels gezeigt wird.

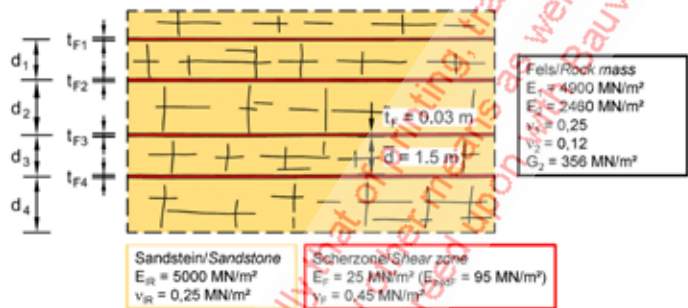
Die Autoren folgen bei Ihren Planungen deshalb schon seit vielen Jahren mit Erfolg dem Anisotropic Jointed Rock Modell (AJRM) und dem darauf aufbauenden Verfahren für Standsicherheitsnachweise und zur Prognose der Verschiebungen. Die Erfahrungen an vielen ausgeführten Tunnel- und Felsbauwerken und die dabei durchgeführten Beobachtungen und Messungen haben gezeigt, wie erfolgreich dieses Entwurfskonzept ist.

2 Rock mass with 1 set of persistent, filled discontinuities – photo and determination of elastic constants [6]

Fels mit 1 Schar durchgehender, gefüllter Trennflächen – Foto und Bestimmung der elastischen Konstanten [6]



Wechsellagerung mit gefüllten Scherzonen/
Alternating sequence with filled shear zones



Felsmechanisches Modell für Fels mit einer durchgehenden, gefüllten Trennflächenschar/
Rock mechanical model for rock mass with one set of persistent, filled discontinuities

Credit/Quelle: [6]

The following article is intended to demonstrate this by means of selected examples. It is primarily addressed to the owners, because on the one hand they have to bear the costs of uneconomical solutions and on the other hand they have a great influence on the type and extent of preliminary studies and on the design.

The article is written in two parts. The present part deals with the rock mechanical models and related case studies. In the second part of the article, the rock hydraulic model, related case studies, and the determination of rock mechanical and rock hydraulic parameters are discussed. This way, the fundamentals and selected case studies are explained, on one hand side for the static 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. The authors would like to explicitly encourage technical discussion and hope that further research work on refining the AJRM method will be done.

2 Rock Mechanical Model

In a large number of cases, rock masses are characterized by various components, such as intact rock, discontinuities (fractures/bedding planes/schistosity), fault zones, folds. This is especially true for sedimentary and metamorphic rocks. These rock mass types are usually anisotropic with respect to strength and often also with respect to deformability. This must be taken into account in rock statical calculations. No engineer would neglect the anisotropy of the building material when designing laminated timber beams. So, why should we neglect anisotropy of rock masses?

The basis for a realistic determination of the strength and deformation behavior of rock masses is elaborating an appropriate rock mechanical model based on structural models and characteristic parameters [5, 6]. For stresses below strength, linear-elastic behavior can be approximately assumed for most rock types. However,

Der vorliegende Artikel soll dies an einigen ausgewählten Beispielen zeigen. Er wendet sich vor allem an die Bauherrenschaft, weil diese einerseits die Kosten für unwirtschaftliche Lösungen tragen muss und andererseits einen großen Einfluss auf Art und Umfang von Voruntersuchungen und auf den Entwurf hat.

Der Artikel ist in zwei Teilen abgefasst. In dem vorliegenden Teil werden die Themen felsmechanisches Modell und zugehörige Fallbeispiele behandelt. In dem zweiten Teil des Artikels wird auf das felshydraulische Modell, zugehörige Fallbeispiele sowie die Ermittlung der felsmechanischen und felshydraulischen Kennwerte eingegangen. 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.

Die Autoren möchten ausdrücklich zur fachlichen Diskussion anregen und hoffen, dass auch in der Forschung weiter an der Verfeinerung der AJRM-Methode gearbeitet wird.

2 Felsmechanisches Modell

Fels ist in einer Vielzahl von Fällen gekennzeichnet durch verschiedene Komponenten, wie Gestein, Trennflächen (Klüfte/Schichtfugen/Schieferung), Störungen, Falten. Dies gilt im besonderen Maße für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine. Diese Felsarten sind in der Regel anisotrop im Hinblick auf die Festigkeit und häufig auch im Hinblick auf die Verformbarkeit. Dies muss bei felsstatischen Berechnungen berücksichtigt werden. Bei der Bemessung von Holzleimbändern würde schließlich auch kein Ingenieur die Anisotropie des Baustoffs vernachlässigen.

Grundlage für eine wirklichkeitsnahe Erfassung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Fels ist die Erarbeitung eines zutreffenden felsmechanischen Modells beruhend auf Gefügemodellen und Kennwerten [5, 6]. Für Beanspruchungen unterhalb der Festigkeit kann man bei den meisten Felsarten näherungsweise von linear-elastischem Verhalten ausgehen. Sedimentgesteine, Tonschiefer und auch Gneise verhalten sich aber im elastischen Bereich nicht immer isotrop. Vielmehr ist die Zusammendrückbarkeit senkrecht zur Schichtung

sedimentary rocks, clay slates and also gneisses often do not behave isotropically in the elastic range. Rather, the compressibility perpendicular to bedding or schistosity is often greater than parallel to it. This property cannot be neglected in many cases and can be described in a good approximation by assuming transverse isotropy.

As an example, **Figure 1** shows an alternating sequence of sandstones and mudstones from the Lias α of the Lower Jurassic. The sandstone is characterized by a random grain structure of the intact rock as well as bedding-parallel, horizontal joints and steeply dipping joint sets. Below strength it exhibits an isotropic deformation behavior, which can be described by the deformation modulus E and the Poisson's ratio. In contrast, the mudstones have a planar grain structure as well as bedding-parallel, horizontal joints and less pronounced vertical fractures. This leads to an anisotropy of the deformation behavior: the mudstones are more deformable in the vertical direction than in the horizontal, bedding-parallel direction. The by approximation transverse isotropy of the deformation behavior can be described by 5 elastic constants (**Fig. 1**): the deformation moduli parallel and perpendicular to the bedding E_1 and E_2 , two Poisson's ratios ν_1 and ν_2 , and the shear modulus G_2 [5, 6].

Another example of the description of the elastic behavior of jointed rock mass is given in **Figure 2**, which shows an alternating sequence of sandstones and siltstones of

oder Schieferung häufig größer als parallel dazu. Diese Eigenschaft darf in vielen Fällen nicht vernachlässigt werden und kann durch die Annahme transversaler Isotropie in guter Näherung beschrieben werden.

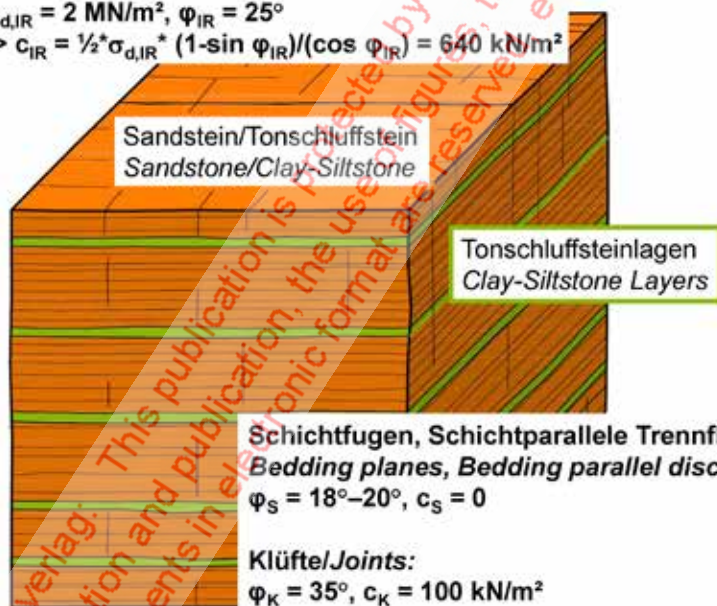
Beispielhaft zeigt **Bild 1** eine Wechsellagerung von Kalksandsteinen und Tonsteinen aus dem Lias α des Unteren Jura. Der Sandstein ist durch ein regelloses Korngefüge des Gesteins sowie schichtparallele, horizontale Bankungsfugen und steil stehende Klüftscharen gekennzeichnet. Er weist bis zum Erreichen der Festigkeit ein näherungsweise isotropes Verformungsverhalten auf, welches durch den E-Modul und die Querkontraktionszahl beschrieben werden kann. Dahingegen besitzen die Tonsteine eine planare Kornstruktur sowie schichtparallele, horizontale Bankungsfugen und weniger ausgeprägte vertikale Klüfte. Dies führt zu einer Anisotropie des Verformungsverhaltens: die Tonsteine sind in vertikaler Richtung stärker verformbar als in horizontaler, schichtparalleler Richtung. Die näherungsweise transversale Isotropie des Verformungsverhaltens lässt sich durch 5 elastische Konstanten beschreiben (**Bild 1**): die E-Moduln parallel und senkrecht zur Schichtung E_1 und E_2 , zwei Poisson'sche Zahlen ν_1 und ν_2 und den Schubmodul G_2 [5, 6].

Ein weiteres Beispiel für die Beschreibung des elastischen Verhaltens von klüftigem Fels zeigt **Bild 2**. Es handelt sich um eine Wechsellagerung von Sand- und Schluffsteinen der Waichecheng Serie. Hier liegen zwischen den Sand- und Schluffsteinen schichtparallele Scherzonen vor. Die Scherzonen weisen eine deutlich höhere Verformbarkeit und geringere Festigkeit

Gestein/Intact rock:

$\sigma_{d,IR} = 2 \text{ MN/m}^2, \varphi_{IR} = 25^\circ$

$\rightarrow c_{IR} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{d,IR} \cdot (1 - \sin \varphi_{IR}) / (\cos \varphi_{IR}) = 640 \text{ kN/m}^2$

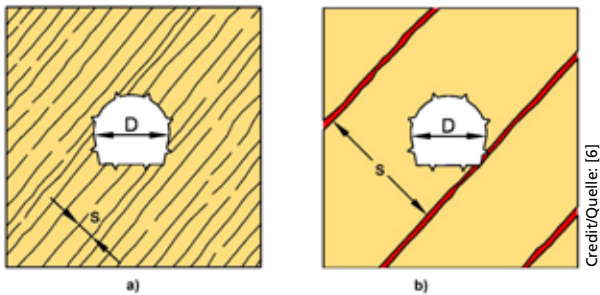


Felsmechanisches Modell Buntsandstein Tunnel Küchen
Rockmechanical model Bunter, tunnel Küchen



Ortsbrust Buntsandstein, Tunnel Höllberg
Temporary face Bunter tunnel Höllberg

3 Bunter – photo of temporary face, structural model and strength characteristics as part of the rock mechanical model
 Buntsandstein – Foto Ortsbrust, Gefügemodell und Festigkeitseigenschaften als Teil des felsmechanischen Modells



4 Spacing of discontinuities in comparison with dimensions of engineering structure
a) consideration in homogeneous model vs. b) discrete modelling [6]

Trennflächenabstand im Vergleich zu Bauwerksabmessungen
a) Berücksichtigung im homogenen Modell vs. b) diskrete Modellierung [6]

the Waichecheng series. Between the sand- and siltstone layers, bedding-parallel shear zones are present. The shear zones exhibit much higher deformability and lower strength than the surrounding rock packages (sandstone/siltstone). This leads to a transversely isotropic deformation behavior of the rock mass. The elastic constants required to describe this behavior can be calculated comparatively easily from the elastic constants of the individual components (rockmass/shear zone fill). This is schematically shown in **Figure 2** on the right. The details together with the formulas are explained in [6].

Only in exceptional cases, the strength of the unfractured intact rock is of importance for the mechanical behavior of the rock mass. As a rule, however, results of uniaxial compression tests are available and can be used for the description of the intact rock strength. Assuming an angle of friction for the intact rock ϕ_{IR} , the cohesion c_{IR} can be determined with the Mohr-Coulomb law, as shown in **Figure 3** for the example of a Bunter formation.

However, the decisive factors for stability are the shear strengths along the discontinuities, which for practical purpose can also be described by a friction angle and a cohesion in the rock mechanical model, even if nonlinear approaches are available to describe the strength and shear stress-shear displacement behavior. As the example of the Bunter formation in **Figure 3** shows, the shear strength along discontinuities is considerably reduced compared to the intact rock strength. This is especially true for the bedding-parallel joints. This leads to an anisotropy in the strength of the rock mass.

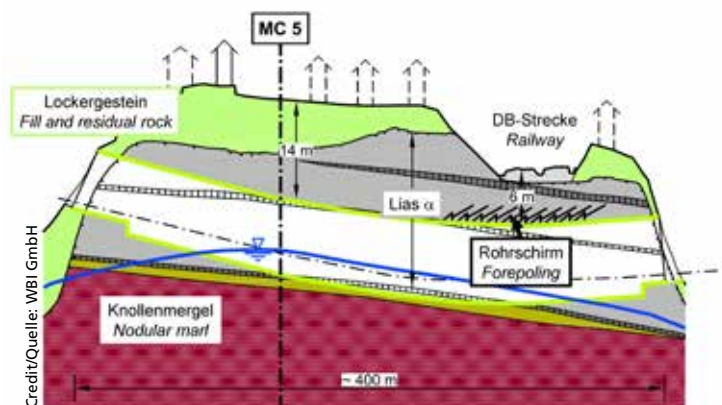
A tensile strength is usually not considered in jointed rock. Further examples of appropriate rock mechanical models of jointed rock masses can be found in [6]. These can be used as a basis for initial investigations if results of project-specific explorations are not yet available. When modeling rock mass in the so-called homogeneous model, it is assumed that the discontinuity planes

auf als die umgebenden Felspakete (Sand-/Schluffstein). Dies führt zu einem transversal-isotropen Verformungsverhaltens des Felses. Die zur Beschreibung dieses Verhaltens erforderlichen elastischen Konstanten lassen sich vergleichsweise einfach aus den elastischen Konstanten der einzelnen Komponenten (Fels/Trennflächenfüllung) rechnerisch ermitteln. Schematisch ist dies in **Bild 2** auf der rechten Seite dargestellt. Die Einzelheiten nebst Formeln sind in [6] erläutert.

Die Festigkeit des unzerklüfteten Gesteins ist nur in Ausnahmefällen von Bedeutung für das mechanische Verhalten. In der Regel stehen aber für die Beschreibung der Festigkeit des Gesteins Ergebnisse einaxialer Druckversuche zur Verfügung. Bei Annahme eines Reibungswinkels für das Gestein ϕ_{IR} , kann man nach dem Mohr-Coulomb'schen Gesetz die Kohäsion c_{IR} ermitteln, wie in **Bild 3** für das Beispiel eines Buntsandsteins dargestellt. Maßgeblich für die Standsicherheit sind aber die Scherfestigkeiten auf den Trennflächen, die in der Praxis im felsmechanischen Modell ebenfalls durch einen Reibungswinkel und eine Kohäsion beschrieben werden können, auch wenn nicht-lineare Ansätze für die Beschreibung des Festigkeits- und Schubspannungs-Scherverschiebungsverhaltens zur Verfügung stehen. Wie das Beispiel des Buntsandsteins in **Bild 3** zeigt, weisen die Trennflächen eine gegenüber der Gesteinsfestigkeit erheblich reduzierte Scherfestigkeit auf. Dies gilt im besonderen Maße für die schichtparallelen Bankungsfugen. Dies führt zu einer Anisotropie in der Festigkeit des Felses.

Eine Zugfestigkeit wird in geklüftetem Fels in der Regel nicht in Ansatz gebracht. Weitere Beispiele für entsprechende felsmechanische Modelle von klüftigem Fels finden sich in [6]. Diese können als Grundlage für erste Untersuchungen herangezogen werden, wenn noch keine Ergebnisse von projektspezifischen Erkundungen vorliegen.

Bei der Modellierung von Fels im sogenannten homogenen Modell wird davon ausgegangen, dass die zu berücksichtigenden Trennflächen an jedem Punkt des Modells auftreten („verschmierte Modellierung“). Dies erlaubt die Berücksichtigung



5 Local by-pass Vaihingen (Stuttgart), Tunnel Österfeld, geological longitudinal section [7]

Ortsumfahrung Vaihingen (Stuttgart), Österfeldtunnel, Geologischer Längsschnitt [7]

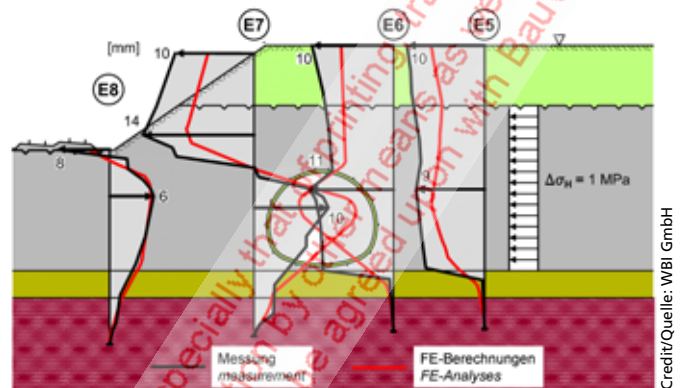
to be considered occur at every point of the model („smeared modeling“). This allows the consideration of various sets of discontinuities, and thus of the anisotropy in strength and deformability, with comparatively little effort. This approach leads to reliable results, if the dimensions of the engineering structure considered are large compared to the discontinuity spacing ($s < \sim 1/8$ to $1/10 \cdot D$, see Fig. 4, left [6]). This condition is usually met for joints, bedding planes, schistosity in sedimentary and metamorphic rocks, and engineering structures of common dimensions. Discrete modeling becomes necessary when the discontinuity spacing is large compared to the dimensions of the engineering structure (see Fig. 4, right). This may be the case for fault zones, for example. If required, it is therefore possible to combine the homogeneous model with discrete modeling of individual structures, such as fault zones [6].

The need for discrete consideration of individual layers or discontinuities must be investigated for each project, both in terms of elastic behavior and strength properties.

3 Case Histories

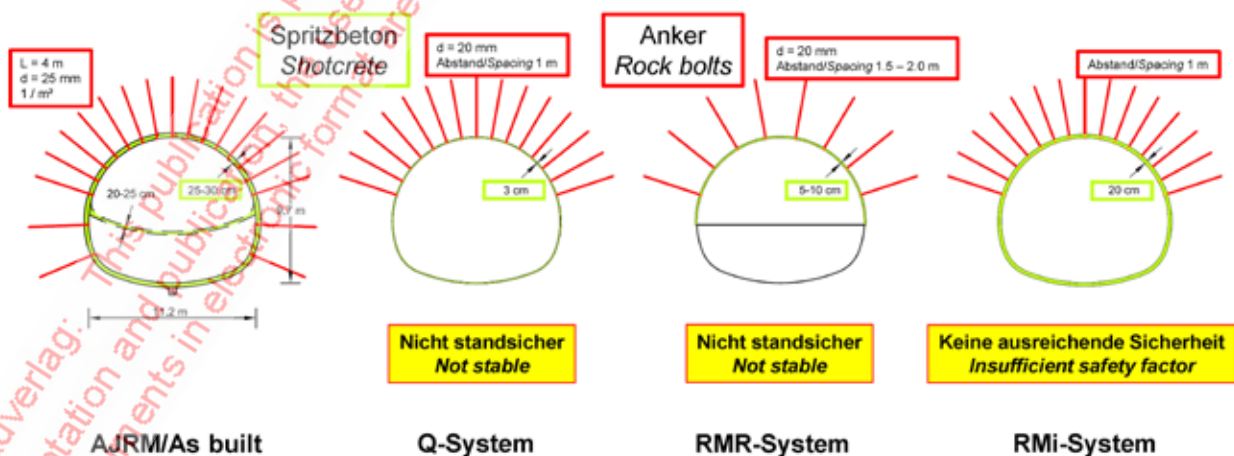
3.1 Mudstones of the Lower Jurassic (Lias α), Tunnel Österfeld

A large number of tunnels have been and are still being built in the mudstones of the Lower Jurassic in Germany. For each of the projects, in which the authors have been involved during the last more than 40 years, the results of the explorations carried out were evaluated, and the measurement results obtained during construction were compared with the predictions. Thus, an extensive database is available, which makes it possible to describe the behavior of the rock mass with a very high degree of prediction reliability. This also becomes evident during the

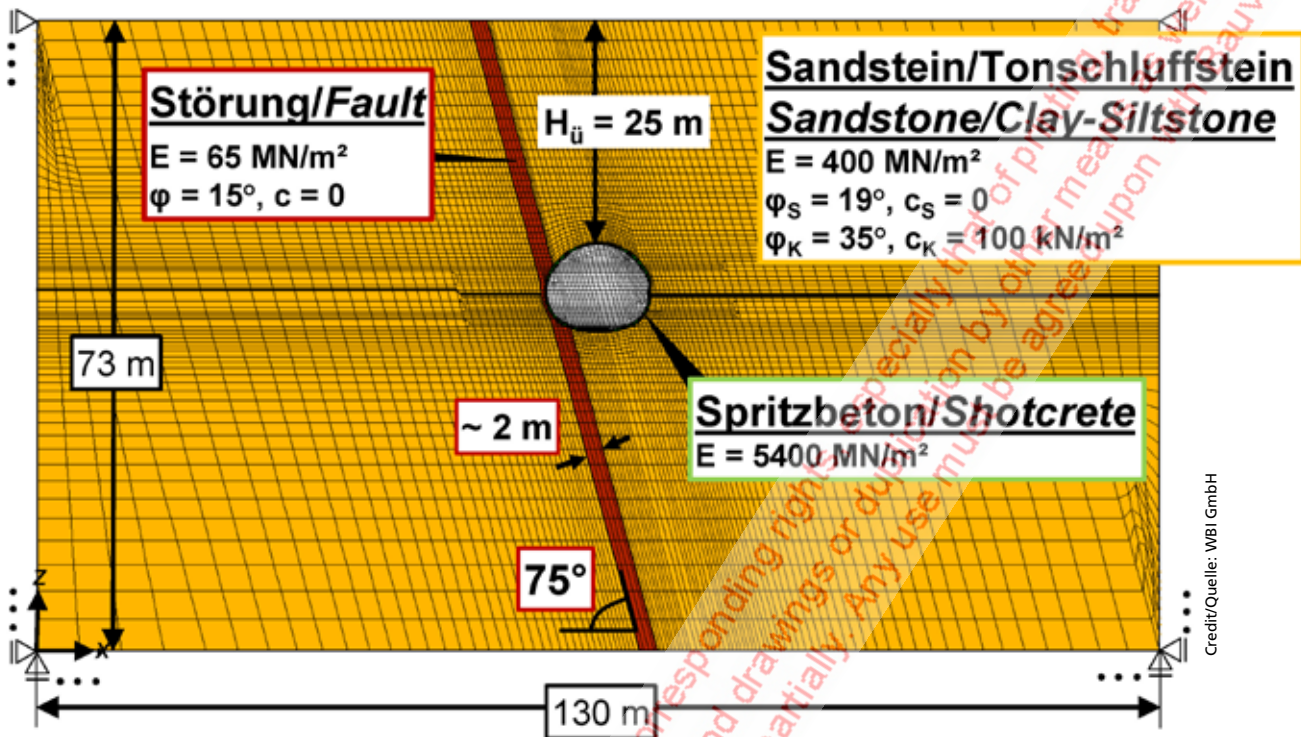


7 Tunnel Österfeld, horizontal displacement, comparison of analysis and monitoring results [7]
 Österfeldtunnel, Horizontalverschiebungen, Vergleich Rechnung – Messung [7]

verschiedener Trennflächenscharen und damit der Festigkeits- und Verformbarkeits-Anisotropie mit vergleichsweise geringem Aufwand. Diese Vorgehensweise führt dann zu verlässlichen Ergebnissen, wenn die Abmessungen des jeweils betrachteten Bauwerks groß sind im Vergleich zum Trennflächenabstand ($s < \sim 1/8$ bis $1/10 \cdot D$, siehe Bild 4, links [6]). Diese Voraussetzung ist für Klüfte, Schichtfugen, Schieferungsfugen in Sediment- und metamorphen Gesteinen und Felsbauwerke üblicher Abmessungen in der Regel erfüllt. Eine diskrete Modellierung wird dann erforderlich, wenn die Trennflächenabstände groß sind im Vergleich zu den Bauwerksabmessungen (vgl. Bild 4, rechts). Dies kann z.B. für Störungen zutreffen. Bei Erfordernis ist es daher möglich, das homogene Modell mit einer diskreten Modellierung einzelner Strukturen, wie z. B. Störungen, zu kombinieren [6]. Die Notwendigkeit der diskreten Berücksichtigung einzelner Schichten bzw. Diskontinuitäten ist sowohl hinsichtlich des elastischen Verhaltens als auch hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften für jedes Projekt zu untersuchen.



6 Tunnel Österfeld, excavation and support based on AJRM in comparison with support recommendations according to classification systems Q, RMR and RMi [2, 3]
 Österfeldtunnel, Ausbruch und Sicherung auf Basis AJRM im Vergleich mit Sicherungsempfehlungen nach Klassifizierungssystemen Q, RMR und RMi [2, 3]



Credit/Quelle: WBI GmbH

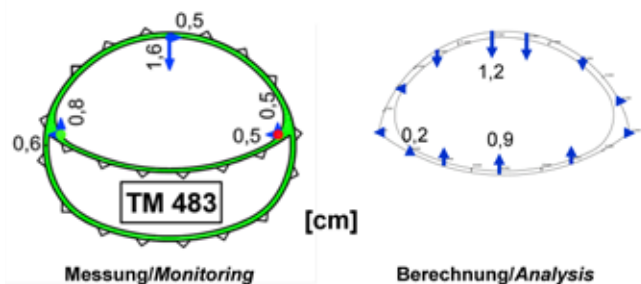
8 Motorway A44, Tunnel Küchen, fault zone crossing tunnel at acute angle, FE mesh for stability analyses [10]
BAB A44, Tunnel Küchen, Störung im schiefen Schnitt, FE-Netz für Standsicherheitsnachweis [10]

current construction of the tunnels for the connection of Stuttgart Airport to the new railway line from Stuttgart to Ulm and of the underground airport station. This will separately be reported in detail. For the purpose of this paper, reference is made to a road tunnel that was successfully designed and constructed using the AJRM method about 25 years ago and is still in operation today. A number of years after completion, a design concept based on classification methods was elaborated for this tunnel for the purpose of comparison with other methods [2]. The approximately 400 m long Österfeld road tunnel was excavated as part of the bypass of Vaihingen in Stuttgart (Fig. 5). It is almost entirely located in the Lias α mudstones, whose rock mechanical model is shown in Figure 1. As mentioned above, the mudstones show a pronounced anisotropy of deformability ($E_1 \sim 2 \cdot E_2$, Fig. 1). When the design was elaborated, it was known from other projects in the vicinity that increased horizontal stresses were to be expected in the Lias α mudstones in the project area, resulting from pre-loading in geological times. In-situ stress measurements had indicated additional horizontal stresses in the order of $\Delta\sigma_H = 0.2\text{--}1.9$ MPa. The stability calculations were carried out on the basis of a rock mechanical model taking into account the anisotropy of deformability as well as the increased horizontal stresses using the FE method (AJRM, cf. rock mechanical model in Fig. 1). Based on this, excavation and support as

3 Fallbeispiele

3.1 Tonsteine des Unteren Jura (Lias α), Tunnel Österfeld

In den Tonsteinen des unteren Jura wurden und werden in Deutschland eine Vielzahl von Tunneln gebaut. Für jedes der seit mehr als 40 Jahren von den Autoren betreuten Projekte wurden die Ergebnisse der durchgeführten Erkundungen ausgewertet, und die beim Bau erhaltenen Messergebnisse wurden mit den Prognosen verglichen. Somit steht eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, die es ermöglicht, das Verhalten des Felses mit sehr hoher Prognosesicherheit zu beschreiben. Das zeigt sich auch bei den aktuell aufgefahrene Tunneln für den Anschluss des Stuttgarter Flughafens an die Neubaustrecke



Credit/Quelle: WBI GmbH

9 Tunnel Küchen, vault heading with temporary invert, fault zone located beyond zone of influence, comparison of analysis and monitoring results
Tunnel Küchen, Kalottenvortrieb mit geschlossener Sohle, Störung außerhalb Einflussbereich, Vergleich Rechnung - Messung

well as the lining of the tunnel were planned. The tunnel was excavated in a mouth profile with a clear width of 11.2 m and a clear height of 9.7 m (Fig. 6, left). For construction reasons, excavation was planned with an advancing vault, which was designed with a closed invert to minimize subsidence. Alternatively, a full face excavation with staggered face would have been possible [8]. The excavation cross-section was secured with a 25–30 cm thick shotcrete membrane and radial anchoring (Fig. 6, left). The tunnel excavation was accompanied by a comprehensive measurement program. The measurement results were compared with the computed predictions. Figure 7 shows the comparison of measured and calculated results for the assumption $\Delta\sigma_H = 1$ MPa. A very good agreement is noted. This example shows that with a realistic simulation of the strength and deformation behavior of the rock mass according to the AJRM, an economical and safe design was possible already many years ago.

In [2, 3], the Österfeld Tunnel was used as a case study for a comparison with some of the classification systems. The support recommendations determined according to the Q-system, RMR-system and RMI-system assuming the mentioned additional horizontal stress $\Delta\sigma_H = 1$ MPa are also shown in Figure 6. For each system, a different support recommendation results. Comparative calculations using the FEM also show that the tunnel would not have been sufficiently stable with the support recommendations determined according to the above mentioned classification systems [2, 3]. Other case studies show that the application of the mentioned classification systems would have resulted in significantly uneconomical designs compared to the AJRM method (cf. [2, 3]).

3.2 Bunter Formation, Tunnel Küchen

The tunnel Küchen was built in the course of the Federal motorway A 44 from Kassel to Eisenach [9]. It is located in the Volpriehausen alternating sequence of the Middle Bunter formation, which is intensely bedded and vertically fractured in the area of the tunnel. Fault zones are frequently encountered in the Bunter formation, the location of which cannot always be precisely determined in preliminary investigations. Also in the case of the tunnel Küchen, which was designed with an advanced vault heading with open invert, a fault zone was encountered, which was crossing the tunnel at an acute angle and steeply dipping towards the tunnel [10].

10 Above: Tunnel Küchen, photo of temporary face with temporary vault invert; below: Tunnel Trimberg, photo of temporary face in the Bunter [10]

Oben: Tunnel Küchen, Foto Ortsbrust mit temporärer Kalottensohle; unten: Tunnel Trimberg, Foto Ortsbrust im Buntsandstein [10]

von Stuttgart nach Ulm und dem Bau der unterirdischen Station über die an anderer Stelle detailliert berichtet wird. Für den vorliegenden Beitrag wird auf einen Straßentunnel zurückgegriffen, der vor etwa 25 Jahren nach der AJRM-Methode erfolgreich geplant und ausgeführt wurde und noch heute in Betrieb ist. Zu einem späteren Zeitpunkt wurde zum Zweck des Vergleichs für diesen Tunnel ein Planungskonzept auf der Grundlage von Klassifizierungsmethoden erstellt [2].

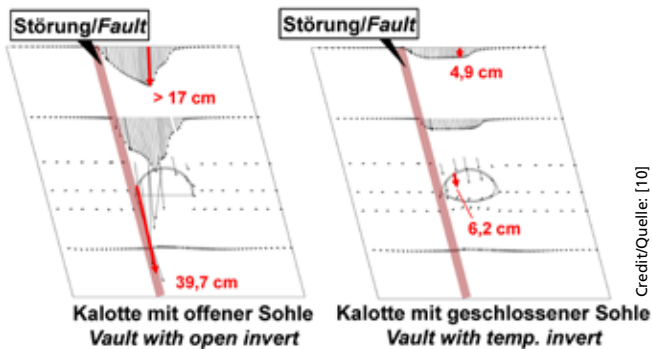
Der etwa 400 m lange Straßentunnel Österfeld wurde als Teil der Ostumfahrung Vaihingen in Stuttgart aufgeföhren (Bild 5). Er kommt nahezu vollständig in den Tonsteinen des Lias α zu liegen, deren felsmechanisches Modell in Bild 1 dargestellt ist. Wie bereits erwähnt, weisen die Tonsteine eine ausgeprägte Anisotropie der Verformbarkeit ($E_1 \sim 2 \cdot E_2$, Bild 1) auf. Aus anderen Projekten in der näheren Umgebung war zum Zeitpunkt der Planung bekannt, dass in den Tonsteinen des Lias α im Projektgebiet erhöhte Horizontalspannungen zu erwarten sind, die aus einer geologischen Vorbelastung resultieren. In-situ Spannungsmessungen hatten zusätzliche Horizontalspannungen in der Größenordnung von $\Delta\sigma_H = 0,2\text{--}1,9$ MPa ausgewiesen. Die Standsicherheitsberechnungen wurden auf der Grundlage eines felsmechanischen Modells unter Berücksichtigung der Anisotropie der Verformbarkeit sowie der erhöhten Horizontalspannungen nach der FE-Methode ausgeführt (AJRM, vgl.



Credit/Quelle: WBI GmbH



Credit/Quelle: WBI GmbH



Credit/Quelle: [10]

11 Tunnel Küchen, fault zone located within cross-section of tunnel, displacements for a vault heading with open invert and with temporary invert [10]

Tunnel Küchen, Störungszone im Querschnittsbereich, Verschiebungen für einen Kalottenvortrieb mit offener und geschlossener Sohle [10]

FE calculations were used to investigate the influence of the fault zone on the stability of the tunnel for a vault heading with open invert and with temporary invert.

Figure 8 shows the FE mesh used and the characteristic parameters. The fault zone was discretely modeled. For the remaining area of the Bunter, the application of the homogeneous model was sufficient due to the small discontinuity spacing. The strength and deformation behavior of the sandstones and clay-/siltstones of the Bunter formation was described according to the AJRM using the rock mechanical model shown in **Figure 3**. The fault zone was discretely modeled, as mentioned. Its characteristic parameters were determined from post-calculations (comparison calculation – measurement, see [10]).

Figure 9 shows the comparison of measurement and calculation results for a vault heading with temporary vault invert (cf. **Fig. 10**, above). In the case shown in **Figure 9**, the fault zone has a distance of several meters from the tunnel. It can be seen that the displacements in the cross section are not affected by the fault zone and that the results of the measurements and calculations agree to a good approximation.

However, when the fault zones comes close to or intersects the tunnel, the displacements considerably increase, especially on the side of the fault zone. The displacements can be controlled with a vault heading with temporary invert (**Fig. 11**, right), whereas with an open invert, stability cannot be guaranteed in the sidewall area affected by the fault zone (**Fig. 11**, left). This was also confirmed by on-site observations.

This example shows very clearly that it is essential for a safe design to understand and realistically take into account the anisotropy of the strength and deformability resulting, for example, from alternating sequences, discontinuities and also fault zones. It also becomes clear that this is possible with the AJRM. The effort for corre-

felsmechanisches Modell in **Bild 1**). Hierauf fußend wurden Ausbruch und Sicherung sowie die Auskleidung des Tunnels geplant. Der Tunnel wurde im Maulprofil mit einer lichten Breite von 11,2 m und einer lichten Höhe von 9,7 m aufgeföhren (**Bild 6**, links). Aus baubetrieblichen Gründen wurde ein Vortrieb mit vorauseilender Kalotte vorgesehen, die zur Minimierung der Senkungen mit geschlossener Sohle ausgeföhrt wurde. Alternativ wäre auch ein Vollausbuch mit abgetreppter Ortsbrust möglich gewesen [8]. Der Ausbruchquerschnitt wurde mit einer 25–30 cm dicken Spritzbetonschale und einer radialen Ankerung gesichert (**Bild 6**, links).

Der Vortrieb wurde mit einem umfassenden Messprogramm begleitet. Die Messergebnisse wurden mit den rechnerischen Prognosen verglichen. **Bild 7** zeigt den Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen für die Annahme $\Delta\sigma_H = 1$ MPa. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

Dieses Beispiel zeigt, dass mit einer wirklichkeitsnahen Erfassung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Felses nach der AJRM bereits vor vielen Jahren eine wirtschaftliche und sichere Planung möglich war.

In [2, 3] wurde der Österfeldtunnel als Fallbeispiel für einen Vergleich mit einigen der Klassifizierungs-Systeme verwendet. Die unter Annahme der genannten zusätzlichen Horizontalspannung $\Delta\sigma_H = 1$ MPa ermittelten Sicherungsempfehlungen nach dem Q-System, RMR-System und RMi-System sind auch in **Bild 6** dargestellt. Für jedes System ergibt sich eine andere Sicherungsempfehlung. Vergleichsberechnungen nach der FEM zeigen darüber hinaus, dass der Tunnel mit den nach den genannten Klassifizierungssystemen ermittelten Sicherungsempfehlungen nicht ausreichend standsicher gewesen wäre [2, 3]. Andere Fallbeispiele zeigen, dass die Anwendung der genannten Klassifizierungssysteme im Vergleich zur AJRM-Methode zu deutlich unwirtschaftlicheren Entwürfen geföhrt hätte (vgl. [2, 3]).

3.2 Buntsandstein, Tunnel Küchen

Der Tunnel Küchen wurde im Zuge der Bundesautobahn A 44 von Kassel nach Eisenach gebaut [9]. Er liegt in der Volpriehausener Wechselfolge des mittleren Buntsandsteins, der im Bereich des Tunnels engständig geschichtet und vertikal geklüftet ist. Im Buntsandstein treten häufig Störungen auf, deren Lage sich in Voruntersuchungen nicht immer genau bestimmen lässt. Auch beim Tunnel Küchen, der als Kalottenvortrieb mit offener Sohle geplant war, wurde eine steil in den Tunnel einfallende Störung angetroffen, die sich im schleifenförmigen Schnitt von einer Seite näherte [10].

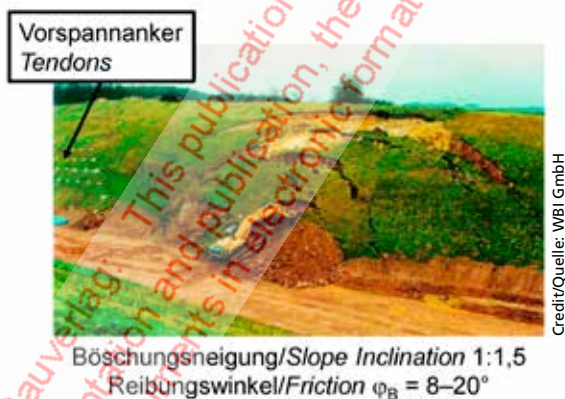
Mit Hilfe von FE-Berechnungen wurde der Einfluss der Störungszone auf die Standsicherheit des Tunnels für einen Kalottenvortrieb mit offener und geschlossener Sohle untersucht. **Bild 8** zeigt das verwendete FE-Netz sowie die Kennwerte. Die Störung wurde diskret nachgebildet. Für den übrigen Bereich des Buntsandsteins war die Anwendung der homogenen Modellvorstellung aufgrund der geringen Trennflächenabstände

sponding calculations is nowadays no longer to be seen as an obstacle for the application.

Another example from the Bunter formation is shown in **Figure 12**. Although it dates back several years, it is still relevant for structures built in the Bunter in recent times and those to be built in the near future. Numerous cuts were constructed in the Bunter formation for the new railway line between Kassel and Fulda. Due to the small shear strength on the bedding-parallel joints of the Bunter (friction angle $\varphi_B \sim 8\text{--}20^\circ$, $c_B \sim 0$) and due to their dip angle, the embankments had to be extensively secured with prestressed anchors, though a shallow inclination of only 30° was foreseen. Without this anchoring, failure occurred along the bedding-parallel discontinuities (**Fig. 12**). However, such effect can only be accurately recognized, if the strength anisotropy of the Bunter formation is accordingly taken into account.

3.3 Limestone, Green Line, Qatar

For the future stations of the Green Line of the metro Qatar, numerous construction pits were constructed in Tertiary limestone. The designer determined the characteristic values of the rock mass on the basis of the Hoek-Brown failure criterion [11]. Based on the exploration results and his own estimation, and with the help of Hoek-Brown's graphs, the designer determined the GSI values, the intact rock strengths (σ_c), the constant m_i and the ratio value MR. On this basis, he used RocLab software [12] to determine the characteristic values of the rock mass, cohesion, friction angle, and deformation modulus. As an example, the results for two important geological units, the Simsima Limestone and the Midra Shale, are shown on the left hand side of **Figures 13** and **14**, respectively. The rock mass is considered like a homogeneous, isotropic material. Comparatively small isotropic strengths are given, which, especially in the case of the Midra Shale, are of



12 New high-speed railway line Hannover–Würzburg, cut Körle, rock slope in the Bunter
NBS Hannover–Würzburg, Einschnitt Überholbahnhof Körle, Böschung im Buntsandstein

ausreichend. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Sand- und Ton-/Schluffsteine des Buntsandsteins wurde nach der AJRM mit dem in **Bild 3** dargestellten felsmechanischen Modell erfasst. Die Störungszone wurde, wie erwähnt, diskret nachgebildet. Ihre Kennwerte wurden aus Nachrechnungen ermittelt (Vergleich Rechnung – Messung, siehe [10]).

Bild 9 zeigt den Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen für einen Kalottenvortrieb mit temporärer Kalottensohle (vgl. **Bild 10**, oben). In dem in **Bild 9** dargestellten Fall hat die Störungszone einen Abstand von einigen Metern vom Tunnel. Man erkennt, dass die Verschiebungen im Querschnitt nicht von der Störung beeinflusst sind und dass die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen in guter Näherung übereinstimmen.

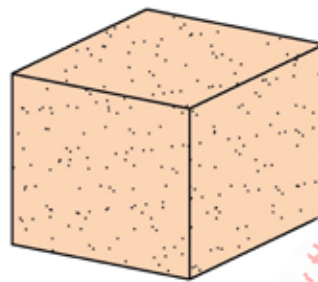
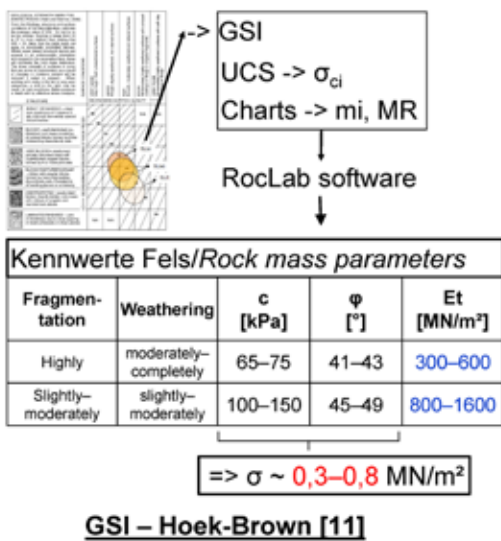
Wenn die Störung jedoch in die Nähe des Tunnels kommt oder diesen schneidet, dann werden die Verschiebungen vor allem auf der Seite der Störung deutlich größer. Mit einem Kalottenvortrieb mit geschlossener Sohle lassen sich die Verschiebungen beherrschen (**Bild 11**, rechts), wohingegen sich bei einem Kalottenvortrieb mit offener Sohle die Standsicherheit im von der Störung betroffenen Ulmenbereich nicht gewährleisten lässt (**Bild 11**, links). Dies haben auch Beobachtungen vor Ort gezeigt.

Dieses Beispiel zeigt sehr klar, dass es für einen sicheren Entwurf essentiell ist, die Anisotropie der Festigkeit und Verformbarkeit, die sich z. B. aus Wechsellagerungen, Trennflächen und auch Störungszonen ergibt, wirklichkeitsnah zu erfassen und zu berücksichtigen. Es wird ebenso deutlich, dass dies mit der AJRM möglich ist. Der Aufwand für entsprechende Berechnungen ist heutzutage nicht mehr als Hinderungsgrund für die Anwendung zu sehen.

Ein weiteres Beispiel aus dem Buntsandstein ist in **Bild 12** dargestellt. Es liegt zwar schon einige Jahre zurück, ist aber auch für die in jüngster Zeit errichteten und in naher Zukunft zu errichtenden Bauwerke im Buntsandstein von Relevanz. Für die Eisenbahnneubaustrecke zwischen Kassel und Fulda wurden zahlreiche Einschnitte im Buntsandstein hergestellt. Aufgrund der geringen Scherfestigkeit auf den bankungsparallelen Schichtfugen des Buntsandsteins (Reibungswinkel $\varphi_B \sim 8\text{--}20^\circ$, $c_B \sim 0$) und des Einfallwinkels der Trennflächen mussten die Böschungen trotz der flachen Neigung von nur 30° umfangreich mit Vorspannankern gesichert werden. Ohne diese Sicherung kam es zum Versagen entlang der Trennflächen (**Bild 12**). Dies wird jedoch nur dann zutreffend erkannt, wenn die Festigkeitsanisotropie des Buntsandsteins entsprechend berücksichtigt wird.

3.3 Kalkstein, Green Line, Katar

Für die Stationen der U-Bahn-Linie Green Line in Katar wurden zahlreiche Baugruben im tertiären Kalkstein gebaut. Die Kennwerte des Felses wurden vom Planer auf Grundlage des Hoek-Brown Bruchkriteriums ermittelt [11]. Auf Grundlage der Erkundungsergebnisse und eigener Einschätzung sowie unter Zuhilfenahme der Grafiken von Hoek-Brown hat der



$E = 1000-2000 \text{ MN/m}^2$
 $\sigma_{\text{UCS, Rock}} = 2-4 \text{ MN/m}^2$

AJRM

Credit/Quelle: Bild oben links -> [11], Rest: WBI GmbH

13 Green Line, Qatar, Simsima Limestone, Rock mass parameters based on Hoek-Brown [11] in comparison with AJRM [13, 14]

Green Line, Katar, Simsima Kalkstein, Kennwerte nach Hoek-Brown [11] im Vergleich zu AJRM [13, 14]

the order of the shear strength of the approximately horizontal, bedding-parallel discontinuities. On this basis and applying the relevant loads, the excavation support was designed. Because of the small strengths assumed, a heavy support with a discontinuous bored pile wall was required. The bored piles, which had a diameter of 1 m, were tied back every 2.5 m to 4 m with 15 to 25.5 m long prestressed anchors (see Fig. 15, left).

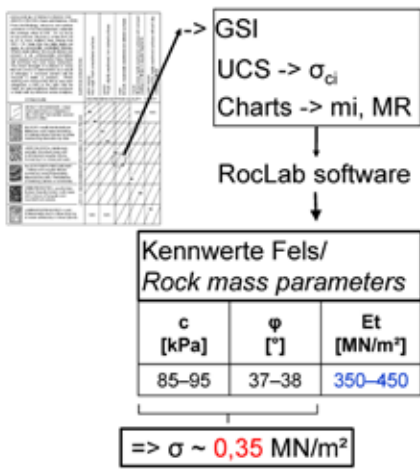
At the request of the contractor, the authors elaborated their own design using the AJRM approach. A site visit and the study of the exploration results revealed that the Simsima Limestone, which is encountered along the upper two-thirds of the excavation pit (Fig. 15), is a fine-grained crystalline limestone with almost no fractures nor bedding-parallel discontinuities. It is homogeneous and isotropic with respect to strength and deformability. The rock mechanical properties were estimated as shown in Figure 13, right. In particular, the strength is significantly higher than the value determined by the designer according to Hoek-Brown (Fig. 13, left).

The Midra Shale, which underlies the Simsima Limestone, exhibits a pronounced horizontal bedding with small spacing (photo in Fig. 14). In addition, steeply dipping joints are observed. This results in an anisotropy of strength, which is considered according to the AJRM, by means of taking into account the intact rock strength on one hand side, and the reduced shear strengths along the discontinuities, on the other hand side (see Fig. 14, right). An isotropic deformability in the elastic range was assumed. The deformation modulus was assumed in the same order of magnitude in both approaches. However, the comparison of the strength parameters according to AJRM with the strength parameters determined with the designer's approaches based on Hoek-Brown, shows significant differences. As already mentioned, in

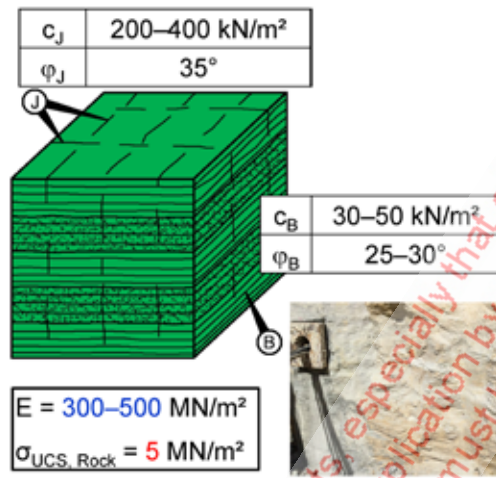
Planer die GSI-Werte, die Gesteinsfestigkeiten (σ_c) sowie die Konstante m_i und den Verhältniswert MR ermittelt. Auf dieser Grundlage hat er mit der RocLab Software [12] die Kennwerte des Felses, Kohäsion, Reibungswinkel und Verformungsmodul, bestimmt. Beispielhaft sind die Ergebnisse für zwei wesentliche Schichtglieder, den Simsima Limestone und den Midra Shale, auf Bild 13 und Bild 14 jeweils links dargestellt. Der Fels wird wie ein homogenes, isotropes Material betrachtet. Dabei werden vergleichsweise geringe isotrope Festigkeiten angegeben, die insbesondere im Falle des Midra Shale in der Größenordnung der Scherfestigkeit der in diesem Fall näherungsweise horizontalen, schichtparallelen Trennflächen liegen. Auf dieser Grundlage und unter Ansatz der relevanten Lasten wurde die Baugrubensicherung geplant. Wegen der geringen angenommenen Festigkeiten ergab sich eine Sicherung mit einer aufgelösten Bohrpfehlwand. Die Bohrpfähle, die einem Durchmesser von 1 m besaßen wurden alle 2,5 m bis 4 m mit 15 bis 25,5 m langen Vorspannkern rückverankert (vgl. Bild 15, links).

Auf Bitte der ausführenden Unternehmung haben die Autoren eigene Betrachtungen unter Ansatz des AJRM durchgeführt. Eine Begehung vor Ort sowie das Studium der Ergebnisse der Erkundungen ergab, dass es sich beim Simsima Limestone, in dem etwa die oberen zwei Drittel der betrachteten Baugrube liegen (Bild 15), um einen feinkörnigen kristallinen Kalkstein nahezu ohne Klüfte und Bankungsfugen handelt. Er ist homogen und isotrop hinsichtlich Festigkeit und Verformbarkeit. Die felsmechanischen Kennwerte wurden wie in Bild 13 rechts dargestellt eingeschätzt. Insbesondere die Festigkeit ist deutlich höher als nach Hoek-Brown vom Planer ermittelt (Bild 13, links).

Der unterhalb des Simsima Limestones anstehende Midra Shale weist eine ausgeprägte, teilweise engständige horizontale Schichtung auf (Foto in Bild 14). Darüber hinaus sind steil stehende Klüfte zu beobachten. Nach dem AJRM wird diese Anisotropie in der Festigkeit berücksichtigt, indem einerseits die Festigkeit des Gesteins und andererseits reduzierte Scherfestigkeiten auf



GSI – Hoek-Brown [11]



AJRM

Credit/Quelle: [11]; WBI GmbH

14 Green Line, Qatar, Midra Shale, Rock mass parameters based on Hoek-Brown [11] in comparison with AJRM [13, 14]

Green Line, Katar, Midra Shale, Kennwerte nach Hoek-Brown [11] im Vergleich zu AJRM [13, 14]

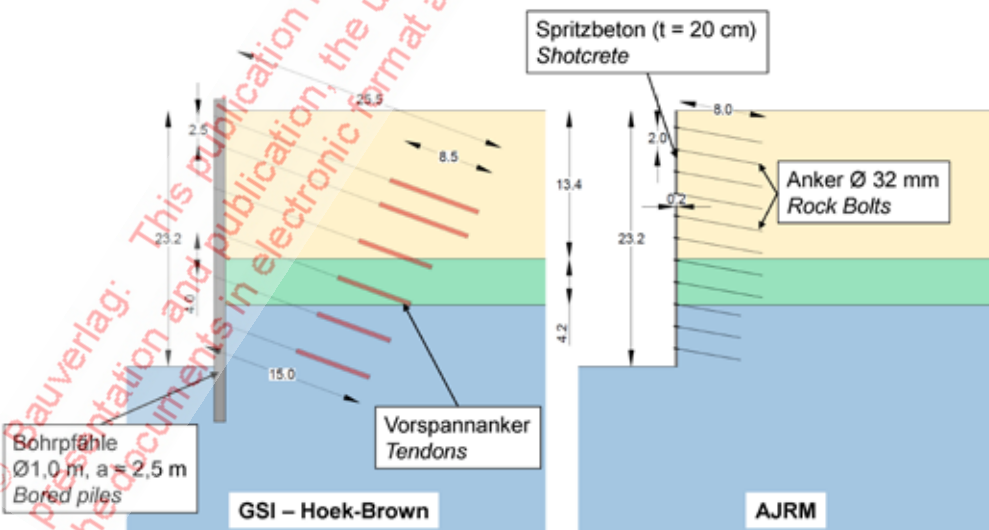
the approach according to Hoek-Brown, the rock mass was considered homogeneously isotropic. The designer defined strength values for the rock mass, which are in the order of magnitude of the shear strength along the bedding-parallel discontinuities. Thus, the rock mass was more or less simulated like a soil. This does not adequately take into account the real conditions and, especially for the horizontal orientation of bedding encountered here, leads to a clear overdimensioning of the support measures.

For the lowest geological unit, which will not be considered in detail here, the result of comparison is similar to that for the Midra Shale.

With the characteristic parameters determined according to AJRM on the basis of the explorations and the experience of the authors, and under consideration of the same load assumptions, it was possible to prove the stability of the excavation with a significantly less exten-

den Trennflächen berücksichtigt werden (vgl. **Bild 14**, rechts). Es wurde von einer isotropen Verformbarkeit im elastischen Bereich ausgegangen. Der Verformungsmodul liegt bei beiden Ansätzen in einer ähnlichen Größenordnung. Der Vergleich der Festigkeitskennwerte nach AJRM mit den Festigkeitskennwerten, die mit den Ansätzen des Planers auf der Grundlage von Hoek-Brown ermittelt wurden, zeigt jedoch sehr deutliche Unterschiede. Der Fels wurde, wie bereits erwähnt, nach Hoek-Brown homogen-isotrop betrachtet. Dabei wurden für den Fels Festigkeiten angegeben, die in der Größenordnung der Scherfestigkeit der schichtparallelen Trennflächen liegen. Der Fels wurde damit annähernd wie ein Boden betrachtet. Dies trägt den tatsächlichen Verhältnissen nicht Rechnung und führt insbesondere bei der hier vorliegenden horizontalen Schichtung zu einer deutlichen Überdimensionierung der Sicherungsmaßnahmen.

Für das unterste Schichtglied, das hier nicht näher betrachtet werden soll, fällt der Vergleich ähnlich aus wie für den Midra Shale. Mit den nach AJRM auf der Grundlage der Erkundungen und



15 Green Line, Qatar, Support of construction pit dimensioned with parameters according to Hoek-Brown [11] in comparison with AJRM [10]

Green Line, Katar, Baugrubensicherung auf Basis von Kennwerten nach Hoek-Brown [11] im Vergleich zu AJRM [10]

Credit/Quelle: [10]

sive support consisting of 20 cm shotcrete and up to 8 m long SN anchors arranged in a grid of 2 m x 3 m (Fig. 15, right). The realistic consideration of the strength and deformation properties of the rock mass thus allowed for a considerably more economical design and construction in this case. Unfortunately, the optimized design could only be partially implemented on site, since a large portion of the bored piles had already been executed.

4 Outlook on Part 2

The presentation of the case studies shows very clearly that the realistic simulation of the deformability and strength of the rock mass with the AJRM enables a safe and economical design. This can also be confirmed by measurements during construction.

In part 2 of the article, the rock hydraulic model belonging to the AJRM is presented along with selected case studies. In addition, the methods for determining the rock mechanical and rock hydraulic characteristic parameters are discussed.

der Erfahrung der Autoren ermittelten Kennwerten konnte die Standsicherheit der Baugrube bei gleichen Lastannahmen mit einer deutlich geringeren Baugrubensicherung mit 20 cm Spritzbeton und bis zu 8 m langen, schlaffen Ankern, die in einem Raster von 2 m x 3 m angeordnet werden, nachgewiesen werden (Bild 15, rechts). Die wirklichkeitsnahe Erfassung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Felses erlaubte also in diesem Fall eine erheblich wirtschaftlichere Planung und Bauausführung. Leider konnte diese vor Ort nur noch teilweise umgesetzt werden, da ein Großteil der Bohrpfähle bereits ausgeführt worden war.

4 Ausblick auf Teil 2

Die Darstellung der Fallbeispiele zeigt sehr deutlich, dass die wirklichkeitsnahe Erfassung der Verformbarkeit und Festigkeit des Felses mit dem AJRM einen sicheren und wirtschaftlichen Entwurf ermöglicht. Dies kann auch anhand baubegleitender Messungen bestätigt werden.

Im Teil 2 des Artikels wird das zum AJRM gehörige felshydraulische Modell mit ausgewählten Fallbeispielen vorgestellt. Zudem wird auf die Methoden zur Ermittlung der felsmechanischen und felshydraulischen Kennwerte eingegangen.

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 – Herleshäuser (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.roscience.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

Felsmechanik – Grundlagen und Anwendung

Basis für den sicheren und wirtschaftlichen Entwurf und Bau von

- mehr als 175 Tunneln, mit > 640 km Gesamtlänge,
- mehr als 60 Staumauern, Dämmen, Wasserkraftwerken (einschließlich unterirdischer Kavernen),
- mehr als 65 Bauwerken der Geotechnik und des Spezialtiefbaus (z. B. Böschungen, Hänge, Gründungen, Baugruben)

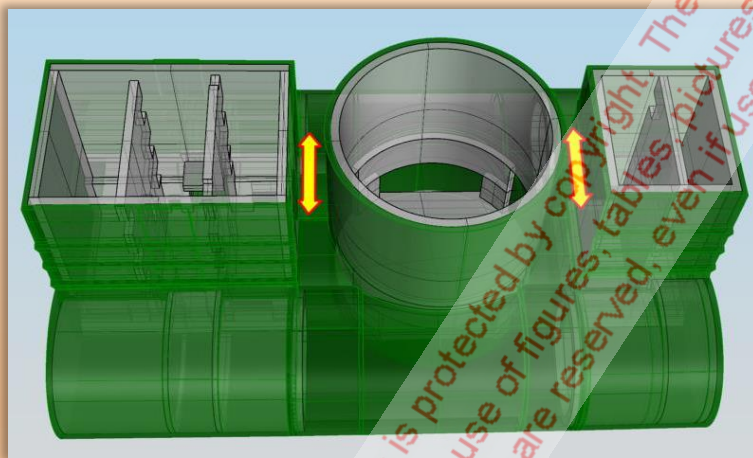
in geklüftetem und anisotropem Fels und Boden.

> 50 Jahre Erfahrung

- Modellentwicklung
- Anwendung in der Praxis und Rückkopplung
- Ständige Weiterentwicklung

Daher sind wir in der Lage, das Tragverhalten von Boden und Fels sowie die Interaktion von Bauwerk und Baugrund wirklichkeitsnah zu erfassen und können dazu beitragen, sichere und wirtschaftliche Bauwerke zu erstellen.

Stuttgart 21, Flughafentunnel, Zentraler Zugang und Stationsröhren: Ausführungsplanung mit **WBIM**.



Erfahren Sie mehr dazu beim:



6. Felsmechanik- und Tunnelbautag im Rosengarten, Mannheim

10.06.2021

Eine Veranstaltung von: **WBI** Unterstützt von: **DB** **VDI**

**Felsmechanische Fragestellungen beim Bahnprojekt Stuttgart – Ulm
und anderen nationalen und internationalen Projekten**

Weitere Informationen unter: www.felsmechanik.eu