

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 92 (1974)
Heft: 18: Tunnelbau, Bodenmechanik

Artikel: Vorschlag für ein System der Gebirgsklassifikation für mechanischen Vortrieb
Autor: Rutschmann, Werner
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-72355>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vorschlag für ein System der Gebirgsklassifikation für mechanischen Vortrieb

Von W. Rutschmann, Adliswil/Zürich¹⁾

DK 624.19

Der mechanische Vortrieb ist ein junges Verfahren; es ist so jung, dass diejenigen, die sich damit befassen, noch nicht einmal alle die gleiche Fachsprache sprechen. Vorweg werden deshalb einige fachtechnische Begriffe erklärt. Diese haben, wie

der anschliessend unterbreitete Vorschlag für ein System der Gebirgsklassifikation, nur den mechanischen Vortrieb im Festgestein, ausgeführt mit Vollvortriebs- bzw. Vollschnittmaschinen, zum Gegenstand.

1. Begriffserklärungen

1.1 Mechanischer Vortrieb

Der mechanische Vortrieb oder Bohrvortrieb erfolgt mittels einer Vortriebsmaschine. Diese löst und zerkleinert gleichzeitig das Gebirge, greift das Bohrklein auf und fördert es im Maschinenbereich ab. Von kleineren Bohrdurchmessern abgesehen, sind die Geräte für das Versetzen von vorläufigem Ausbau Bestandteile der Vortriebsmaschine und die Sicherung des gebohrten Hohlraumes kann in vielen Fällen ohne Unterbruch des Vortriebes durchgeführt werden.

1.2 Vortriebssystem

Ein Vortriebssystem (Bild 1) umfasst die Gesamtheit der Installationen im Tunnel, die erforderlich sind für den *Vortrieb* und für die unmittelbar damit im Zusammenhang stehenden Arbeiten, u.a.: Vortriebsmaschine, Transporteinrichtungen, Versorgungsleitungen, Installationen für die Staubbekämpfung sowie für die Belüftung, evtl. auch für die Klimatisierung der Arbeitsplätze bzw. des Maschinenbereichs.

1.3 Vortriebsmaschine

Eine Vollvortriebs- bzw. Vollschnittmaschine (Bild 2) besteht in der Regel aus der Grund- bzw. Rumpfmaschine und einem oder mehreren Nachläufern. Die wichtigsten funktionellen Elemente einer Grundmaschine sind: Bohrkopf mit Antriebsmotoren, Maschinenrahmen sowie die hydraulisch betätigten Verspann-, Vorschub- und Abstützeinrichtungen.

1.4 Bohrsystem

Der Begriff Bohrsystem (Bild 3) bezieht sich auf den Bohrkopf bzw. Bohrwerkzeugträger einer Vortriebsmaschine. Er kennzeichnet dessen geometrische Form sowie Typ, Anzahl und Anordnung der Bohrwerkzeuge auf dem Bohrkopf.

¹⁾ Vortrag gehalten anlässlich der Gründungsversammlung der Fachgruppe für Untertagbau des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) am 12. September 1973 in Bern. Die Darlegungen sind auszugsweise dem im kommenden Juni im VDI-Verlag, Düsseldorf, erscheinenden Buch «Mechanischer Tunnelvortrieb im Festgestein» des Verfassers entnommen.

Die Bohrwerkzeuge einer Vollvortriebsmaschine bearbeiten gleichzeitig die ganze Ortsbrust. Sie bohren einen kreisrunden Querschnitt.

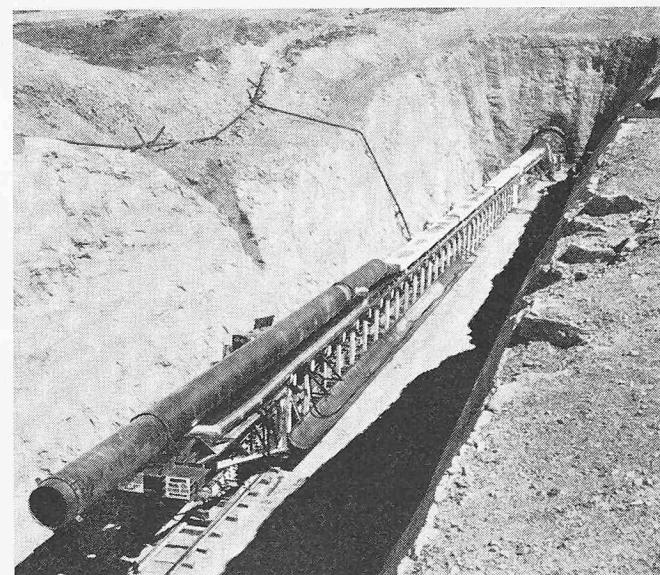
1.5 Bohrbarkeit

Die Bohrbarkeit ist die Eigenschaft einer geologischen Formation unter Einwirkung eines bestimmten Bohrsystems die Ausbreitung vorhandener Risse und Schwächen der Materialkomponenten oder des Materialverbandes bis zum Bruch zu erleiden.

1.6 Penetration

Die Penetration ist ein Mass für die Bohrbarkeit. Unter Bohrkopfpenetration t_K wird das mittlere Eindringen des Bohrkopfes in die Formation bei einer einzigen Umdrehung des Bohrkopfes verstanden. Die Penetration wird beeinflusst von:

Bild 1. Vortriebssystem mit Vortriebsmaschine, Überbrückungs- und Beladeband sowie Luttenteleskop (Photo US Büro of Reclamation)



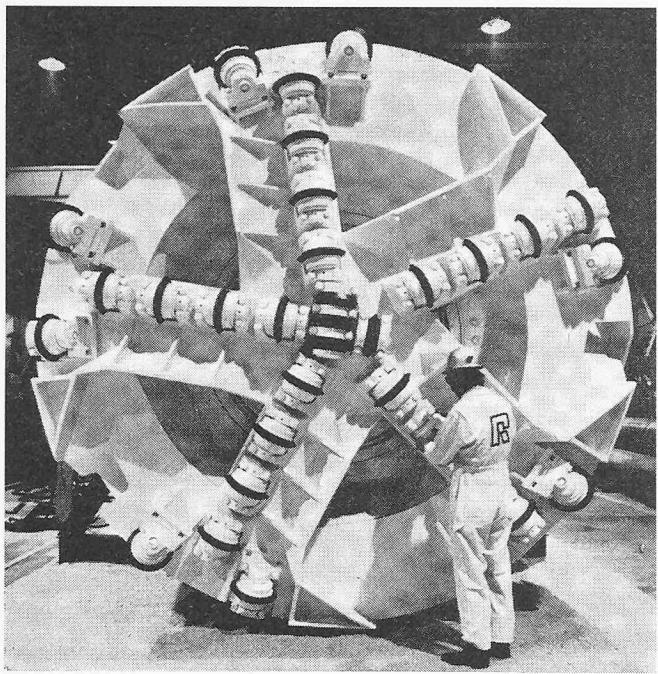


Bild 3. Offener Bohrkopf, ausgerüstet mit Dreifachdiskus-Zentrummeissel sowie Einfachdiskus-Innen- und Kalibermeisseln
(Photo The Robbins Company)

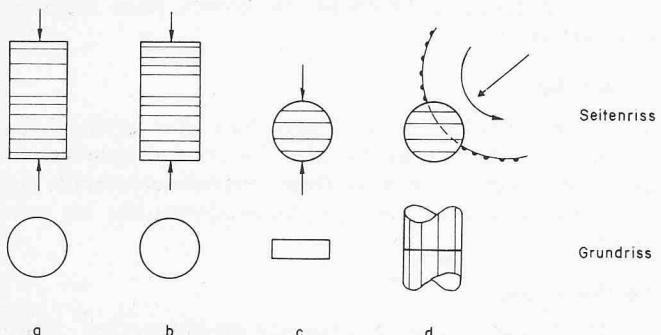
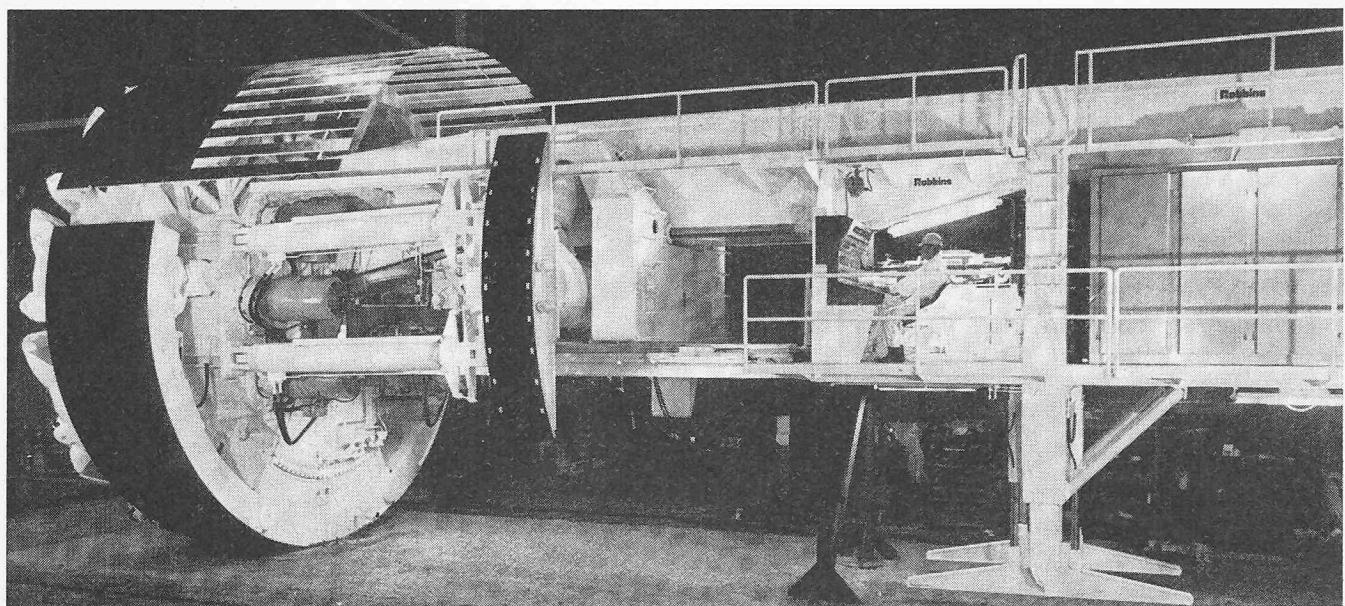


Bild 4. Gesteinsprüfungen für die Ermittlung der Indexwerte der Basisbohrbarkeit. a Spannungs-/Stauchungsbeziehung, b einachsige Zylinderdruckfestigkeit, c Spaltzugfestigkeit, d Sägehärte

Bild 2. Vortriebsmaschine: Links Grundmaschine mit Bohrkopf, Antriebsmotoren, Vorschubpressen und Verspannplatten. Rechts, in der Verlängerung des Maschinenrahmens und in diesen eingebaut «Nachläufer». Dazwischen hintere Abstützeinrichtung (Photo The Robbins Company)



- der zu bohrenden Formation,
- der Vortriebsmaschine, im Besonderen vom Bohrsystem und von
- der tatsächlich auf den Bohrkopf wirksamen Vorschubkraft F_V der Maschine bzw. der mittleren Eindringkraft F_e eines Bohrwerkzeuges.

1.7 Indexwerte der Basisbohrbarkeit

Als Einflussgrößen des zu bohrenden Gesteins auf die Bohrbarkeit lassen sich mechanische Eigenschaften voraussetzen. Als *Indexwerte der Gesteinsbohrbarkeit bzw. der Basisbohrbarkeit* können definiert werden (Bild 4):

- einachsige Zylinderdruckfestigkeit β_D
- E -Modul tangens bei 50 % Druckfestigkeit E_{t50}
- Spaltzugfestigkeit β_Z
- ein Härtebegriff, z. B. Sägehärte SH

1.8 Trennfläche des Gebirges

Für die meisten Fälle des praktischen Vortriebes ist nicht die gesteinsbedingte Basisbohrbarkeit massgebend, sondern ein durch Trennflächen des Gebirges beeinflusster Wert. Solche Trennflächen sind: Gesteinstrennflächen bzw. bei Sedimenten Schichtgrenzflächen, Schieferungsflächen so weit diese nicht bereits dem Gesteinsgrundkörper eigen sind, und Klüfte. Die gebirgsbedingte Bohrbarkeit ist meist grösser als die Basisbohrbarkeit. Sie kann aber auch kleiner sein.

1.9 Indexwerte des Bohrwerkzeugverschleisses

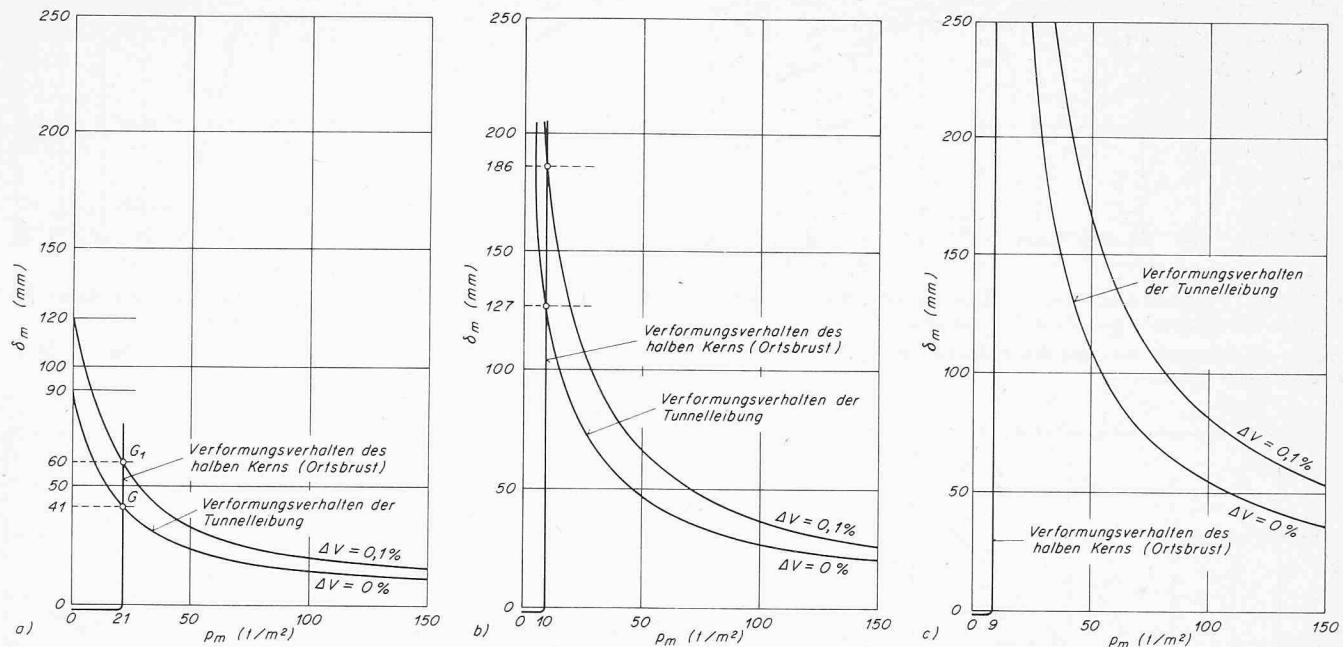
Auch für den Verschleiss der Bohrwerkzeuge können Indexwerte definiert werden. Es kommen in Betracht, [1]:

- ein Festigkeitsbegriff, kombiniert mit
- der Art, dem Anteil und dem mittleren Korndurchmesser der Hauptgemengeanteile des Gesteins.

Auch der Bohrwerkzeugverschleiss wird durch die Trennflächen des Gebirges beeinflusst.

1.10 Stabilitätsverhalten der Tunnelleibung und der Ortsbrust

Die Kennlinie des Verformungsverhaltens der Tunnelleibung ist die graphische Darstellung der mittleren radialen Verformung δ_m der Leibung in Funktion der mittleren Stütz-



Gleitflächenreibungswinkel

Elastische Zone $\varphi = 45^\circ$
Bruchzone $\varphi = 40^\circ$

Gleitflächenscherfestigkeit

Elastische Zone $c = 2 \text{ kp/cm}^2$
Bruchzone $c = 1 \text{ kp/cm}^2$

Gleitflächenreibungswinkel

Elastische Zone $\varphi = 40^\circ$
Bruchzone $\varphi = 35^\circ$

Gleitflächenscherfestigkeit

Elastische Zone $c = 1,5 \text{ kp/cm}^2$
Bruchzone $c = 0,5 \text{ kp/cm}^2$

Gleitflächenreibungswinkel

Elastische Zone $\varphi = 35^\circ$
Bruchzone $\varphi = 30^\circ$

Gleitflächenscherfestigkeit

Elastische Zone $c = 1,5 \text{ kp/cm}^2$
Bruchzone $c = 0,5 \text{ kp/cm}^2$

Bild 5. Felsmechanische Stabilitätsfälle [4]

Bohrdurchmesser $D = 11,0 \text{ m}$, Überlagerungshöhe $H = 1000 \text{ m}$
E-Moduli, elastische Zone $E = 4 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$
Bruchzone $E = 2 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$

Seitendruckbeiwert $\lambda = 0,7$
Volumenzunahme der Bruchzone $\Delta V = 0 \text{ und } 0,1 \%$
G und G_1 sind Gleichgewichtspunkte für $\Delta V = 0 \text{ bzw. } 0,1 \%$

kraft p_m bzw. des Stabilisierungsdruckes bzw. des Ausbauwiderstandes auf dieselbe [2], [3]. Es lässt sich auch eine Kennlinie der Tunnelleibung im Einflussbereich der Ortsbrust und eine Kennlinie der Ortsbrust definieren. Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Gebirges, der ursprüngliche Spannungszustand, der Tunnelquerschnitt sowie das Vortriebsverfahren sind die Parameter für die Be-rechnung der Kennlinien. Auf Grund des Verlaufes dieser Kennlinien im gleichen Diagramm lassen sich 4 Stabilitätsfälle gemäss Tabelle 1 definieren.

2. Klassifikation des Gebirges für den Tunnelvortrieb

Die Beurteilung des Gebirges hinsichtlich seines Verhaltens beim Tunnelvortrieb sowie hinsichtlich allenfalls erforderlicher Massnahmen der Gebirgssicherung und -stabilisierung ist sehr wichtig für die Projektierung, die Ermittlung des Bauprogrammes und der Baukosten sowie für die unternehmerische Angebotsbearbeitung. Die Beurteilung kommt in der Regel zum Ausdruck durch eine

- Geologische Dokumentation und eine
- Felsmechanische Vorhersage.

Sie sollte aber auch ihren Niederschlag finden in einer

- Voraussage der Zuordnung von gleichartigen Bereichen des Tunneltrasses zu sogenannten *Gebirgsklassen* oder allenfalls zu Profiltypen.

2.1 Geologische Dokumentation

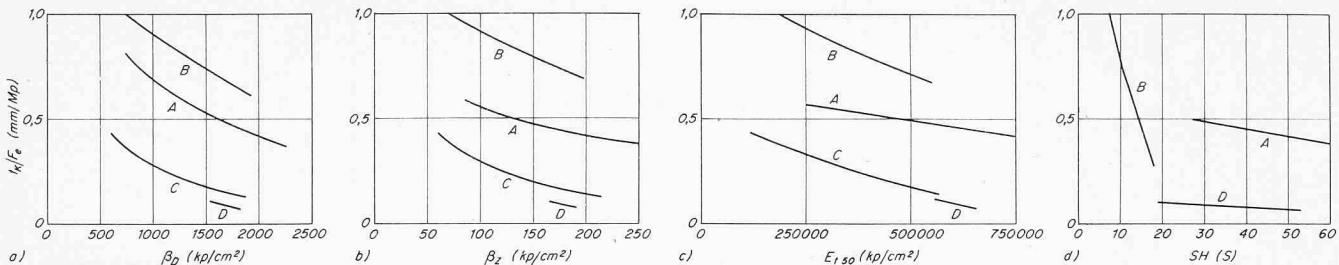
Das Erfordernis eines geologischen Gutachtens für ein Tunnelprojekt und für die Ausschreibung der Bauarbeiten ist unbestritten. Es hat in der Regel Auskünfte zu vermitteln

über die Art der zu durchfahrenden Gesteine und ihre Beschaffenheit, über ihre Lagerung bezüglich der Tunnelachse, über den mutmasslichen Wasseranfall und das mutmassliche Anfahren von Gas sowie bei grösserer Überlagerungshöhe über die mutmassliche Ursprungstemperatur des Gebirges. Ein Leitbild für die Kluftflächen-Konfiguration wäre wünschenswert. Der projektierende Ingenieur soll dem bearbeitenden Geologen die im Hinblick auf das Projekt zu beantwortenden Fragen formulieren. Durch die Fragestellung soll die Sachlichkeit und die Projektbezogenheit der Begutachtung besser gewährleistet werden. Es wäre der Ausdruck eines Verkennens der Schwierigkeiten der Aufgabe und vom Geologen Unzumutbares gefordert, wenn der Ingenieur auf eine über jeden Zweifel erhabene Prognose Anspruch erheben würde. Er soll vom Geologen aber im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Projektierung fordern, dass dieser alle seine Äusserungen klassiert nach:

- «sicherem Wissen» oder, falls dieses nicht vorhanden ist, nach
- «wahrscheinlichem Zutreffen» und nach
- «möglichem Zutreffen» im Sinne von für das Projekt ungünstigen Verhältnissen.

Tabelle 1. Felsmechanische Stabilitätsfälle

Fall	Leibung	Ortsbrust	Bild
1	standfest	standfest	5a
2	standfest	nicht standfest	
3	nicht standfest	standfest	5b
4	nicht standfest	nicht standfest	5c



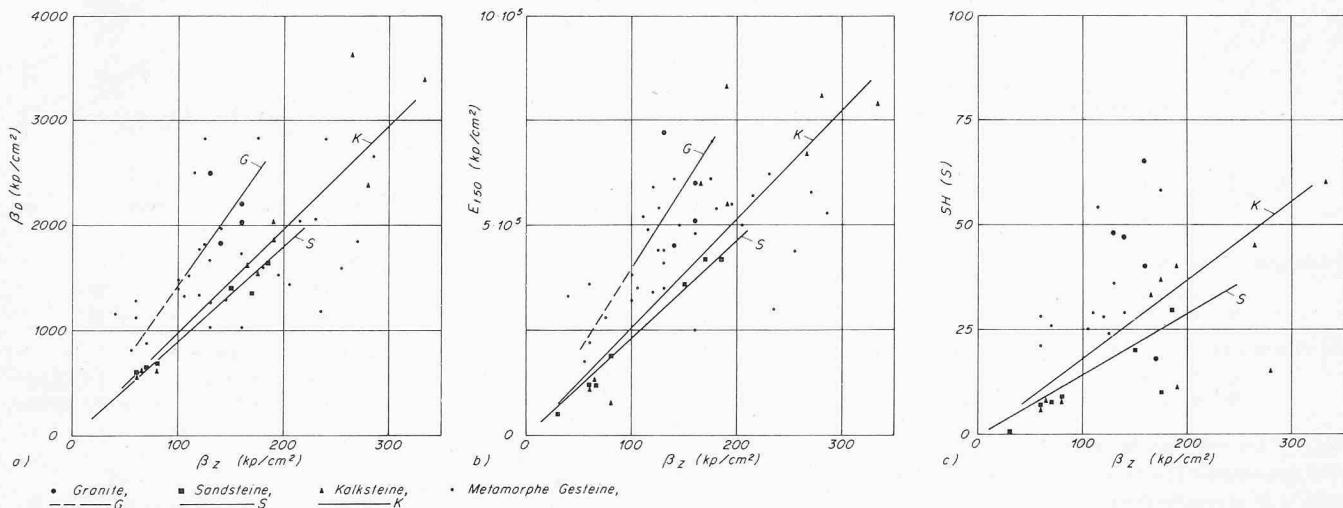
Einachsige Zylinderdruckfestigkeit zu spezifischer Penetration

Spaltzugfestigkeit zu spezifischer Penetration

Elastizitätsmodul-tangens 50 % zu spezifischer Penetration

Sägehärte zu spezifischer Penetration

Bild 6. Beziehungen zwischen den Indexwerten der Basisbohrbarkeit und der spezifischen Bohrkopfpenetration t_K/F_e , Bohrsysteme A, B, C und D, siehe Tabelle 2



Spaltzugfestigkeit zu einachsiger Zylinderdruckfestigkeit

Spaltzugfestigkeit zu Elastizitätsmodul-tangens 50 %

Spaltzugfestigkeit zu Sägehärte

Bild 7. Beziehungen zwischen den Indexwerten der Basisbohrbarkeit

2.2 Felsmechanische Vorhersage

Die geologische Dokumentation, insbesondere die Information über die Art, die Beschaffenheit und die Lagerung der Gesteine und – sofern schlüssig vorhanden – das Leitbild für die Kluftflächen-Konfiguration des aufzufahrenden Gebirges, ist eine wichtige Grundlage für die nachfolgende felsmechanische Vorhersage durch einen *ausgebildeten Baugeologen* oder einen *mit dem Fachgebiet der Felsmechanik vertrauten Ingenieur*. Durch diese Prognose sollen das Stabilitätsverhalten des Gebirges beim Tunnelvortrieb und allenfalls der erforderliche vorläufige und eventuell auch der endgültige Ausbau abgeschätzt und Bereiche des Tunneltrasses mit gleichartigem Verhalten und gleichem Ausbauerfordernis sogenannten *Ausbruchs- oder Gebirgsklassen* zugeordnet werden.

2.3 In der Schweiz übliche Klassifikation für konventionellen Vortrieb

Die Klassifikation eines zu durchörternden Gebirges im *Hinblick auf qualitativ und quantitativ eindeutig definierte Massnahmen, welche beim Vortrieb erforderlich sind*, um singulären Steinfall zu verhindern und um die Stabilität des Gebirges bis zum Einbringen des endgültigen Ausbaues erhalten zu können, hat sich beim konventionellen Vortrieb im allgemeinen bewährt. Sie ist nicht mit geologischen Begriffen verhaftet, deren Auslegung im Ermessen der Bearbeiter liegt. Bei der Bauausführung liegen ihr messbare Größen, nämlich die Art, das Ausmass und der Ort bzw. der Zeitpunkt der Durchführung von Massnahmen zugrunde. Tatsächlich kennzeichnet diese Art der Klassifikation einen konventionellen Tunnelvortrieb von gegebener Ausbruchsform und -fläche sehr weitgehend.

Mit der Abschätzung der Ausbauerfordernisse erfolgt implizite auch eine Festlegung auf den Bedarf an Arbeitskräften und an Geräten sowie auf die Vortriebsleistung. Damit, und nach Abschätzung des Bohrstahlverbrauchs, der Bohrzeit und des Sprengstoffbedarfes, können für den konventionellen Vortrieb auch die Kosten kalkuliert werden. Ein Fehler in der Abschätzung des Bohrstahl- oder auch des Sprengstoffverbrauchs je m^3 Gestein beeinflusst den Preis des reinen Ausbruches nur um wenige Prozente.

2.4 Klassifikationsvorschlag für mechanischen Vortrieb

Problemstellung

Die Vorteile des Klassifikationssystems für konventionellen Vortrieb legen es nahe, seine Verwendbarkeit auch für den mechanischen Vortrieb zu beurteilen. Das System ist anwendbar, es lassen sich damit aber nicht alle Aspekte des Bohrvortriebes erfassen. Die Klassifikation hinsichtlich Art, Ausmass, Ort und Zeitpunkt des Einbringens von vorläufigem Ausbau ist keine Festlegung auf die Bohrbarkeit des Gebirges – und damit auf ein Bohrsystem – oder auf den Bohrwerkzeugverschleiss. Sie genügt nicht zu einer Kostenkalkulation. Der Bohrvortrieb lässt sich nicht durch einen einzigen, die massgebenden Kennzeichen des Verfahrens erfassenden Begriff beschreiben, wie dies für den konventionellen Vortrieb weitgehend der Fall ist. Er bedarf einer *Klassifikation in dreifacher Beziehung*, nämlich hinsichtlich:

- Bohrbarkeit der zu durchörternden Formation
- Bohrwerkzeugverschleiss und
- Verspannbarkeit der Vortriebsmaschine sowie Ausbauerfordernis.

Alle drei Klassifikationen sollen allgemein gültig und nicht etwa im Hinblick auf ein bestimmtes Bohrsystem oder ein vorausgesetztes Vortriebsmaschinenfabrikat formuliert werden.

Klassifikation nach Bohrbarkeit

Davon ausgehend, dass die Bohrbarkeit beeinflusst wird von mechanischen Eigenschaften des Gesteins, vom Bohrsystem und von der Vorschub- bzw. Eindringkraft, hat der Verfasser auf Bohrvortriebsbaustellen Beobachtungen und Messungen durchgeführt. Sie hatten zum Ziel, bei Vortrieben in ungestörtem Gebirge und bei einer aus gleichem Gestein aufgebauten Ortsbrust Zusammenhänge zu erkennen zwischen der Penetration von mit Rollenmeisseln bestückten Bohrsystemen einerseits und β_D , E_{t50} , β_Z und SH andererseits. Die für die Beobachtungen zur Verfügung gestandenen Bohrsysteme sind auf Tabelle 2 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Bohrbarkeitsbestimmung sind auf Bild 6 dargestellt. Jede dieser Beziehungskurven ist aus 3 bis 5 Messpunkten gezeichnet.

Trotz vereinfachenden Annahmen darf dem empirischen Verfahren einer Bohrbarkeitsbestimmung zugestanden werden, dass es für vier verschiedene Bohrsysteme die offensichtlich vorhandene Tendenz einer Gesetzmässigkeit zwischen den vorausgesetzten Indexwerten und der spezifischen Penetration, als Ausdruck der Basisbohrbarkeit, nachgewiesen hat. Auf Grund dieser Erkenntnis können die erwähnten mechanischen Eigenschaften als *Indexwerte für die Basisbohrbarkeit* verwendet werden.

Die Schwierigkeit der Vorhersage eines zuverlässigen Leitbildes für die Kluftflächen-Konfiguration und die Problematik, den Trennflächeneinfluss auf die Bohrbarkeit quantitativ schlüssig festzuhalten, stehen vorläufig dem Wunsche entgegen, auch Indexwerte zu definieren für die eine gegebene Basisbohrbarkeit beeinflussende Trennflächen-Konfiguration.

Gelegentlich wird die Druckfestigkeit als massgebend bezeichnet für die Gesteinsbohrbarkeit. Diese Auffassung ist nur bedingt richtig. Auf Bild 7 sind die Beziehungen zwischen den Indexwerten der Basisbohrbarkeit dargestellt.

β_Z/β_D

Es besteht die Tendenz einer linearen Beziehung für
– Kalksteine und Sandsteine 1/10
– Granite und granitähnliche Gesteine 1/14

Es ist keine Gesetzmässigkeit vorhanden für metamorphe Gesteine, abgesehen von granitähnlichen.

β_Z/E_{t50}

Es ist die Tendenz einer linearen Beziehung ersichtlich wiederum für die massigen, glimmerarmen Gesteine.

β_Z/SH

Die Tendenz einer linearen Beziehung ist nur noch erkennbar für Sandsteine und alpine Kalksteine. Es gibt Anhaltspunkte für einen exponentiellen Zusammenhang für Granite und abrasive Gesteine im allgemeinen. Es besteht wiederum kein gesetzmässiger Zusammenhang für die nicht-abrasiven metamorphen Gesteine.

Klassifikation nach Bohrwerkzeugverschleiss

Der Verschleiss von Schneiden wird, nach Untersuchungen der Bergbauforschung der BRD [1], in hohem Masse beeinflusst vom Gehalt und dem Korndurchmesser von abrasiven Mineralien sowie von der Festigkeit des Gesteins. Festigkeitseigenschaften finden bereits Erwähnung für die Klassifikation hinsichtlich Basisbohrbarkeit. *Art, Anteil und mittlerer Korndurchmesser der Hauptgemengteile des Gesteins* lassen sich als *Indexwerte für den Bohrwerkzeugverschleiss* verwenden.

Tabelle 2. Bei den Bohrbarkeitsuntersuchungen mit Vortriebsmaschinen verwendete Bohrsysteme

Typ	Bohr-durchmesser (m)	Meissel	Schnitt-breite (cm)	Eindring-kraft F_e (Mp)
A	4,2 bis 5,6	Warzendiskus	6,5 bis 7,0	8 bis 11
B	4,2 bis 5,6	Einfachdiskus	8,0 bis 8,5	8 bis 12
C	2,2 bis 10,5	Zweifachdiskus	5,0	7 bis 8
D	3,8	Dreifachdiskus	4,0	13 bis 14

Die quantitative Berücksichtigung des Einflusses von Trennflächen des Gebirges auf den Bohrwerkzeugverschleiss ist problematisch und es soll vorläufig davon abgesehen werden, entsprechende Indexwerte zu definieren.

Klassifikation nach Ausbauerfordernis und Verspannbarkeit der Vortriebsmaschine

Den eigentlichen felsmechanischen Berechnungen geht die Festlegung der Rechenparameter und der sogenannten *Homogenbereiche* voraus. Das *Festtypenlängenprofil* des Tunnels, als Beispiel Bild 8, stellt diese Homogenbereiche dar. Ein Homogenbereich ist gekennzeichnet durch gleiche vorausgesetzte Zahlenwerte des Gleitflächenreibungswinkels γ und der Gleitflächenscherfestigkeit c sowie durch angenähert gleiche Elastizitätsmoduli und Überlagerungshöhen. Es ist gerechtfertigt, die Überlagerungshöhe auf die Relieflinie anstatt auf das topographische Längenprofil zu beziehen.

In der *ersten Phase* der felsmechanischen Berechnung wird, zum Beispiel nach dem Kennlinienverfahren, für jeden Homogenbereich das Stabilitätsverhalten ermittelt.

In einer *zweiten Berechnungsphase* werden nur noch jene Bereiche des Tunneltrasses in Betracht gezogen, für welche nichtstabiles Verhalten der Tunnelreibung oder Ortsbrust zu erwarten ist. Diese erfordern jedenfalls Ausbau. Auf der Grundlage eines Kataloges für die technischen Möglichkeiten der Gebirgssicherung und -stabilisierung beim Vortrieb und der Kennlinien des Gebirges sowie der Ausbauten [5] wird in der Folge für jeden Bereich Art, Ausmass und Ort bzw. Zeitpunkt des Einbringens von Ausbau festgelegt. Bei dieser Festlegung werden jedenfalls auch die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit möglicher Lösungen berücksichtigt.

Dem mechanischen Vortrieb steht das gleiche *Instrumentarium für die Gebirgssicherung und -stabilisierung* zur Verfügung wie dem konventionellen Verfahren. Die Anwendung ist allerdings an die Voraussetzungen gebunden, dass ausreichender Arbeitsplatz vorhanden ist, und dass auf der Vortriebsmaschine entsprechende Zusatzinstallationen angebracht sind, wie Ankerbohrhämmer, Stahlringsegment-transport- und evtl. auch Versetzergeräte, Spritzbetonausrüstung oder Tübbingversetzergerät.

Im Bereich einer Vortriebsmaschine kann ohne Rücksicht auf ihre Bauart vorläufiger Ausbau eingebracht werden zwischen Grundmaschine und erstem Nachläufer, zwischen den Nachläufern und hinter der Vortriebsmaschine.

Diese Ausbaustellen liegen um 10, 15 bis 30 m diesseits der Ortsbrust. Käfige um und Schutzdächer über der Vortriebsmaschine sind untauglich, wenn immer die Zeit für das Bohren der Strecke zwischen Ortsbrust und Ausbaustelle länger ist als die Standzeit des Gebirges über die gleiche Länge. Sie bieten nur Schutz gegen singulären Steinfall. Sind grosse Deformationen zu erwarten, muss ein Ausbau möglichst nahe bei der Ortsbrust, d.h. unmittelbar hinter dem Bohrkopfräger eingebracht werden.

Der minimale Abstand zwischen Ortsbrust und vorderster Ausbaustelle beträgt für Vollvortriebsmaschinen jedenfalls 1,5 bis 3 m. Darüber hinaus ist der mögliche Zeitpunkt

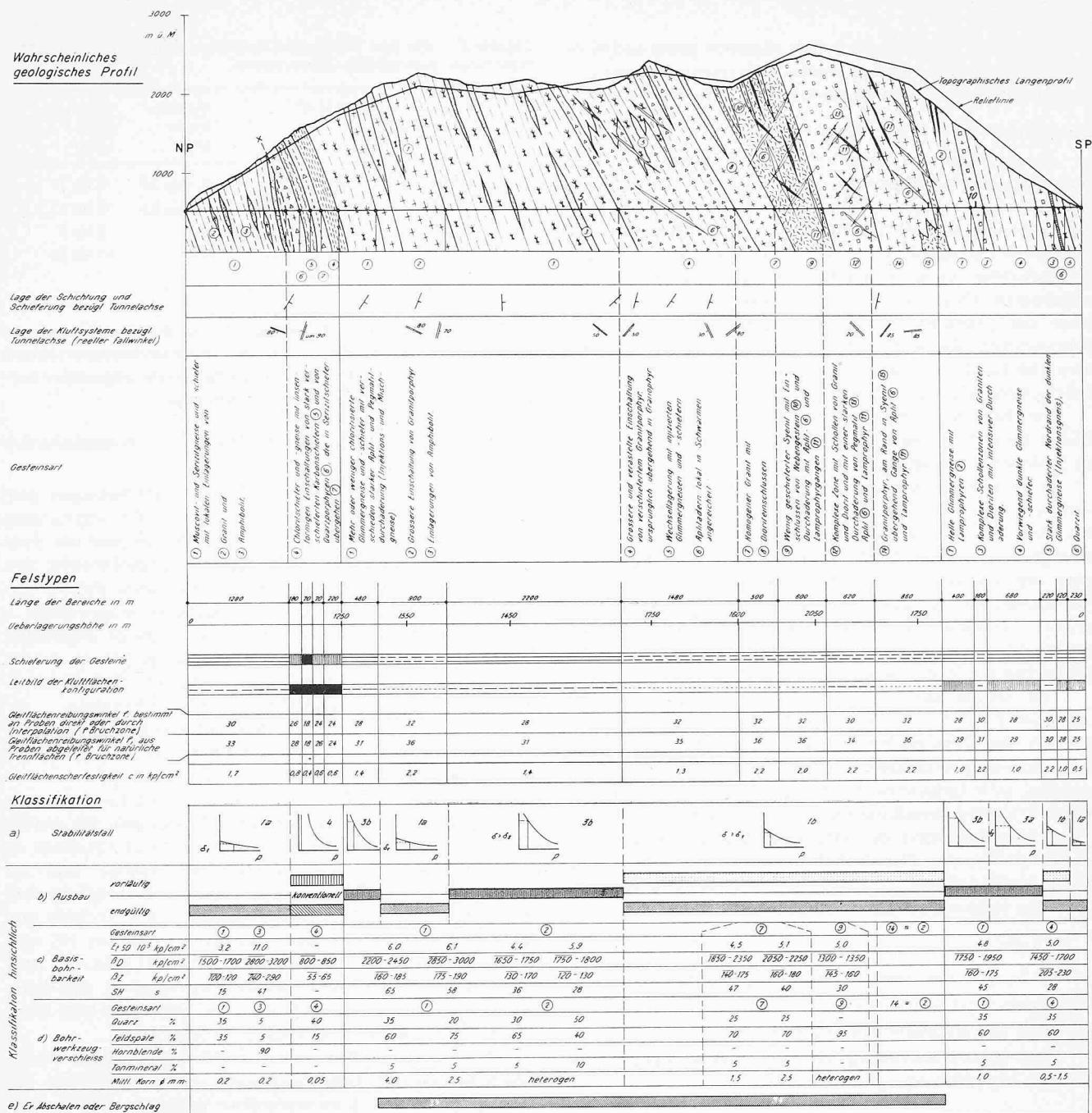
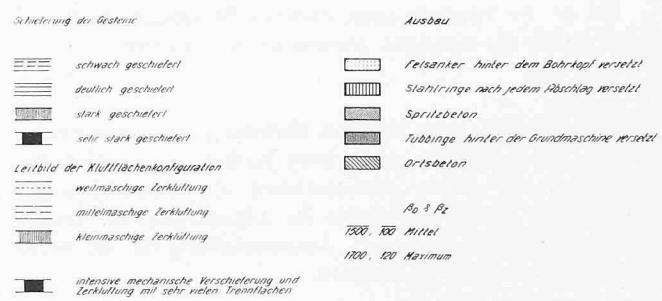


Bild 8. Felsstypen-Längenprofil und Klassifikations-Längenprofil eines Tunneltrasses auf der Grundlage des wahrscheinlichen geologischen Profils, Bohrdurchmesser $D = 4,2$ m

der Durchführung bzw. der Abstand von der Ortsbrust sowie die Art und der Umfang von möglichen Massnahmen für die Gebirgssicherung abhängig vom Bohrdurchmesser und – vorläufig noch ganz entscheidend – von der Konstruktion, d.h. vom Fabrikat der Vortriebsmaschine. Grundsätzlich sind die Möglichkeiten um so weniger beschränkt, je grösser der Bohrdurchmesser ist.

Für die Klassifikation hinsichtlich Verspannbarkeit sowie Ausbauerfordernis (Tabelle 3) sollten drei *Oberklassen* unterschieden werden:

1. Vortriebsmaschine ist und bleibt beim Bohren unbeeinträchtigt verspannbar
2. Vortriebsmaschine ist oder bleibt beim Bohren nicht unbeeinträchtigt verspannbar
3. Vortrieb durch nicht bohrbare Störungszonen



Diese drei Oberklassen sind in *Unterklassen* zu gliedern. Diese sind definiert durch die Art, das Ausmass und den Ort bzw. den Zeitpunkt des Einbringens des ersten Ausbaues beim Vortrieb des Tunnels. Für die 1. und 2. Oberklasse werden diejenigen Verfahren, die unter Voraussetzung einer zweckmässig konzipierten und mit Ausbauhilfen ausgerüsteten Vortriebsmaschine beim Vortrieb zu keinen oder ungefähr zu gleich langen nicht systembedingten Stillstän-

Tabelle 3. Gebirgsklassifikation hinsichtlich Ausbauerfordernis

Kl. Beim Vortrieb zu treffende Massnahmen	
1 Vortriebsmaschine ist und bleibt beim Bohren unbeeinträchtigt verspannbar	2 Vortriebsmaschine ist oder bleibt beim Bohren nicht unbeeinträchtigt verspannbar
1.1 Es ist keine Gebirgssicherung notwendig oder der Umfang der Massnahmen ist kleiner als wie für die Zuweisung in die Klassen 1.2 bis 1.7 erforderlich wäre	Zu Beginn oder während des Bohrens sind zusätzlich zur Gebirgssicherung besondere Massnahmen zu treffen, um die für die Erzeugung von Vorschubkraft notwendige Verspannung oder Abstützung der Vortriebsmaschine im Gebirge zu ermöglichen, z. B.: <ul style="list-style-type: none"> - Spritzbetonauftrag auf herausgebrochene Stöße, oder Hinterpacken der Verspannplatten mit Holz für die Sicherstellung der Maschinenverspannung, oder in Ausnahmefällen - Verstärken der Längsversteifung des Stahlausbaues für die wenigstens beschränkte Abstützung der Vortriebsmaschine mittels der rückwärtigen Stirnflächen der Verspannplatten
1.2 Unmittelbar hinter dem Bohrkopf, auf eine zusammenhängende Tunnellänge von mindestens 5 m, systematisches Versetzen von entweder: <ul style="list-style-type: none"> - Felsankern im Scheitelbereich, evtl. gleichzeitig mit Blechringsegmenten und Maschendraht oder Verzugsplatten, evtl. auch gleichzeitig mit Felsankern am verbleibenden Profilumfang, hinter der Grundmaschine, oder - Linerplates, Typ ..., vollständig verschraubt, oder - Stahlringen, Profil ... (leicht), mit Verbolzung und Verzugsplatten im Scheitelbereich oder am ganzen Profilumfang, Ringabstand ... (grösser als Verspannplattenbreite) 	2.1 Es ist keine Gebirgssicherung notwendig oder der Umfang der Massnahmen ist kleiner als wie für eine Zuweisung in die Klassen 2.2 bis 2.7 erforderlich wäre
1.3 Unmittelbar im Anschluss an die hinteren Verspannplatten der Grundmaschine, grundsätzlich auf grössere Tunnellänge, Versetzen von: <ul style="list-style-type: none"> - Tübbings, Typ ..., gemäss Plan ... 	2.2 Formulierung wie 1.2
1.4 Unmittelbar hinter dem Bohrkopf, auf eine zusammenhängende Tunnellänge von mindestens 5 m, systematisches Versetzen von: <ul style="list-style-type: none"> - Stahlringen, Profil ... (schwer), mit Verbolzung und Verzugsplatten im Scheitelbereich oder am ganzen Profilumfang, Ringabstand ... (grösser als Verspannplattenbreite) 	2.3 1.3
1.5 Entweder unmittelbar hinter dem Bohrkopf, auf eine Tunnellänge von mindestens 5 m, systematisches Auftragen von: <ul style="list-style-type: none"> - Spritzbeton oder Gunit im Scheitelbereich, evtl. auch gleichzeitig mit Spritzbeton oder Gunit am verbleibenden Profilumfang, hinter der Vortriebsmaschine Oder hinter der Vortriebsmaschine, auf eine Tunnellänge von mindestens 5 m, systematisches Auftragen von: <ul style="list-style-type: none"> - Spritzbeton oder Gunit am ganzen Profilumfang 	2.4 1.4
1.6 Unmittelbar hinter dem Bohrkopf, im Abstand grösser als die Verspannplattenbreite, sowie unmittelbar im Anschluss an die hinteren Verspannplatten der Grundmaschine, zwischen die bereits montierten, auf eine Tunnellänge von mindestens 5 m, systematisches Versetzen von: <ul style="list-style-type: none"> - Stahlringen, Profil ... (leicht), mit Verbolzung und Verzugsplatten im Scheitelbereich oder am ganzen Profilumfang 	2.5 1.5
1.7 Wie 1.6, aber Stahlringe, Profil ... (schwer)	2.6 1.6
	2.7 1.7
	3 Vortrieb durch nicht bohrbare Störungszonen
	Stillsetzen des Bohrvortriebes. Lokales Zurückziehen der Vortriebsmaschine. Umstellen des Vortriebssystems und Umorganisieren des Betriebes. Konventioneller Vortrieb mit beschränkter Verwendung der Vortriebsmaschine und Einbringen von vorläufigem Ausbau während des Vortriebes und unmittelbar im Bereich der Ortsbrust. Ausbruchquerschnitt festgelegt im Hinblick auf das nachfolgende Vorziehen der Vortriebsmaschine
	3.1 Systematisches Versetzen von Felsankern, evtl. gleichzeitig mit Blechringsegmenten und Maschendraht oder Verzugsplatten sowie Auftragen von Spritzbeton oder Gunit
	3.2 Wie 3.1, aber zusätzliches Verbauen der Ortsbrust mit den gleichen Mitteln
	3.3 Versetzen von Stahlringen, Profil ..., mit Verbolzung und Verzugsplatten oder -blechen
	3.4 Wie 3.2, aber zusätzliches Verbauen der Ortsbrust mit Felsankern sowie gegebenenfalls mit Spritzbeton oder Gunit

den führen, in der gleichen Unterklasse zusammengefasst. Die 3. Oberklasse ist begründet durch die Tatsache, dass mit keiner – selbst mit allen Ausbauhilfen ausgerüsteten Vortriebsmaschine und auch bei grossem Bohrdurchmesser – jede Störungszone durchbohrt werden kann. Dem Einsatz einer Vortriebsmaschine können Grenzen gesetzt sein, wenn:

- durch keine Massnahme, wie Spritzbetonauftrag auf die herausgebrochenen Stöße oder Hinterpacken mit Holz der Verspannplatten, die Maschine für das Bohren ausreichend verspannt werden kann,
- die Vortriebsmaschine sich auch nicht über die rückwärtigen Stirnflächen ihrer Verspannplatten auf stark verbolzten Ausbau abstützen lässt, um wenigstens mit verminderter Vorschubkraft bohren zu können,
- die Vortriebsmaschine unter ihrem eigenen Gewicht im Gebirge absackt,
- das Gebirge extrem inhomogen ist, und zum Beispiel aus in Lehm eingelagerten Festgesteinblöcken aufgebaut ist, oder wenn
- die Standzeit des Gebirges kleiner ist als die Zeit zum Bohren der Strecke entsprechend dem Abstand zwischen der Ortsbrust und dem Bohrkopfträger, der zuvorderst gelegenen Stelle für das Einbringen von vorläufigem Ausbau.

Wenn immer sich solche Voraussetzungen einzustellen beginnen, soll der Bohrvortrieb mutig vorübergehend stillgesetzt und durch das konventionelle Verfahren abgelöst werden.

Die gelegentlich empfohlene Verwendung von *Schild-Vortriebsmaschinen* wird hier bewusst nicht behandelt, ebenso wenig Sonderkonstruktionen von Vortriebsmaschinen wie der *mehrteilige Bohrkopfschild* und der *gegliederte Schild*. Die laufende Entwicklung bei der Konstruktion von Vortriebsmaschinen und die Phantasie der Unternehmer können durchaus bedingen, dass die dargestellte Gliederung in Unterklassen angepasst oder dass neue Unterklassen definiert werden sollten. Ein entsprechendes Erfordernis lässt sich bei der Abgabe von Angeboten für ein Bauvorhaben erkennen und im Verlaufe der Vergebungsverhandlungen berücksichtigen.

2.5 Praktische Anwendung des Vorschlages und Zusammenfassung

Die *praktische Anwendung der Dreierklassifikation* ist auf Bild 8, unten, dargestellt. Diese Darstellung fasst zugleich den Vorschlag für eine Gebirgsklassifikation für den mechanischen Vortrieb zusammen. Es stellen dar:

Zeile a mutmassliche örtliche Verteilung der Stabilitätsfälle,

Zeile b mutmassliche örtliche Verteilung der Ausbauten bzw. die Gebirgsklassen hinsichtlich Ausbau; zur Vereinfachung sind die 1. und die 2. Oberklasse zusammengefasst,

Zeile c Gebirgsklassen hinsichtlich Basisbohrbarkeit,

Zeile d Gebirgsklassen hinsichtlich Bohrwerkzeugverschleiss,

Zeile e allfälliges Abschalen oder Bergschlag, Phänomene, die durch die felsmechanische Berechnung ebensowenig erfasst werden können wie singulärer Steinfall.

Die Klassifikation des Gebirges hinsichtlich Bohrbarkeit und Bohrwerkzeugverschleiss erfolgt durch Indexwerte und nicht durch direkte Angaben, wie zum Beispiel die ohnehin bohrsystembezogene Penetration oder maximale Abrolldistanz einer Meisselschneide. Diese Angaben berücksichtigen auch die bei den Gesteinsprüfungen und -untersuchungen festgestellten Streuungen. Die Klassifikation hinsichtlich Ausbauerfordernis erfolgt durch direkte Angaben über Art, Ausmass und Ort bzw. Zeitpunkt des Einbringens des Ausbaues. Falls das klassierte geologische Prognoselängenprofil auf «sicherem Wissen» beruht und auch das Felstypenlängenprofil nicht in Frage steht, genügt eine einzige Darstellung des Ausbauerfordernisses. Falls aber die geologische Beurteilung durch ein «wahrscheinliches» und ein «mögliches» Prognoselängenprofil zum Ausdruck kommt und auch die Angaben des Felstypenlängenprofils unsicher sind, bedarf es zwei Darstellungen für das Ausbauerfordernis. Die Kenntnis dieser *Streuungen* ist von grosser Bedeutung, falls das Klassifikationslängenprofil auch als den Arbeitsumfang und die Arbeitsbedingungen darstellendes Dokument für die Ausschreibung der Bauarbeiten Verwendung finden soll. Bei der Bauausführung kann sich eine Verschiebung der Grenzen der Klassenbereiche ergeben. Diese Möglichkeit muss durch

die Formulierung der Ausschreibungsunterlagen berücksichtigt werden. Es soll nach tatsächlicher Verteilung und Länge der Bereiche abgerechnet werden.

Der dargestellte Vorschlag für eine Gebirgsklassifikation für den mechanischen Vortrieb mit *Vollvortriebsmaschinen im Festgestein* umfasst ein Dreiersystem, nämlich eine Klassifikation hinsichtlich

- Bohrbarkeit
- Bohrwerkzeugverschleiss und
- Verspannbarkeit der Vortriebsmaschine sowie Ausbau erfordernis

Der Vorschlag trägt den Eigenheiten des mechanischen Vortriebes Rechnung. Seine Verwirklichung fördert den Realismus der Projektierung und die Fairness der Beziehungen zwischen Bauherr und Unternehmer bei der Ausschreibung und Ausführung von Tunnelbauten mit Vortriebsmaschinen.

Literatur

- [1] J. Schimazek und H. Knatz: Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meisselverschleiss von Streckenvortriebsmaschinen. «Glückauf» 106 (1970), Nr. 6, S. 274-278.
- [2] J. J. K. Daemen, C. Fairhurst und A. M. Starfield: Rational Design of Tunnel Supports. Paper presented at the 2. Symposium on Rapid Excavation, Sacramento, California, October 16/17, 1969.
- [3] G. Lombardi: Der Einfluss von Felseigenschaften auf die Stabilität von Hohlräumen. «Schweiz. Bauzeitung» 87 (1969), H. 3, S. 39-47.
- [4] Berechnungen durchgeführt im Rahmen der Projektierung für den Gotthard-Basistunnel vom Ingenieurbüro Dr. G. Lombardi, Locarno (unveröffentlicht).
- [5] G. Lombardi: Zur Bemessung der Tunnelauskleidung mit Berücksichtigung des Bauvorganges. «Schweiz. Bauzeitung» 89 (1971), H. 32, S. 793-801.

Adresse des Verfassers: Werner Rutschmann, dipl. Ing. ETH, SIA, Waldistrasse 34, 8134 Adliswil.

Grundsätzliche Einflüsse des Grundwassers auf den Boden

Von Prof. H. J. Lang, Zürich¹⁾

DK 624.131.6

1. Einleitung

Im folgenden wird versucht, die allerschwerwichtigsten und grundsätzlichen Gesichtspunkte der Beeinflussung des Bodens (und damit auch der Bauwerke im Boden) durch das Grundwasser zusammen zu fassen. Dabei handelt es sich «nur» um an sich unkomplizierte und vereinfachte Gedanken-Modelle. Wenn man diese jedoch konsequent anwendet, können alle Wechselwirkungen zutreffend überblickt werden, die sich zwischen dem in Wahrheit heterogenen und anisotropen Baugrund und dem Grundwasser ergeben können.

2. Grundwasser und Gradient einer Sickerströmung

In Bild 1 ist ein horizontal geschichteter Baugrund schematisch dargestellt. In der obersten Schicht (Kiessand) befindet sich ein freier horizontaler Grundwasserspiegel. Eine umspundete Bau-

grube wurde erstellt; unter der Baugrubensohle befindet sich innerhalb der Spundwände eine Dichtungszone. Sowohl die Dichtungszone als auch die Spundwände seien absolut dicht, d.h. der Wasserandrang in die Baugrube ist $Q = 0$. Unter diesen Randbedingungen wird sich der Wasserspiegel in dem Piezometer I (Standrohr), mit welchem der Druck im Punkt A gemessen wird, auf der Höhe des in der Baugrube abgesenkten Wasserspiegels einstellen, während die Piezometer II und III in den Punkten B und C einen Wasserspiegel auf der Höhe des freien Grundwasserspiegels im Kiessand anzeigen.

Das Wasser rings um die Baugrube herum und im Innern der Umspundung unterhalb der Baugrubensohle ist hydrostatisch gespannt und in den Poren des Bodens beweglich. Es handelt sich um «Grundwasser» im Sinne der heutigen Ausführungen.

Unter dem Kiessand folgt eine Ton schicht, welche ihrerseits von einer Sand schicht unterlagert wird. Die Piezometer IV und V in den Punkten D und E an

OK. Sandschicht zeigen ein horizontales Druckniveau, welches um das Mass h_1 über dem freien Grundwasserspiegel liegt. Das Grundwasser im Sand ist artesisch gespannt.

Die Lage des Wasserspiegels in den Piezometern I bis V zeigt das Potential des Grundwassers in den Punkten A bis E an: Bezüglich des beliebig gewählten Horizontes hat es bei den hier gegebenen Randbedingungen im Punkt A die Grösse H_3 , in den Punkten B und C die identische Grösse $H_2 > H_3$ und in den Punkten D und E die identische Grösse $H_1 > H_2$.

Zwischen dem Punkt D und dem vertikal darüber liegenden Punkt C herrscht somit eine Potentialdifferenz $h_1 = H_1 - H_2$. Infolge dieser Potentialdifferenz stellt sich eine nach oben gerichtete Sickerströmung durch die Ton schicht der Stärke d ein, wobei hier die Gerade \overline{DC} eine Stromlinie ist. Zwischen den Punkten B und A besteht ebenfalls eine Potentialdifferenz der Grösse $h_2 = H_2 - H_3$. Eine Sickerströmung stellt sich hier nur deshalb nicht ein, weil voraus-

¹⁾ Vortrag, gehalten am 2. November 1973 in Lausanne vor der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik.