Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 69 (1951)

Heft: 7

Artikel: Die Deutung des echten Gebirgsdruckes mit Hilfe der Theorie der plastischen Zonen

Autor: Kastner, Hermann

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-58807

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: 14.12.2025

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

69. Jahrgang Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet
Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich Nummer 7

Die Deutung des echten Gebirgsdruckes mit Hilfe der Theorie der plastischen Zonen

Von Dr. Ing. HERMANN KASTNER, Innsbruck

DK 624.191.1

Die Erfahrungen über den echten Gebirgsdruck, die zuerst beim Bau der grossen Alpendurchstiche gewonnen und später fortlaufend erweitert wurden, haben bisher zu keiner einheitlichen, einem allgemeinen Gesichtspunkt untergeordneten Deutung seiner vielfältigen Erscheinungen geführt; Verschiedenheiten in den Anschauungen und ungelöste Probleme sind bis heute geblieben. Aber die Beobachtungen und Auffassungen der Geologen und Tunnelbauer aus der Zeit der Alpenbahnen enthalten soviel intuitiv richtige Erkenntnisse, dass sie zur Bildung einer zusammenfassenden Erklärung des echten Gebirgsdruckes nicht zu entbehren sind. Gleichzeitig mit dem Ausbau dieser Erfahrungen ist es notwendig, zu erweiterten Erkenntnissen über die Festigkeitseigenschaften des Gebirges (Technologie des Gebirges[1])) zu gelangen und dadurch die Voraussetzungen zu verbessern, die notwendig sind, um sein Verhalten bei der Herstellung von baulichen Hohlräumen nicht bloss zu deuten, sondern innerhalb gewisser Grenzen auch vorauszusagen und den Hohlraumbau statisch richtig zu formen und zu bemessen.

Die nachfolgenden Darlegungen befassen sich mit der Erklärung von einigen wesentlichen Erscheinungen des echten Gebirgsdruckes und wollen damit einen Beitrag zu einer einheitlich aufgebauten Deutung leisten. Dabei spielen die von der Plastizitätstheorie umfassten Vorgänge eine wichtige Rolle. Einer späteren Arbeit soll es vorbehalten bleiben, die daraus sich ergebenden Möglichkeiten für die Formgebung und Dimensionierung des Tunnel- oder Stollenausbaues zu behandeln.

1. Das Wesen des echten Gebirgsdruckes

Für das Verständnis der Erscheinungen des echten Gebirgsdruckes ist es vor allem wichtig, sich von der Anwendung der aus der Erddrucklehre übernommenen Auffassungen des Auflockerungsdruckes von Lockermassen freizumachen. Wenn man beispielsweise versucht, mit einer derart hergeleiteten, irgendwie geformten Belastungsfigur[2]) für die auf den Tunnelausbau wirkenden Kräfte den echten Gebirgsdruck zu deuten, so werden dabei weder zutreffende Ergebnisse noch neue Erkenntnisse zu erwarten sein. Der echte Gebirgsdruck muss seinem Wesen nach einem tektonischen Vorgang gleichgehalten werden; er wird durch den Tunnelausbruch ausgelöst und erfasst gewisse Gebirgsbereiche in der Umgebung des Ausbruchshohlraumes, die einer Durchbewegung unterworfen werden. Wenn das Gebirge vor der Durchörterung im elastischen Zustand war, d. h. wenn der lotrechte Druck der Ueberlagerung die dreiaxige Druckfestigkeit des Gebirges nicht erreichte, so können trotzdem durch die Aenderung des Spannungszustandes in der Umgebung des Tunnels oder Stollens plastische Zonen entstehen, in denen eine Bewegung gegen den Ausbruchshohlraum hin eintritt; dieser Fall bildet für den echten Gebirgsdruck beim Bau tiefliegender Tunnel die Regel. Wenn sich aber das ungestörte Gebirge im latent plastischen Zustand befand, d. h. wenn der lotrechte Druck der Ueberlagerung die dreiaxige Druckfestigkeit des Gebirges überstieg, dann drängen nach der Durchörterung weitausholende, aus dem Gleichgewicht kommende Bereiche des Gebirges gegen den künstlich geschaffenen Hohlraum hin und trachten ihn zu schliessen[3]). In beiden Fällen liegt sonach die Möglichkeit oder Tatsache aktiven plastischen Fliessens gegen den Hohlraum hin vor. Es handelt sich also primär um Bewegungen und nicht um Kräfte; Kräfte treten erst dann in Erscheinung, wenn man die Bewegungen zu hemmen sucht. Mit dem Eintritt der Durchbewegung des Gesteins ist die Tragfähigkeit des Gebirges in seiner Gesamtheit, von etwa auftretenden örtlichen Auflockerungsdruckerscheinungen[4]) abgesehen, bei primär elastischem Zustand nicht überschritten, wohl aber gelangen die plastizierten Teile in labiles Gleichgewicht. Solange die plastischen Vorgänge nicht zu grosse Ausdehnung gewinnen, können weiter abgelegene, im elastischen Zustand bleibende Teile des Gebirges zur Mitwirkung herangezogen werden, ein Verhalten, das als Schutzhüllenbildung gedeutet wird[5]).

Die Aufgabe des Tunnel- oder Stollenausbaues hat bei echtem Gebirgsdruck darin zu bestehen, eine Fliessbewegung zu verhindern oder aber zu hemmen, sofern sie bereits im Gange ist. Die Kräfte, die dazu nötig sind, bestimmen die Stärke des dauernden Ausbaues. Der zeitweilige Ausbau wird das Eintreten der Fliessbewegung in der Regel nicht ganz zu verhüten vermögen.

Die dargelegten grundsätzlichen Gesichtspunkte sind für eine zutreffende Deutung des echten Gebirgsdruckes und für die Beurteilung der zur Bemessung des Ausbaues anzunehmenden Belastung von entscheidender Bedeutung. Wenn beispielsweise versucht wurde, aus den Abmessungen von Teilen der Zimmerung und von kalibrierten Probehölzern, die zu Bruch gegangen sind, auf die Grösse des Gebirgsdruckes zu schliessen[6]), so konnte das Ergebnis nur besagen, dass der aufgetretene Druck die Bruchlast der Holzteile überschritten hat. Nicht im statischen, sondern in dem oben dargelegten dynamischen Sinne muss es daher aufgefasst werden, wenn weiterhin von echtem Gebirgsdruck die Rede ist. Die Bewegung der Bergmassen ist meist sehr langsam und wahrscheinlich vielfach sprunghaft unstetig[7]); sie wird unter gewissen Umständen plötzlich ausgelöst, wie dies bei den Bergschlägen der Fall ist.

In formaler Hinsicht kann für den echten Gebirgsdruck das Kriterium gelten, dass unter der Wirkung des Gewichtes der Ueberlagerung oder unter Umständen auch von tektonischen Kräften in der Umgebung des Ausbruchhohlraumes Bereiche entstehen, in denen die Druckspannungen die — mit Ausnahme des Ausbruchrandes — dreiaxige Druckfestigkeit des Gebirges voll in Anspruch nehmen. In diesen plastischen Zonen kann entweder bruchlose innere Gleitung oder aber Zerstörung des Gesteinsverbandes eintreten.

2. Das Ueberwiegen des Ulmendruckes

Das häufige Ueberwiegen des echten Gebirgsdruckes an den Ulmen eines Stollens oder Tunnels für den Fall, dass sich das ungestörte Gebirge im elastischen Zustand befand, ist eine bekannte Erfahrungstatsache[8 9]). Die ersten Anzeichen auftretenden Druckes sind dann schon beim Richtstollenvortrieb das Hereinschieben der Steher gegen den Ausbruchshohlraum und später deren Bruch, ohne dass dabei die Kappen einen lotrechten Druck zu erfahren brauchen. Für diese Erscheinung sind verschiedene Erklärungen gegeben worden.

Die Heimsche Auffassung von der latenten Plastizität[10]) konnte keine zutreffende Deutung bringen, weil sie von der Voraussetzung ausging, dass das ungestörte Gebirge sich unter allseitig gleichem Druck befindet. Für einen derartigen Belastungszustand verwendet man häufig die Bezeichnungsweise «hydrostatischer Druck», die als irreführend vermieden werden sollte.

Brandau[11]) nimmt ein Abgleiten des Gebirges gegen den Tunnel- oder Stollenhohlraum hin an und kommt damit dem tatsächlichen Vorgang sehr nahe. Seine Anschauung ist aber noch stark an die Auffassungen der klassischen Erddrucklehre gebunden.

Ferner hat man versucht, das Ueberwiegen des Ulmendruckes aus der Spannungsverteilung im durchörterten Ge-

1) L. Müller: Technologie der Erdkruste. «Geologie und Bauwesen.» Jg. 17, H. 4, 1949; Springer-Verlag Wien.

2) O. Kommerell: Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk, 2. Aufl., Berlin 1940.

3) Mit dieser Erkenntnis wird die geniale Lehre Heims ins richtige Licht gerückt.

4) J. Stini: Tunnelbaugeologie. Springer-Verlag, Wien 1950, S. 132.

5) E. Wiesmann: Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit. «Schweizerische Bauzeitung», Bd. 53, 1909, und: Ueber Gebirgsdruck, «Schweizerische Bauzeitung», Bd. 60, 1912.

6) A. Bierbaumer: Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerkes, Leipzig 1913, W. Engelmann. S. 25—28.

7) L. Rabcewicz: Gebirgsdruck und Tunnelbau. Springer-Verlag, Wien 1944, S. 47.

8) C. Andreae: Der Bau langer tiefliegender Tunnel. Berlin 1926, S. 55.

9) L. Rabcewicz: a. a. O. S. 35, 36, 46, 47, 56, 57, 58 und 68.

10) A. Heim: Mechanismus der Gebirgsbildung. Basel 1878.

11) K. Brandau: Das Problem des Baues langer, tiefliegender Alpentunnel und die Erfahrungen beim Bau des Simplontunnels; «Schweizerische Bauzeitung» 1909, I. und II.

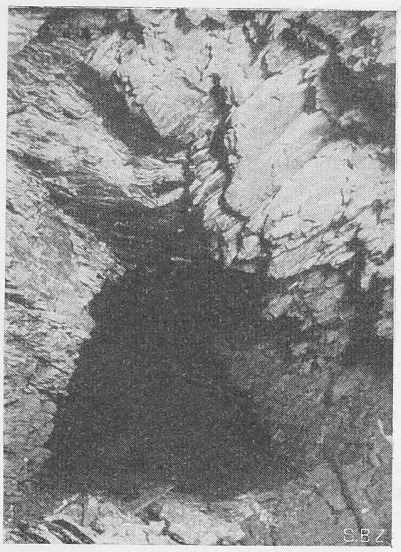

Bild 1. Durchbewegung des Kalkschiefers im Stollen II des Simplontunnels, Km. 7,7 ab Südportal (nach *Andreae*)

birge, die unter der Voraussetzung elastischen Verhaltens ermittelt wurde, bzw. aus seinem elastischen Arbeitsvermögen zu deuten [12]). Das Ansteigen der Tangentialspannungen an den Ulmen des Ausbruchhohlraumes gibt zu Querdehnungen Anlass, die als Ursache des überwiegenden oder allein auftretenden Ulmendruckes anzusehen wären. Die Beobachtung des unter echtem Gebirgsdruck stehenden Gesteins führt aber zweifellos zu dem Ergebnis, dass es sich nicht um elastische, sondern um plastische Vorgänge handelt. Als Beweis hiefür wird auf Bild 1 verwiesen. Solange die Verformungen des durchörterten Gebirges im elastischen Bereich verbleiben, kommt es ja überhaupt nicht zu echtem Gebirgsdruck, das Gebirge verhält sich vielmehr standfest. Elastische Querdrehungen, die wohl besonders an den Ulmen auftreten, entwickeln sich mit einiger Nachwirkung bald nach den Ausbrucharbeiten und sind zur Zeit der Herstellung der Mauerung, sofern eine solche überhaupt nötig ist, zum grössten Teil abgeklungen. Anders liegen jedoch die Dinge, wenn das Gebirge nicht standfest bleibt, d. h. wenn seine mehraxige Druckfestigkeit in der Umgebung des Ausbruchhohlraumes erreicht wird. Sobald man sich über die Begrenzung der Bereiche, für die dies gilt, also der plastischen Zonen, ein Bild macht, wird sofort klar, warum in vielen Fällen der Druck an den Ulmen entweder allein auftreten oder überwiegen muss. Die Form der plastischen Zonen ist entscheidend von der Seitendruckziffer λ, dem Verhältnis der waagrechten zur lotrechten Pressung im ungestörten Gebirge, abhängig.

An einem Beispiel, das auch für manche spätere Erwägung wichtig ist, wird gezeigt, wie sich die plastischen Zonen bei kreisförmigem Tunnelquerschnitt mit wachsendem lotrechtem Ueberlagerungsdruck entwickeln. Das Problem wird als ebenes behandelt. Dem Beispiel liegen folgende Annahmen zu Grunde: Die Scherfestigkeit des Gebirges (in der Bodenmechanik Kohäsion genannt) sei $\tau_s = 25$ kg/cm², der Winkel des inneren Gleitwiderstandes $\varrho = 30^0$, die Seitendruckziffer $\lambda = 0{,}2$. Die Begrenzung der plastischen Zonen wurde für die lotrechten Ueberlagerungspressungen $p_v = 75$, 100, 125 und 150 kg/cm² ermittelt (Bild 2).

Die überaus charakteristischen Formen der plastischen Zonen, wie sie Bild 2 zeigt, wurden erstmals von Leon experimentell festgestellt [13]). Die rechnungsmässige Bestimmung ihrer Grenzen ist mit den derzeit zur Verfügung stehenden theoretischen Hilfsmitteln nur näherungsweise möglich [14]). In diesen plastischen Zonen bilden sich zwei Scharen von Gleitflächen, die eine resultierende Gebirgsbewegung hauptsächlich gegen die Ulmen hin zur Folge haben.

Das auch bei wechselnder Schieferung, Schichtung oder Klüftung des Gesteins so überaus häufige Vorherrschen des Ulmendruckes ist ein Beweis dafür, dass die Inhomogenitäten des Gebirges, wenn sie nicht sehr stark ausgeprägt sind, die allgemeine Form der plastischen Zonen nicht wesentlich beeinflussen.

3. Die Verteilung des Ulmendruckes

Für die Erfahrungstatsache, dass im Richtstollen die Steher bei Ulmendruck mit auffallender Häufigkeit im unteren Teil und nicht in der Mitte brechen, ist anscheinend noch

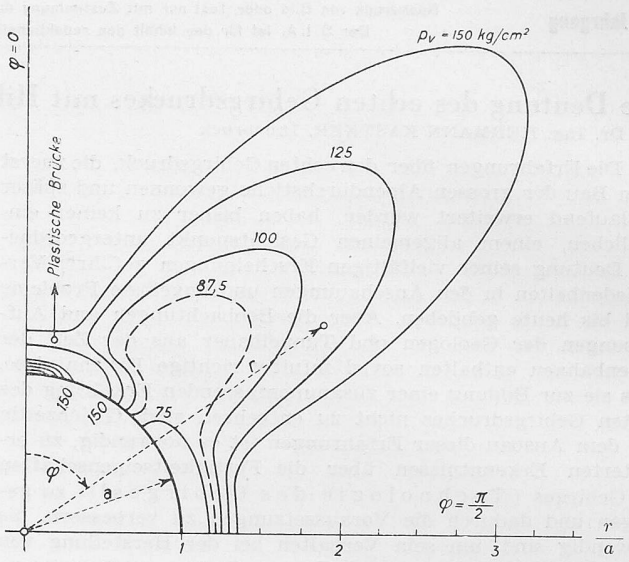

Bild 2. Die Form der plastischen Zonen bei einem kreisschnittigen Tunnelausbruch, in Abhängigkeit von der Ueberlagerungshöhe

keine Erklärung gegeben worden. Die plastischen Zonen gemäss Bild 2 sind symmetrisch zur waagrechten Querschnittaxe des kreisschnittig angenommenen Tunnelausbruches und daher zur Deutung der ungleichmässigen Verteilung des Ulmendruckes ebenfalls ungeeignet, so lange man das Eigengewicht des Gebirges vernachlässigt. Eine Berechnung der Begrenzung der plastischen Zonen unter Berücksichtigung der Massenkräfte würde sich sehr umständlich gestalten, weshalb deren Einfluss nur näherungsweise beurteilt werden kann.

Entsprechend der Form der plastischen Zonen kann man sich den resultierenden Ulmendruck auf den Ausbau eines kreisschnittigen Tunnels aus zwei Einzelkräften P_0 und P_u zusammengesetzt denken, die jeweils im Halbierungspunkt M_0 und M_u jenes oberen und unteren Teiles des an den Ulmen gelegenen Ausbruchsrandes angreifen, wo die plastischen Zonen eine freie Oberfläche gewinnen. Im Sinne von Bild 2 haben die unteren Zungen infolge des in ihrem Bereich herrschenden grösseren Druckes des überlagernden Gebirges ein etwas grösseres Ausmass als die oberen, aber dieser Umstand allein würde zur Erklärung des tiefliegenden Angriffspunktes des resultierenden Ulmendruckes nicht hinreichen, umsomehr als der Unterschied mit wechselnder Ueberlagerungshöhe abnimmt.

Hingegen kommt dem Gewicht der in Bewegung geratenden Gebirgsmassen G_0 und G_u eine zu beachtende Bedeutung zu. Es fördert eine Gleitbewegung in den oberen Zonen und hemmt eine solche in den unteren und würde daher im Gegensatz zur tatsächlichen Erscheinung eine Verlagerung des Angriffspunktes des resultierenden Ulmendruckes nach aufwärts bedingen. Aber die Beeinflussung der Kraftgrössen P_0 und P_u ist weniger ausschlaggebend als die der Richtungen; die Zusammensetzung der Kräfte (Bild 3) führt denn auch zu einem resultierenden Ulmendruck R, der beträchtlich unter der waagrechten Axe des Querschnittes liegt. Eine ähn-

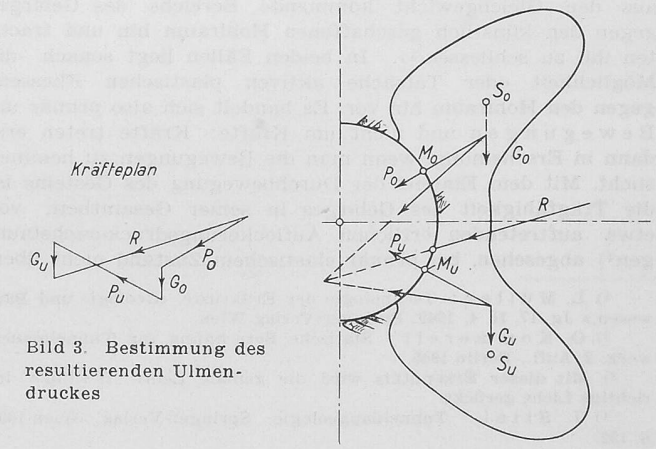

Bild 3. Bestimmung des resultierenden Ulmendruckes

[12]) E. Willmann: Ueber einige Gebirgsdruckerscheinungen in ihren Beziehungen zum Tunnelbau. Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, Leipzig 1911, S. 28.

[13]) A. Leon und F. Willheim: Ueber die Zerstörungen in tunnelartig gelochten Gesteinen. Wien 1910.

[14]) H. Kastner: Ueber den echten Gebirgsdruck beim Bau tiefliegender Tunnel. «Oesterreichische Bauzeitschrift», Jg. 4, H. 10/11, 1949.

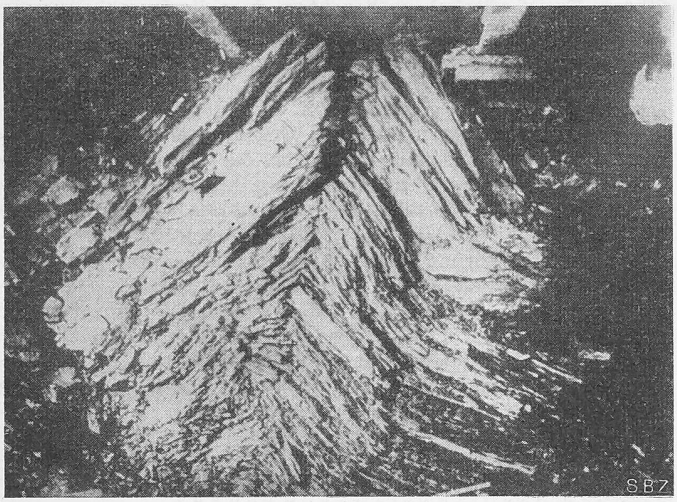

Bild 4. Stauchung der Sohle im Simplontunnel, Km. 6,74 ab Südportal (nach *Andreae*)

liche Ueberlegung hinsichtlich der Druckverteilung bei der Bemessung des dauernden Tunnelausbaues anzustellen, dürfte weder zweckmässig noch nötig sein, weil der bei Auftreten von echtem Gebirgsdruck stets zu fordernde, ringsum gleich gute Kontakt zwischen dem meist ringförmig geschlossenen Tunnelmauerwerk und dem Gebirge infolge der statisch unbestimmten Wechselwirkung beider zu einem weitgehenden Kräfteausgleich führen wird [15]). Beim Richtstollenvortrieb hingegen bilden die Steher statisch bestimmt gelagerte Bauteile, in denen sich die Verteilung des Ulmendruckes durch die Art des Bruches unmittelbar und unbeeinflusst äussert.

4. Der First- und Sohlendruck

Die auf dem Ausbau ruhende unmittelbare Auflast im First, die sich infolge des Mangels an Kohäsion oder der Zerstörung des Gesteinsverbandes durch die Ausbruchsarbeiten und infolge der Durchbewegung als Nebenerscheinung des echten Gebirgsdruckes ergibt, soll ausser Betracht bleiben; hierüber liegen klare Auffassungen vor. Desgleichen soll der Schwelldruck infolge kapillarer Wasseransaugung toniger Gesteine oder infolge chemischer Vorgänge nicht behandelt werden. Beim echten Gebirgsdruck werden Druckerscheinungen in First und Sohle, die auf die gleichen Ursachen zurückzuführen sind wie der Ulmendruck, zu erwarten sein, wenn die dann einteilige plastische Zone den Ausbruchsquerschnitt ringförmig umschliesst [16]). Voraussetzung für stärkere Bewegungen ist dabei überdies, dass der innere Gleitwiderstand des Gebirges so klein ist, dass die plastische Zone eine ausreichende Mächtigkeit gewinnt. Diese Bedingungen treffen bei Tongesteinen oder Gesteinen mit toniger Klüftefüllung zu.

Eine häufige, aber etwas anders geartete Form des First- und Sohlendruckes ist von Prof. Andreae als Stauchung erkannt worden [17]). Als Beleg dafür wird auf Bild 4 verwiesen, wo die Stauchung der unter der Sohle liegenden Gebirgsteile unverkennbar in Erscheinung tritt. In ähnlicher Weise kann man dies auch aus Bild 1 für den Firstbereich feststellen.

Auch aus den bekannten, im Simplontunnel aufgenommenen Zeichnungen Brandaus lassen sich die gleichen Schlussfolgerungen ziehen [18]). Die dort ersichtlichen, in der Sohle aufgetretenen Risse sind keine Zugrisse, wie sie aus den elastischen Spannungen zu erklären wären.

Um die Stauchungserscheinungen zu deuten, wird auf Bild 2 hingewiesen. Dort zeigt sich, dass die zungenförmigen plastischen Zonen bei geringerem Ueberlagerungsdruck p_v nur an den Ulmen zusammenhängen; bei Anwachsen des Ueberlagerungsdruckes bilden sich aber etwa ab $p_v = 150$ kg/cm² über dem First und unter der Sohle plastische Brücken aus, die dort Druckwirkungen ermöglichen, womit sich die Stauchungen erklären lassen. Es muss allerdings daran erinnert werden, dass die Begrenzungslinien der plastischen Zonen nur annäherungsweise gelten, weil der wirkliche Spannungszustand im Gebirge nicht erfassbar ist. Im First- und Sohlenbereich sollten bei vollkommener Elastizität des Gebirges für $\lambda < 1/3$ tangentiale Zugspannungen auftreten. Die teilweise Plastizierung des Gebirges hat aber nach der Erfahrung zu urteilen vermutlich eine Verminderung oder Ausschaltung der Zugspannungen zur Folge.

Willmann [19]) hat bekanntlich die Stauchung in der Weise erklärt, dass über dem First und unter der Sohle ein Gebirgskeil von seitlichen Spannungen ausgequetscht wird. Diese Deutung hat infolge ihrer Anschaulichkeit weitgehende Verbreitung gefunden und kommt dem Sachverhalt sehr nahe. Vor allen Dingen führt sie zu schräg von oben und unten gegen den Ausbruchquerschnitt gerichteten Kräften, deren Auftreten in so vielen Fällen charakteristisch ist (siehe Bild 1). Man sollte es aber vermeiden, vom Ausquetschen eines «spannungslosen» oder gar eines «gezogenen» Körpers zu sprechen, besonders wenn man im Auge behält, dass mit der plastischen Verformung des Gebirges ein Spannungswechsel eintritt [20]).

Sofern der ungestörte Zustand des Gebirges latent-plastisch war, erfolgt die Fliessbewegung gegen den Ausbruchhohlraum von allen Seiten. Ausgiebiger First- und Sohlendruck, die sogar den Ulmendruck überwiegen können, sind die Folge.

5. Ueber die Schutzhüllenbildung

Für den elastischen Zustand des ungestörten Gebirges kann die Seitendruckziffer λ aus der Poissonschen Zahl ermittelt werden, die daher für die Beurteilung des echten Gebirgsdruckes massgebend ist. Im plastischen Zustand wird λ, solange nicht alle Hohlräume geschlossen sind, jenem Wert nahekommen, der beim Rankineschen Spannungszustand gilt. Für sprödes Gestein ist λ klein, für mildes jedoch gross. Bei grossem Wert von λ lagert sich die plastische Zone ringförmig um den kreisschnittig angenommenen Tunnelhohlraum [21]). Mit abnehmendem Wert von λ entwickeln sich die zungenförmigen plastischen Zonen, und die Schutzhüllenbildung ist beeinträchtigt, weil der Ring erhöhter elastischer Spannungen unterbrochen bzw. sehr weit bergwärts gedrängt und daher in seiner Wirksamkeit geschwächt wird. Bei sprödem Gebirge ist daher eine Schutzhüllenbildung wenig wahrscheinlich, welches Ergebnis durch eine beim Simplontunnel gemachte auffällige, aber nicht befriedigend geklärte Erfahrung bestätigt werden soll.

Zwischen dem Lebendungneis und den Glimmerschiefer-Phylliten in der Nähe von Km. 7,0 befindet sich ein Schichtenkomplex von Marmor- und Kalkschieferbänken. Die Verfaltung und Verquetschung der drei verschiedenen Formationen angehörenden Gesteine ist gewaltig. Die Gebirgsüberlagerung beträgt 1600 m. Das Verhalten aller Gesteine bei der Bohrung liess auf unbedingte Standfestigkeit schliessen. In Härte und Kompaktheit überwogen die Gneise und Glimmerschiefer die Marmore und Kalke weitaus. Nichts hätte voraussehen lassen, dass bald nach der Auffahrung die Strecke im erstgenannten Gestein eines Holzeinbaues bedürfen und bei der Mauerung die Anwendung der stärkeren Typen mit Sohlengewölbe notwendig machen würde, während die ganze 290 m lange Strecke im Kalk ohne jeden Holzeinbau stand und nur eine Verkleidung mit dem schwächsten Typ erforderte. Es lag die Tatsache vor, dass sich das im ungestörten Zustand mildeste, am wenigsten druckfeste Gestein in der Serie der in Trümmer gebrochenen und in dünne Lamellen ausgezogenen Gesteine allein als standfest erwies. Brandau [22]), dessen Bericht die vorstehende Schilderung entnommen wurde, schliesst mit der Bemerkung, dass man daraus ersehen könne, wie inkosequent der Gebirgsdruck wirken musste, wenn er im milden Kalk gar nicht in Erscheinung trat, wohl aber im allerhärtesten und kompaktesten Gneis. Er fand als einzige Erklärung dafür die Brec-

15) J. Stini: a. a. O. S. 225 ff.

16) H. Kastner: a. a. O.

17) C. Andreae: a. a. O. S. 25. Siehe auch L. Rabcewicz: a. a. O. S. 55.

18) K. Brandau: a. a. O. Siehe auch O. Kommerell: a. a. O. S. 49.

19) E. Willmann: a. a. O. S. 29.

20) Ein ringsum laufender spannungsloser Körper ist bei echtem Gebirgsdruck theoretisch nicht möglich, weil er nicht begrenzt sein kann. Er ist, wie die Deutung Willmanns beweist, auch praktisch nicht vorhanden. Die Plastizitätstheorie schliesst ihn vollends aus.

21) H. Kastner: a. a. O. und: Die Ausbildung und Bemessung gepanzerter Druckschächte. Internationale Fachtagung für Gebirgsdruckfragen im Bergbau und Tunnelbau, Leoben 1950. Urban-Verlag, Wien 1950.

22) K. Brandau: a. a. O. S. 351.

ciennatur der Gesteine und das streckenweise zusammenhanglose Gefüge dieser Breccienmassen.

Wenn man unter Beachtung der aus der Theorie der plastischen Zonen gewonnenen Ergebnisse bedenkt, dass die milden Marmore und Kalksteine eine verhältnismässig hohe Seitendruckziffer besitzen müssen, während sie bei den spröden Gneisen klein ist, scheint sich die Erklärung der von Brandau geschilderten Erscheinung dadurch zu ergeben, dass bei den Marmor- und Kalkschichten eine Schutzhüllenbildung eintrat, beim Gneis und bei den Schiefern jedoch nicht [23]). Diese durch einen selten guten Bericht festgehaltene Erfahrung beweist in Uebereinstimmung mit den theoretischen Ergebnissen, dass eine Schutzhüllenbildung nicht unter allen Umständen einzutreten braucht.

6. Das Nachlassen oder Verschwinden des Gebirgsdruckes

Es kommt manchmal vor, dass die Druckerscheinungen, sofern keine Störung des Gebirges durch Erweiterung des Ausbruches eintritt, im Laufe der Zeit nachlassen, sodass es geradezu den Anschein hat, als ob der Gebirgsdruck verschwunden wäre [24]).

Diese Erscheinung kann verschiedene Ursachen haben. Wenn auf ihre Erklärung eingegangen wird, so möge zunächst daran erinnert werden, dass es sich beim echten Gebirgsdruck grundsätzlich nicht um eine Belastung im statischen Sinne, sondern um eine mögliche Durchbewegung labiler Zonen des Gebirges handelt. Diese langsame, meist unstetige Bewegung tritt, von Auflockerungsnachbrüchen abgesehen, als Druck nicht in Erscheinung, wenn man sie nicht zu hemmen sucht; die Druckwirkung kann also ausbleiben, bzw. man kann beim zeitweiligen Einbau, etwa durch Weglassen der Ulmverpfählung und Nachreissen des Gebirges, die Druckwirkung ausschalten [25]).

In den meisten Fällen wird das Nachlassen der Bewegung auf die Schutzhüllenbildung zurückzuführen sein. Aber auch dann befindet sich, sofern kein Einbau angeordnet wurde, ein Teil des Gebirges in labilem Zustand. Ursachen, die oft nicht zu erkennen sind, können entweder die Erhaltung des labilen Gleichgewichtes bedingen oder den Eintritt einer Bewegung herbeiführen. Anderseits bedarf es bloss verhältnismässig geringer Kräfte, um das Gebirge zu stabilisieren, und nur deshalb ist die Bewältigung des echten Gebirgsdruckes mit erträglichen Mauerungsstärken überhaupt möglich. Wenn es infolge ausgedehnter plastischer Zungen nicht zur Schutzhüllenbildung kommt, liegen die Verhältnisse grundsätzlich wohl ähnlich, nur ist das Ausmass und die Form der plastischen Zonen und damit der labilen Gebirgsmassen ungünstiger; es werden daher grössere Kräfte zur Stabilisierung des Gebirges nötig sein.

Für das Nachlassen des Gebirgsdruckes, d. h. der Durchbewegung kann ferner manchmal eine Verfestigung des Gebirges in Betracht kommen. Die Berechnung der Begrenzung der plastischen Zonen muss eine möglichst einfache Form des Spannungs-Dehnungsdiagrammes voraussetzen und bedient sich der Annahme, dass ideal elastische Eigenschaften in ein ideal plastisches Verhalten übergehen. Bei dieser Voraussetzung hinsichtlich des Spannungs-Dehnungsdiagrammes bleibt der elastoplastische Bereich rechnungsmässig unberücksichtigt. Sein Vorhandensein hat zur Folge, dass die plastischen Zonen im Gebirge nicht scharf begrenzt sind, sondern allmählich in den elastischen Bereich übergehen. Die Rechnung ist also zu ungünstig. Aus der Form des tatsächlichen Spannungs-Dehnungsdiagrammes folgt aber, dass mit wachsender Verformung eines knapp unter der Bruchgrenze beanspruchten Gebirgsbereiches eine Verfestigung eintreten kann. Ein weiterer Fall der Verfestigung ist dann gegeben, wenn in tonigem Gebirge eine Schutzhüllenbildung durch Konsolidierung im Bereich erhöhter Tangentialspannungen bei gleichzeitiger Schwellung im Tragkörper eintritt.

Soweit die Ursachen für ein Nachlassen des Gebirgsdruckes im Laufe der Zeit. In den meisten Fällen wird aber die Durchbewegung des Gebirges zu einer Entfestigung führen. Es ist nämlich zu beachten, dass die Durchbewegung in der Nähe des Ausbruchrandes zur Zerstörung des Gesteinsverbandes, d. h. zum Bruch führt [26]), weil dort eine Hauptspannung klein ist oder am Rande des Ausbruches überhaupt verschwindet. Es bleibt daher in der Nähe des Ausbruches infolge der ausgiebigen, über die Bruchgrenze hinausreichenden plastischen Verformung nicht bei der durch Translations- oder Zwillingsgleitung in den Kristallkörnern mancher Gesteine bedingten und ermöglichten bruchlosen Verformung, sondern das Gefüge wird zerstört; die durch Sprengarbeiten verursachte Auflockerung des Gesteins hat hiebei eine nicht vermeidbare Vorarbeit geleistet. Die Zerstörung des Gesteinsgefüges durch Zermahlung oder Harnischbildung [27]) hat aber immer eine Entfestigung zur Folge, so dass nach eingetretener Durchbewegung die Festigkeitseigenschaften ungünstiger geworden sind, ein Umstand, der bei Beurteilung der zeitlichen Durchführung des dauernden Ausbaues besonders zu beachten ist.

7. Ueber die Abhängigkeit des Gebirgsdruckes von der Ueberlagerungshöhe

Untersuchungen, die sich mit der Abhängigkeit des Gebirgsdruckes von der Ueberlagerungshöhe befassen, müssen davon ausgehen, dass der lotrechte Druck im ungestörten Gebirge gleich der Ueberlagerungshöhe h multipliziert mit dem Raumgewicht des Gebirges γ ist. Es bedarf keines Hinweises, dass diese Voraussetzung oft nicht zutrifft und dass wegen der topographischen Oberflächengestaltung und der tektonischen Gegebenheiten eine Vermehrung oder Verminderung dieses Druckes eintreten kann [28]). Immerhin bleibt die Ueberlagerungshöhe ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung des echten Gebirgsdruckes.

Die älteren Gebirgsdruckanschauungen, die vielfach auf der Erddrucklehre fussen, verneinen die Abhängigkeit des Firstdruckes von der Ueberlagerungshöhe und lassen eine solche nur für den Ulmendruck gelten. Als erfahrungsmässige Begründung dafür wird die statische Abschirmung, also die Schutzhülle angesehen. Eine getrennte Beurteilung von First- und Ulmendruck ist aber in dem angedeuteten Sinne nicht zu rechtfertigen, weil die Schutzhülle geschlossen sein muss und daher in gleicher Weise auch die Ulmen abschirmen wird.

Aus der Auffassung Heims und seiner Anhänger von der latenten Plastizität bei allseitig gleichem Druck würde sich zwangsläufig ergeben, dass der echte Gebirgsdruck der Ueberlagerungshöhe unmittelbar entspricht, was aber durch die Erfahrung als allgemein gültig nicht bestätigt werden kann.

Als Ergebnis der Theorie der plastischen Zonen folgt, dass bei primär elastischem Zustand des Gebirges in der Umgebung des Tunnelhohlraumes labile Gebirgsbereiche entstehen, die in Bewegung geraten. Bei hoher Seitendruckziffer λ wird die Schutzhüllenbildung begünstigt, das Ausmass der labil werdenden Gebirgsteile bleibt daher klein, und der Einfluss der Ueberlagerungshöhe auf den durch die Gebirgsbewegung hervorgerufenen Druck ist gering oder überhaupt nicht feststellbar. Bei niedriger Seitendruckziffer λ hingegen ist die Ausbildung einer Schutzhülle nicht gewährleistet, die Grösse der plastischen Zonen und damit die mögliche Intensität der Gebirgsbewegung wächst mit der Ueberlagerungshöhe (siehe Bild 2). An anderer Stelle [29]) wurde in diesem Falle als Kriterium für die Bemessung des Tunnelmauerwerkes angegeben, dass bei einer bestimmten Reaktion des Ausbaues auf das Gebirge die zungenförmigen plastischen Zonen abgeschnürt werden, so dass sie keine freie Oberfläche gegen den Ausbruchhohlraum hin mehr haben. In beiden Fällen wird eine Zunahme der Mauerungsstärke mit wachsender Ueberlagerungshöhe nötig sein, im ersteren zur Sicherung des in seinen Abmessungen grösser werdenden ringförmigen plastischen Bereiches und im zweiten wegen der zunehmenden Ausdehnung der plastischen Zungen; die Stärke des Ausbaues wird aber trotz Zunahme mit der Tiefenlage des Tunnels kleiner bleiben, als dem vollen Druck der lotrechten Ueberlagerung entsprechen würde.

---

23) Eine Bestätigung dieser Anschauung bietet auch das Verhalten der Marmore in Km. 9,4—9,9 ab Nordportal des Simplontunnels. Siehe C. Andreae: Die Gebirgsdruckerfahrungen und Baumethoden im schweizerischen Tunnelbau. Internationale Fachtagung für Gebirgsdruckfragen im Bergbau und Tunnelbau, Leoben 1950. Urban-Verlag, Wien 1950, S. 33—40.

24) L. Rabcewicz: a. a. O. S. 56.

25) L. Rabcewicz: a. a. O. S. 37.

26) J. Schmid: Statische Probleme des Tunnel- und Druckstollenbaues. J. Springer, Berlin 1926.

27) L. Rabcewicz: a. a. O. S. 58.

28) J. Stini: a. a. O. S. 132 ff.

29) H. Kastner: Ueber die Bemessung von Tunnel- und Stollenauskleidungen bei Auftreten von echtem Gebirgsdruck. «Oesterreichische Bauzeitschrift», Jg. 5, H. 3, 1950.

Wenn hingegen der primäre Zustand plastisch war, was bei Tongesteinen schon bei geringer Tiefenlage eintritt, bei pseudofestem Gebirge möglich ist und bei festem Gebirge ansehnliche, vom Tunnelbau bisher noch nicht erreichte Tiefenlagen erfordert, dann muss angenommen werden, dass — sofern keine Verfestigung des Gebirges eintritt — der echte Gebirgsdruck der Höhe der Ueberlagerung entspricht, ein Fall, bei dem die Gedankengänge Heims von der latenten Plastizität, die später durch Maillart und Andreae bestätigt wurden [30] [31]), tatsächlich zutreffen, wobei aber der waagrechte Seitendruck im ungestörten Gebirge keineswegs dem lotrechten Druck der Ueberlagerung gleichkommen muss.

[30]) R. Maillart: Ueber Gebirgsdruck. «Schweizerische Bauzeitung», B. 81, 1923, S. 168.

[31]) C. Andreae: Der Einfluss der Ueberlagerungshöhe auf die Bemessung des Mauerwerkes tiefliegender Tunnel. «Schweizerische Bauzeitung», Bd. 85, 1925, S. 71.

Vermehrte Anwendung des schrägen Bruchstrichs

DK 521.12

Seinem soeben erschienenen Buche «Grundlagen der graphischen Ermittlung der Druckschwankungen in Wasserversorgungs-Leitungen» stellt der Verlag R. Oldenbourg in München «Vorbemerkungen zum schrägen Bruchstrich» voran, denen wir folgendes entnehmen:

«In der mathematischen Literatur bürgert sich die Schreibweise mit dem schrägen Bruchstrich statt dem waagrechten immer mehr ein. Hierzu sei an folgendes erinnert: Der waagrechte Bruchstrich, der einzelne Doppelpunkt und der schräge Bruchstrich sind gleichbedeutende Zeichen der Division. Es gilt also:

$$\frac{a}{b} = a : b = a/b .$$

Der waagrechte Bruchstrich kann längere Ausdrücke zusammenfassen; seine Länge zeigt seinen Wirkungsbereich an. Die andern beiden Zeichen dagegen können nur je zwei benachbarte Zeichen in der Zeile verbinden, ebenso wie das Multiplikationszeichen.

Der Schrägbruchstrich erfordert also, die *Regel* zu beachten: *Die jeweils höhere Rechnungsart ist zuerst auszuführen,* also Division vor Multiplikation und beide vor Addition und Subtraktion, *solange weder Klammern noch sonstige Hinweise Gegenteiliges vorschreiben.*

Demgemäss ergeben sich folgende wichtige Formen:

$$a + b/c + d = a + \frac{b}{c} + d;$$

$$a - b/c + d = a - \frac{b}{c} + d;\ a/b \cdot c = \frac{a}{b}\, c .$$

Darinnen können a, b, c und d selbst zusammengesetzte Ausdrücke und selbstverständlich positiv oder negativ sein. Nur braucht für diese Formen beim Lesen der Schreibweisen mit Schrägbruchstrich die genannte Regel beachtet zu werden, denn alle sonstigen Ausdrücke mit Divisionen erscheinen unabhängig von der Regel eindeutig, weil Klammern gesetzt werden müssen, z. B.:

$$\frac{a+b}{c+d} = (a+b)/(c+d) .$$

Das Schreiben erfordert allgemeine Beachtung der Regel. Ausdrücke wie a/bc und $a/b/c$ sind nicht allgemein eindeutig und deshalb nicht allgemein brauchbar. Statt ihrer stehen eindeutige Formen zur Verfügung, wie $a/b \cdot c$ [noch deutlicher $(a/b)c$] und $a/(bc)$ sowie $(a/b)/c$ und $a/(b/c)$.

Beginnt der Nenner mit einem negativen Vorzeichen, so setzt man ihn besser in Klammern, also

$$\frac{a}{-b} = a/-b, \text{ besser } a/(-b) .$$

Die Formen mit waagrechtem und schrägem Bruchstrich seien einander in einigen Beispielen gegenübergestellt:

$$F/f - F/F_2 = \frac{F}{f} - \frac{F}{F_2};$$

$$F(t - x/a) = F\left(t - \frac{x}{a}\right);$$

$$\lambda/D \cdot c^2/(2g) \cdot dx + c^2/(2g) = \frac{\lambda}{D}\,\frac{c^2}{2g}\,dx + \frac{c^2}{2g} .$$

$$\lambda_1/\lambda_2 \cdot mn/y \cdot d_2 =$$

$$= \lambda_1/\lambda_2 \cdot m \cdot n/y \cdot d_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\,\frac{mn}{y}\,d_2 .»$$

Wenn auch zuzugeben ist, dass die Schreibweise mit horizontalem Bruchstrich die Uebersicht erleichtert, bietet die Schreibweise mit schrägem Bruchstrich so grosse Vorteile für den Schriftsetzer, dass sie in der gedruckten Literatur — im Gegensatz zur Handschrift — nach Möglichkeit angewandt werden sollte. Red.

Vollbahnbetrieb mit einphasigem Wechselstrom von 50 Perioden

DK 621.33.025.1

Vortrag, gehalten am 15. November 1950 im Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein von

C. BODMER, Oberingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich

Fortsetzung von S. 72

5. Die $C_0\,C_0$-Lokomotive für die SNCF

Im Hinblick auf den Umstand, dass die konstruktiven Schwierigkeiten des 50 Hz-Motors mit der Leistung wachsen, hat die SNCF von Anfang an Lokomotiven mit grossen Leistungen in Aussicht genommen und die auf Tabelle 5 angegebenen Bedingungen gestellt. Die maximale Geschwindigkeit wurde zu 90 km/h festgesetzt. Die Lokomotiven waren mit elektrischer Nutzbremsung auszurüsten. Eine wesentliche Erschwerung bedeutete die Forderung, dass alle Züge auch mit Gleichstrom von 1500 V, wenn auch nur mit verringerter Geschwindigkeit, förderbar sein müssen, da der Bahnhof Aix les Bains mit dieser Stromart versehen ist. Naturgemäss ergaben sich hierdurch kompliziertere Anlagen und höhere Gewichte der Lokomotive.

Tabelle 5. Von der SNCF gestellte Leistungsbedingungen für die $C_0\,C_0$-Lokomotive

Steigung ‰	Anhängelast t	Geschwindigkeit km/h
	einstündig	
25	430	60
20	530	60
15	630	60
	dauernd	
10	780	65
5	1000	70
0	1300	80

Die Projektstudien ergaben, dass sich diese Bedingungen mit einer Lokomotive vom Typ $C_0\,C_0$ mit zwei dreiachsigen Triebdrehgestellen und sechs Triebmotoren erfüllen lassen. Die Einstundenleistung wurde zu rd. 2800 kW (3800 PS) festgesetzt. Bild 8 zeigt die Hauptabmessungen und die Raumeinteilung, Bild 7 eine Aussenansicht.

Ueber die berechneten Zugkräfte und weitere Grössen orientieren die Bilder 13, 14 und 15; sie gelten für normalen Wechselstrombetrieb, für Gleichstrombetrieb sowie für den Betrieb bei Rekuperation. Die zugehörigen Schaltschemata zeigt Bild 16. Wie dort ersichtlich, bilden die sechs Triebmotoren drei Gruppen mit je zwei in Reihe geschalteten Motoren.

An der Sekundärwicklung des Haupttransformators 7 befinden sich 16 Anzapfungen, die mit 16 Stufenhüpfern 13 ver-

Tabelle 6. Normalleistungen des Traktionsmotors der $C_0\,C_0$-Lokomotive

	Dauernd	Einstündig
Spannung V	230	230
Stromstärke . . . . . A	2400	2640
Leistung an der Welle . . kW	432	463
Geschwindigkeit . . . . . km/h	65	60
Zugkraft am Rad . . . . kg	2370	2750