

Infoblatt zur Bestimmung von Spannungen um Tunnelbauwerke durch das Messen rissinduzierter elektromagnetischer Strahlung

MARCO LICHTENBERGER, GEOL.-PAL.-INST., UNIV. HEIDELBERG



Ruprecht-Karls-Universität
Heidelberg

1. Grundlagen

Dass mechanische Spannungsänderungen in kristallinen und amorphen Festkörpern von der Emission elektromagnetischer Strahlung begleitet werden, ist bereits seit den Anfangstagen der Elektrizitätsforschung bekannt (deGuericke, 1672).

In den letzten Jahrzehnten wurde mehrfach die Hypothese aufgestellt, dass diese Strahlung von kleinsten Rissen in den Festkörpern, sogenannten Mikro- oder auch Nanorissen ausgeht (z.B. Nitsan, 1977; Cress et al., 1987; O'Keefe & Thiel, 1995; Mognaschi, 2002). Diese Hypothese und die darauf aufbauende Theorie von rissinduzierter elektromagnetischer Strahlung wurde unabhängig von verschiedenen Arbeitsgruppen in diversen Laborexperimenten und Feldversuchen verifiziert (z. B. Rabinovitch et al., 1996; Frid, 2001; Koktavý et al., 2004) und gilt heute als wissenschaftlich erwiesen (Bahat et al., 2004).

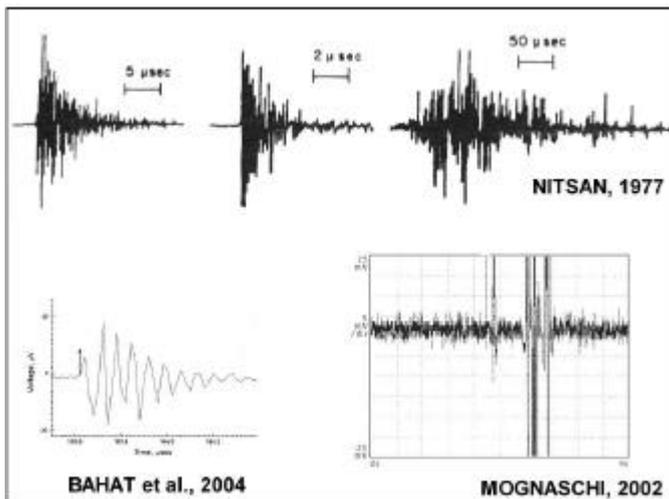


Abb. 1: Beispiele rissinduzierter EM-bursts aus der Literatur

Rissinduzierte Strahlung entsteht durch das Aufbrechen von Atombindungen bei der Nukleation und Ausweitung kleinster Risse. Durch das Lösen der Bindungen entstehen Ladungen gegensätzlichen Vorzeichens an den sich neu bildenden Trennflächen. Diese Ladungen entsprechen oszillierenden elektrischen Dipolen und emittieren elektromagnetische Strahlung bis die ungleiche Ladungsverteilung durch Ladungsträger im Festkörper

(z. B. Debye-Huckel-Wolken, Porenwasserionen) ausgeglichen wird. Ein Dipol existiert typischerweise zwischen 0,1s und 0,8s und emittiert in dieser Zeit gepulste elektromagnetische Strahlung, die in „Pulsgruppen“, sogenannten bursts auftritt (Abb. 1). Diese Strahlung hat Frequenzen von <1 Hz bis etwa 25 MHz. Der Bereich von 5-50 kHz ist für Messungen am besten geeignet.

Durch das Messen der Strahlung lassen sich Rückschlüsse auf die relative Häufigkeit und Ausrichtung von Nano- und Mikrorissen ziehen. Aus diesen lässt sich wiederum auf die mechanischen Spannungsfelder wie das regionale Spannungsfeld der Erdkruste oder das sekundäre Spannungsfeld um untertägige Hohlräume rückschließen. Zu diesem Zweck wurde das Cereskop von der Ceres GmbH, Staffort als portables Messgerät mit Ferrit Antenne, Mikroprozessor-gesteuertem Empfänger, A/D Wandler und RAM entwickelt (Abb. 2). Die Messungen können von

einer Person ohne Eingriffe in das Bauwerk ausgeführt werden, die aufgezeichneten Daten werden auf einen PC übertragen und ausgewertet. Verschiedene, dem Tunnelbau angepassten Mess- und Auswertemethoden werden in der Folge vorgestellt.

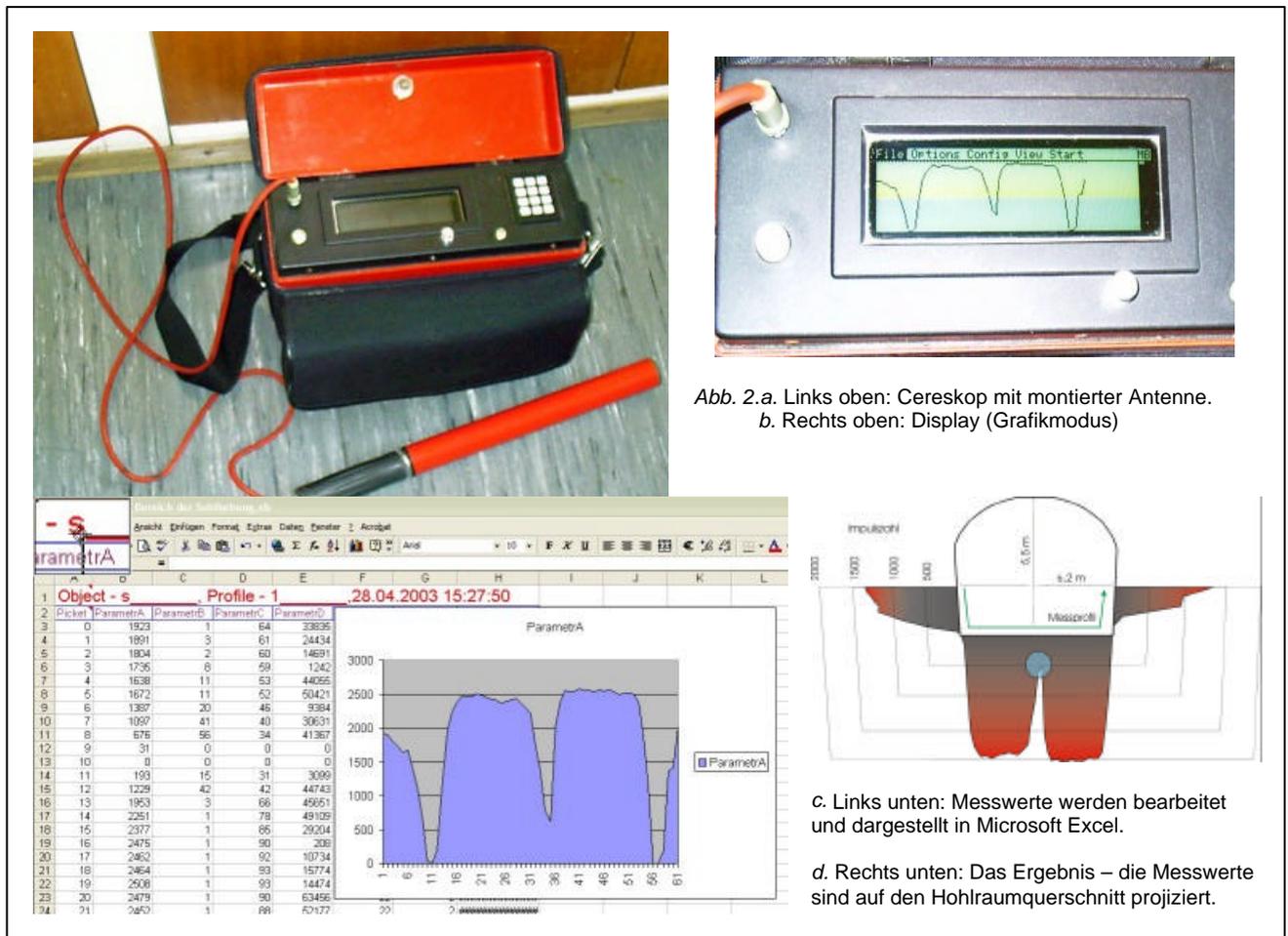


Abb. 2.a. Links oben: Cereskop mit montierter Antenne.
b. Rechts oben: Display (Grafikmodus)

c. Links unten: Messwerte werden bearbeitet und dargestellt in Microsoft Excel.

d. Rechts unten: Das Ergebnis – die Messwerte sind auf den Hohlraumquerschnitt projiziert.

2. Querschnittsmessung

Die *Querschnittsmessung* wird entlang des Tunnelquerschnitts ausgeführt und entspricht damit herkömmlichen Messungen mit Druckmessdosen. Eine *Querschnittsmessung* dauert etwa 5 min. Ihr Vorteil gegenüber den Druckmessdosen ist zum einen, dass die Methode zerstörungsfrei ist, zum anderen die besseren Inkremente. Während mit dem Cereskop ein Inkrement von 5° üblich ist, würde diese Genauigkeit einem Einbau von 72 Messdosen pro vermessenem Querschnitt entsprechen.

Die mit dem Cereskop gemessenen Strahlungen, gehen von Nano- und Mikrorissen aus. Deshalb entsprechen hohe Messwerte den Bereichen in denen die anliegenden Spannungen den Festigkeiten am nächsten kommen. Das sekundäre Spannungsfeld um den Tunnel ist definiert durch Tangentialspannung, Radialspannung und Scherspannung (Hudson & Harrison, 1997). Radial- und Tangentialspannung sind 0° oder 90° (Je nach Seitendruckziffer) zur Senkrechten orientiert, die Scherspannung ist 45° zur Senkrechten orientiert. In den meisten Tunneln kommen die Scherspannungen den Scherfestigkeiten am nächsten und sind daher die Quelle der gemessenen Strahlungen. Diese Strahlungen haben dann ebenfalls 45° Winkel zur Senkrechten (Abb. 3). Die Messungen korrelieren dabei

sehr gut mit Berechnungen der Scherspannungen nach der üblichen felsmechanischen Methoden (Hudson & Harrison, 1997) mittels der Kirsch-Formeln (Abb. 4 und 5):

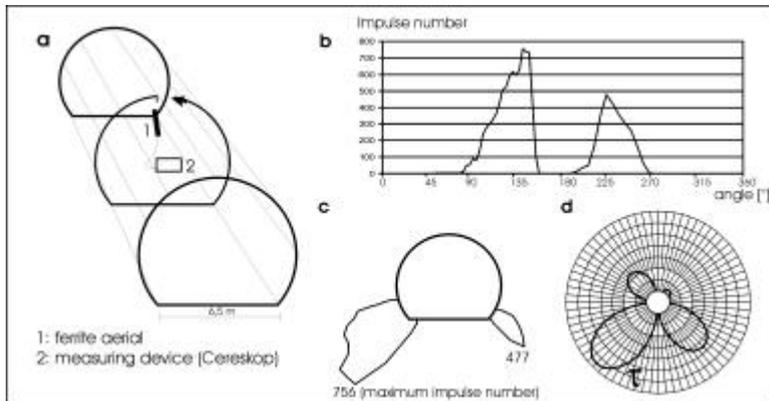


Abb.3: Ablauf einer Querschnittsmessung und Korrelation mit berechneten Scherspannungen.

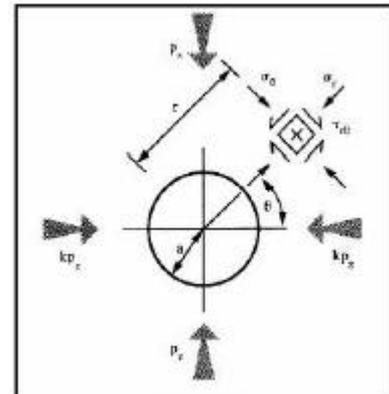


Abb.4: Berechnung der induzierten Spannungen um einen Tunnel (Hudson & Harrison, 1997).

$$s_{\text{rad}} = \frac{1}{2} \cdot p \left((1 + k) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - k) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \right)$$

$$s_{\text{tan}} = \frac{1}{2} \cdot p \left((1 + k) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - k) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \right)$$

$$t = \frac{1}{2} \cdot p \left((1 - k) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) \right)$$

Meist treten die höchsten Scherspannungen bei flachen Tunneln an der Sohle der Tunnel auf. Mit Hilfe der *Querschnittsmessung* lassen sich Bereiche des Tunneln mit ungünstigen Spannungsverteilungen auffinden und abgrenzen. Dies gilt z.B. für Bereiche mit geologisch aktiven Verwerfungen oder quellenden Gesteinen wie Anhydrit und Bergschlag- oder Einbruch-gefährdete Zonen.

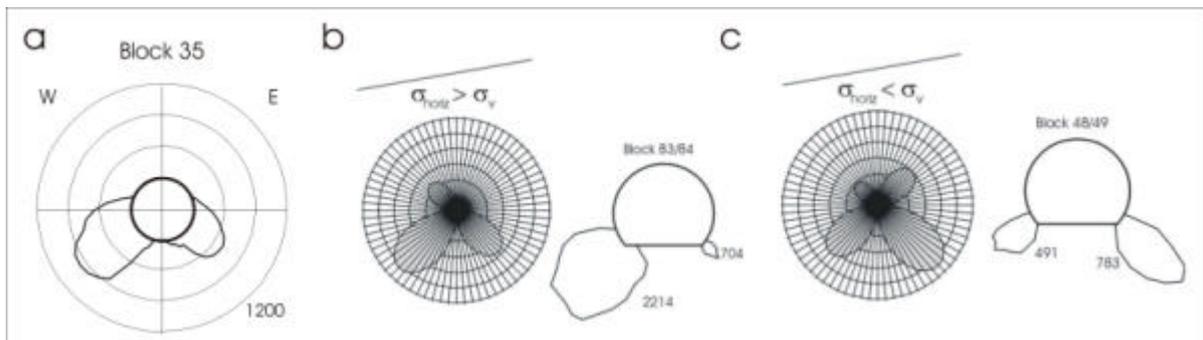


Abb. 5: Beispiele für Querschnittsmessungen. a. Zuckerbergstollen II. b. und c. Feuerbergstunnel. Diese beiden wurden mit aus den Kirsch-Formeln (s.o.) berechneten Scherspannungsverteilungen korreliert.

3. Auftragen der Messungen entlang der Tunnelachse

Die *Querschnittsmessungen* lassen sich über die gesamte Tunnelachse auftragen und zeigen dann die Verteilung der Scherspannungen entlang der Längsachse des Tunneln. Auf diese Weise lassen die Parameter des regionalen Spannungsfeldes

ableiten. Das Spannungsfeld um den Tunnel lässt sich dann komplett in Richtung und Betrag berechnen.

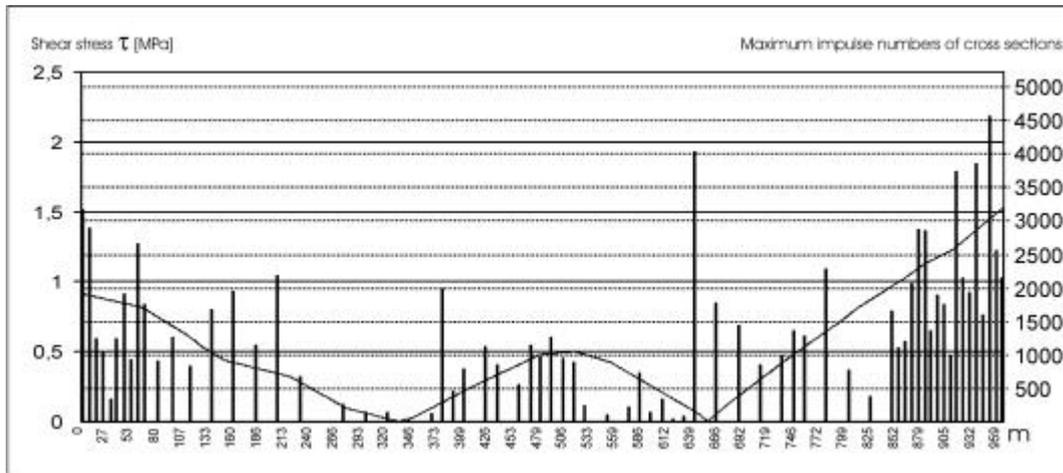


Abb. 6 Korrelation von 71 Querschnittsmessungen mit berechneten Scherspannungen (s.o.) über die Längsachse des Feuerbergtunnels. Deutlich hebt sich eine vermutete Verwerfung durch Spannungsakkumulation von 640-700m ab, während der Rest des Tunnels das erwartete Spannungsbild ausweist.

Aus dieser Auswertung (Abb. 6) lassen sich besonders deutlich ungünstige Einflüsse in ihrer Ausdehnung und ihren Spannungsbeträgen bestimmen. Eine Arbeit, die diese Auswertungsmethode detailliert darstellt, wird in Kürze im „Journal of Structural Geology“ veröffentlicht.

5. Weitere Methoden

Neben den oben genannten Methoden sollen noch zwei weitere verwandte Messmethoden mit Möglichkeiten für den Tunnelbau genannt werden. Aus sogenannten *Horizontalmessungen* an der Erdoberfläche lassen sich die Richtungen der horizontalen Hauptspannungen und das Verhältnis ihrer Beträge angeben (Lichtenberger, 2005). Diese Methode kann benutzt werden um vor dem Bau eines Tunnels das Spannungsfeld in der Erdkruste zu bestimmen und damit angepasst das Vorgehen beim Bau zu planen. Durch *Linearmessungen* an der Erdoberfläche lassen sich geologische Verwerfung auffinden und in ihrer Lage in der Erdkruste bestimmen. Auch diese Kenntnisse können wertvoll in der Planungsphase eines Tunnels sein.

6. Forschung und Zusammenarbeit

An der Universität Heidelberg wird die Methodik der Spannungsbestimmung aus der Messung rissinduzierter elektromagnetischer Strahlung seit 2003 bearbeitet. Wichtige aktuelle Punkte dabei sind: die Korrelation der Methode mit Standardmethoden, der Einfluss unterschiedlicher Lithologien und die detaillierte Erforschung wichtiger Einflüsse wie tensiler Spannungen, oberflächennaher Spannungsänderungen und der Ausbau der Tunnel. Unser besonderes Interesse gilt weiterhin dem regionalen Spannungsfeld östlich des Oberrheingraben und angrenzender Gebiete.

In unseren Projekten arbeiten wir eng mit Behörden, anderen, auch internationalen, geologischen und geophysikalischen Instituten und vor allem den Entwicklern der Messapparaturen (Ceres GmbH) zusammen. Dabei sind wir ständig an weiteren Kooperationspartnern interessiert.

7. Adressen

Zu Fragen bezüglich der bisherigen Forschung, Grundlagen, Auswertemethodik wenden Sie sich bitte an:

Dipl.-Geol. Marco Lichtenberger
Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 234
69120 Heidelberg
Tel.: 06261 – 91 74 64 oder 06221 – 54 43 86
Mobil: 0171 – 247 255 9
E-mail: mlichten@ix.urz.uni-heidelberg.de

Zu Fragen bezüglich des Cereskops, der Messtechnik, Einsatzmöglichkeiten und der Erstellung von Gutachten wenden Sie sich bitte an:

Dipl.-Geol. Dr. Hennes Obermeyer
Geschäftsführer Ceres GmbH
Wolfslachstraße 31
76297 Staffort
Tel.: 07249 – 951 880
E-mail: hennes.obermeyer@inka.de

8. Zitierte Literatur

Bahat, D., Rabinovitch, A., Frid, V., 2004. Tensile fracturing in rocks - tectonofractographic and electromagnetic radiation methods. Springer, Heidelberg.

Cress, G., Brady, B., Rowell, G., 1987. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in laboratory. Geophysical Research Letters 14(4), 331-334.

deGuericke O., 1672. Experimenta nova (ut vocantur) magdeburgica de vacuo spatio. J. Janson, Waesberg, 244 pp.

Frid, V., 2001. Calculation of electromagnetic radiation criterion for rockburst hazard forecast in coal mines. Pure and Applied Geophysics 158, 931-944.

Hudson, J.A., Harrison, J.P., 1997. Engineering rock mechanics - an introduction to the principles. Pergamon, Oxford.

Koktavy, P., Pavelka, J., Sikula, J., 2004. Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources. Measurement Science and Technology 15, 973-977.

Lichtenberger, M., 2005. Determination of horizontal principal directions of stress in the Lower Muschelkalk in Northern Baden-Württemberg (Germany) from geogenic electromagnetic radiations. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen (submitted).

Mognaschi, E.R., 2002. On the possible origin, propagation and detectability of electromagnetic precursors of earthquakes. Atti Ticinensi di Scienze della Terra 43, 111-118.

Nitsan, V., 1977. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks. Geophysical Research Letters 4/8, 333-335.

O'Keefe, S.G., Thiel, S.V., 1995. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials. Physics of the Earth and Planetary Interiors 89, 127-135.

Rabinovitch, A., Bahat, D., Frid, V., 1996. Emission of electromagnetic radiation by rock fracturing. Zeitschrift der Geologischen Wissenschaften 24(3/4), 361-368.