

**SCHALLEMISSIONSMESSUNGEN IN DER GRUBE STEFANIE DER  
BLEIBERGER BERGWERKS-UNION AG**

von

Harald Hick

---

Bundesministerium für Handel, Gewerbe und Industrie;  
Grundlagen der Rohstoffversorgung, Heft 8, Geotechnik  
und Sicherheit im Bergbau - Bergschlagforschung, Seminar  
in Bad Bleiberg am 7. und 8. Juni 1984, Wien 1985.



## **SCHALLEMISSIONSMESSUNGEN IN DER GRUBE STEFANIE DER BLEIBERGER BERGWERKS-UNION AG**

von Harald Hick

Im Institut für Physik des Forschungszentrums Seibersdorf befaßt sich ein kleines Team bereits seit mehreren Jahren mit praktischen Anwendungen der Schallemissionsanalyse zur sicherheitstechnischen Überwachung von großen Strukturen aus Beton und Gestein (Abb. 1). Parallel zu den Versuchsmessungen zur Bergschlagforschung in der Grube Stefanie der Bleiberger Bergwerks-Union AG (1,3) wurden in den Jahren 1978 - 1983 Messungen an Laborproben aus Beton und Gestein, an Spannbetonschwellen, einem 10 m langen Spannbetonträger sowie an einer großen Talsperre durchgeführt, so daß die umfangreichen, mit der Theorie konsistenten praktischen Erfahrungen mittlerweile den Größenbereich (Ausdehnung des Überwachungsbereiches) von 10 cm bis zu 100 m praktisch lückenlos überdecken (2,4). Neben den im Auftrag der Bleiberger Bergwerks-Union AG in den Jahren 1980 - 1982 durchgeführten, durch das Bundesministerium für Handel, Gewerbe und Industrie sowie das Land Kärnten geförderten Arbeiten wurden die Arbeiten im Forschungszentrum Seibersdorf durch das Bundesministerium für Bauten und Technik sowie den Forschungsförderungs fonds der Gewerblichen Wirtschaft gefördert.

Im folgenden werden neben einer knappen Darstellung der Grundlagen die wichtigsten Ergebnisse der Schallemissionsmessungen in der Grube Stefanie sowie die vorangegangenen Überlegungen bei der Planung des Versuchskonzeptes präsentiert.

### **1. Grundlagen der Schallemission**

Eine ausführlichere Zusammenfassung der Grundlagen mit einer umfangreichen Literaturliste findet man in (5). Die Schallemissionsanalyse unterscheidet sich von der besser bekannten Seismologie hauptsächlich durch den Größenmaßstab. Bei jedem rasch ablaufenden Bruchphänomen (Sprödbruch) wird elastisch gespeicherte Energie innerhalb einer kurzen Zeit

unter Bildung freier Bruchflächen umgesetzt. Die dabei reichlich vorhandene Überschußenergie wird zumindest zum Teil als elastische Welle - Schallemission - abgestrahlt. Praktische Beispiele dafür, daß eine zunehmende Materialzerstörung von akustischen Signalen angezeigt wird sind das "Schießen des Gebirges", das "Sprechen des Grubenholzes", das Knistern einer überlasteten Eisdecke, das "Zinngeschrei" u.a..

Die wesentlichen Mechanismen der Bruchmechanik und der begleitenden Schallemission gehorchen für die unterschiedlichsten Materialien sowie für Rißbildungen im Größenmaßstab von Mikrometern bis zu Kilometern einheitlichen Gesetzen. Der sicherheitstechnisch bedeutsame Aspekt besteht darin, daß makroskopische, "katastrophale" Brucherscheinungen erst das Endstadium einer langen Ereigniskette darstellen, in der zunächst mikroskopische Risse in immer höherer Konzentration zu Rißbildungen in immer größerer Dimension führen und alle diese Vorgänge durch Schallemission angezeigt werden.

Jede plötzliche Bildung von Rissen in einem Festkörper muß zwangsläufig zu Schallemission führen. Dies folgt sowohl aus der Elastizitätstheorie (makroskopisch) als auch aus der Festkörpertheorie (mikroskopisch). Soweit es die meßtechnischen Methoden der Schallemissionsanalyse ermöglichen, haben sich die aus der Seismologie bekannten Erkenntnisse bei der Übertragung auf den mikroskopischen Maßstab quantitativ bestätigt. In der Praxis erhebt sich daher nur die Frage, ob diese Schallemissionen neben den in einer Grube auftretenden Störgeräuschen auch meßbar sind!

Die Schallemissionsanalyse ist besonders geeignet, Rißbeginn und Rißfortschritt in spröden bzw. heterogenen Werkstoffen wie Fels und Beton zu verfolgen, weil bei diskontinuierlicher Energieumsetzung starke Einzel-Signale - "bursts" - ausgesendet werden, welche besonders leicht meßbar sind.

Die theoretisch berechnete Frequenzverteilung (6) von Schallemissionssignalen für Risse verschiedener Länge in unmittelbarer Nähe des Entstehungsortes zeigt ein Maximum bei einer Grundfrequenz

$$f_g(\text{Hz}) = 1000 / L(\text{m}) \quad (1)$$



Für die sicherheitstechnische Überwachung von Bergwerksstollen liegen die interessantesten Rißlängen im Bereich von ca. 10 cm, die zugehörigen Schallemissionssignale primär im Frequenzbereich von ca. 1 - 10 kHz und die in diesem Frequenzbereich erzielbaren Reichweiten bei 10 - 100 m (Abb. 2). Die zur Frequenz proportionale Planwellen-Dämpfung liegt bei geologischen Materialien bei ca. 0.01 - 1 dB/m für eine Signalfrequenz von 1 kHz. Im zerklüfteten Kalkgestein wurden z.B. 10 dB Gesamtdämpfung für eine Distanz von 36 m gemessen (Frequenzbereich 1 - 5 kHz). Leichte Testschläge (z.B. mit einem kleinen Hammer) mit einer Energie von einigen 0.1 Joule können über eine Distanz von ca. 100 m in Beton und Fels registriert werden. Die ordnungsgemäße Funktion einer Schallemissions-Überwachungsapparatur kann daher durch solche Testschläge sofort und einfach verifiziert werden. Ein plötzlicher Sprödbruch von ca. 10 cm Länge setzt eine Energie von einigen 100 Joule um. Beim Riß eines unverpreßten Felsankers von 16 mm Durchmesser kann eine Energie von rund 10 kJ freigesetzt werden!

Abb. 3 zeigt schematisch den Verlauf der Volumsdehnung sowie der kumulativen Schallemission für Beton und Gestein als Funktion der Last bzw. der mechanischen Spannung beim einachsigen oder auch mehrachsigen Druckversuch (7). Die experimentelle Erfahrung zeigt, daß das Schallemissionsverhalten der verschiedenen Gesteinsarten sich nur in bezug auf die mehr oder weniger starke Ausprägung der Bereiche 1 und 3 unterscheidet.

Im Bereich 1 nimmt die Steifigkeit der Probe mit wachsender Last zu, weil vorhandene Mikrorisse und Poren durch die Druckspannung zunächst geschlossen werden. Dies führt auch zu mäßiger Schallemission.

Im Bereich 2 verhält sich die Probe perfekt elastisch. Es werden noch keine Mikrorisse durch die mechanischen Spannungen erzeugt und es tritt auch kaum meßbare Schallemission auf. Dieser Bereich reicht, je nach Beanspruchungsart, bis zu ca. 30-60 % der Bruchspannung. Im Bereich 3 kommt es bei zunehmender Belastung an den natürlichen Schwachstellen des Materials zu einer zunehmenden Bildung von Mikrorissen, entsprechend der Mikrostruktur des Materials, also zunächst

regellos und statistisch verteilt im gesamten Probenvolumen und ohne wesentliche Wechselwirkung der einzelnen Mikrorisse untereinander.

Durch das Rißwachstum werden instabile Schwachstellen des Materials im mikroskopischen Maßstab "entspannt", d.h. in vorläufig (beim herrschenden Spannungsniveau) stabile Rißkonfigurationen transformiert. Dies ist im allgemeinen ein irreversibler Vorgang, der nur beim ersten Spannungsanstieg auftritt und wegen der makroskopischen Stabilität bei konstanter Last von selbst zum Stillstand kommt. Bei zunehmender Last tritt daher Schallemission nur bei Überschreitung vorheriger Höchstlasten auf (Kaisereffekt), bei konstanter oder abnehmender Last tritt praktisch keine Schallemission auf.

Am oberen Ende des Bereiches 3, bei ca. 80-95 % der Bruchlast, wird die Dichte der entstandenen Mikrorisse so hoch, daß eine wesentliche Wechselwirkung ihrer mikroskopischen Spannungsfelder erfolgt. Dies führt zunächst zu einer beschleunigten Zunahme der Schallemissionsrate mit der Last, also zu einer besonders deutlichen Vorwarnung.

Als weitere Folge kommt es zu einer Clusterbildung von Mikrorissen aufgrund von statistischen Extremwerten der natürlichen Schwachstellenverteilung des Materials und es beginnt die instabile (dynamisch ablaufende) Bruchphase des Bereiches 4 (8). Dabei beobachtet man gelegentlich, daß die Schallemissionsrate nach Durchlaufen eines steilen Maximums wieder abklingt und eine "Ruhephase" vor dem katastrophalen Bruch (Hauptbeben) auftritt. Möglicherweise wird durch die starke Auflockerung eines größeren Bereiches die Schallübertragungsfähigkeit derart reduziert, daß außerhalb dieses Bereiches eine "Ruhephase" beobachtet wird, obwohl innerhalb weiterhin Schallemission auftritt.

Nicht-intakte Materialien zeigen nicht den Kaisereffekt, sondern durch elastische Deformation an den Rißflanken induzierte Reibungsgeräusche niedriger Frequenz auch bei Lastabnahme.

In einem Bergwerk gibt es durch das Schießen immer eine größere Anzahl von Rissen. Diese können auch bei abnehmender mechanischer Spannung Reibungsgeräusche verursachen, die für die Gebirgsschlagsvorwarnung als Störgeräusche zu betrachten sind.

## **2. Planung der Schallemissionsapparatur**

Bei der Planung der Überwachungsapparatur wurde auf die betrieblichen Erfordernisse in der Grube Rücksicht genommen. Aus der Literatur waren sowohl zentrale, computergesteuerte Großanlagen mit vielen installierten Schallaufnehmern und dreidimensionaler Ortung aller Ereignisorte als auch kleine tragbare Einkanalapparaturen bekannt.

Zentrale Großanlagen mit dreidimensionaler Ortungsfähigkeit registrieren relativ seltene und große Ereignisse bei niedrigen Frequenzen über größere Distanzen. Sie erfordern die permanente Verkabelung vieler Schallaufnehmer, eine Signalauswertung mit einem leistungsfähigen Computer (in einem entsprechenden Raum untertags installiert) und eine entsprechend ausgebildete Bedienungsmannschaft. Die Immunität gegen Störgeräusche wird dadurch erzielt, daß man sich auf die Registrierung von entsprechend starken und selten auftretenden Schallemissionssignalen beschränkt.

Tragbare Einkanalapparaturen registrieren im allgemeinen hochfrequente Bruchgeräusche mit kurzer Reichweite und erfordern daher auch mindestens einen Experten, der die verschiedenen Gefahrenbereiche in z.B. stündlichen Abständen immer wieder aufsucht und beobachtet. Die Immunität gegen Störgeräusche aus größerer Entfernung wird dabei durch die bei höheren Frequenzen entsprechend kurze Reichweite der Signale im Gestein erzielt.

Im Hinblick auf eine praktisch nutzbare Vorwarnmethode mit automatischem, unbeaufsichtigtem Betrieb und Aufstellung ohne besondere Ausbaumaßnahmen wurde eine Anordnung gewählt, bei der ein Abbaubereich am Niveau des 12. Laufes durch eine fixe Installation am Niveau des 11. Laufes überwacht wird (Abb. 4). Dies erfordert eine Mindestreichweite der Schall-

emissionsmessungen von ca. 50 m, was wiederum eine obere Grenze für die maximal meßbare Frequenz und die maximal verarbeitbare Ereignisrate bedingt. Ein Fernziel war dabei eine Vorwarnmethode, die auch während der Durchführung von Bohrarbeiten brauchbare Meßresultate liefert. Dieser Wunsch steht jedoch in einem gewissen Gegensatz zu der geforderten Mindestreichweite von 50 m, weil nur bei ausreichend hohen Frequenzen Hoffnung besteht, daß die Felsbruchgeräusche durch Bohrgeräusche nicht verdeckt werden.

Es wurde eine mikroprozessor-gesteuerte Apparatur zur Messung von koinzidenten Schallemissions-Signalen in zwei Kanälen mit eindimensionaler Ortung entwickelt. Ziel dieser Entwicklung war die Realisierung einer möglichst einfach zu betreibenden (automatischen) und preiswerten Überwachungsanlage für Bauwerke und geologische Strukturen mit einer typischen Ausdehnung von 2 - 100 m. Das Koinzidenzprinzip bietet dabei den Vorteil einer erhöhten Immunität gegen schwache, lokale Störsignale.

Abb. 5 zeigt eine Ansicht der Schallemissionsapparatur, die in ein wasserdichtes, stoßgedämpftes und korrosionsfestes Gehäuse eingebaut ist. Sie ist für den Anschluß von zwei Schallaufnehmern (2 Kanäle) ausgelegt und umfaßt 2 Verstärker (0 - 90 dB), 2 Filter (0.1 - 50 kHz), 2 Diskriminatoren (0 - 10 V) sowie einen Signalprozessor. Die Apparatur ist für die Verarbeitung von transienten (nicht kontinuierlichen) Schallemissions-Impulsen konstruiert. Mittels Laufzeitdifferenzmessung ist eine eindimensionale Ortung möglich. Unerwünschte Signale (von außerhalb des gewählten Überwachungsbereiches sowie elektromagnetische Störsignale) können von der weiteren Verarbeitung weitgehend ausgeschlossen werden. Die vom Signalprozessor akzeptierten Signale können entweder mittels Schreibers als Ereignisrate bzw. Amplitudenrate (ring-down-count rate) als Funktion der Zeit ausgeschrieben werden oder (in einem neueren Modell) über ein druckendes Terminal mit automatischer Protokollführung und der Ortsverteilung ausgedruckt werden.

Als Schallaufnehmer können sowohl Geophone als auch piezoelektrische Transducer (Beschleunigungsmeßfühler) über Vorverstärker und einige 100 m Kabel an die Apparatur ange-

geschlossen werden. Geophone sind vor allem zur Überwachung größerer Bereiche (ca. 100 m) unter Verwendung niedrigerer Frequenzen (ca. 1 kHz) geeignet. Wegen ihres niedrigen Preises können sie problemlos und permanent durch Ausgießen mit Zementleim in Bohrlöchern montiert werden. Piezoelektrische Transducer sind bei höheren Frequenzen empfindlicher als Geophone, aber auch wesentlich teurer. Sie müssen daher aus wirtschaftlichen Gründen rückholbar montiert werden. Geophone und piezoelektrische Transducer zeigen eine prinzipiell unterschiedliche Frequenzabhängigkeit ihrer Empfindlichkeit. Dies beruht darauf, daß elektrodynamische Geophone die Geschwindigkeit messen, während piezoelektrische Transducer die Beschleunigung registrieren. Da zunächst eine eindeutige Entscheidung zwischen diesen beiden Aufnehmertypen nicht getroffen werden konnte, wurde beschlossen, einen parallelen Betrieb von zwei kompletten und bis auf die Aufnehmer identischen Apparaturen zu realisieren. Dieser zunächst großzügig erscheinende Mehraufwand hat es ermöglicht, auch andere, ansonsten nicht durchführbare gleichzeitige Vergleichsmessungen durchzuführen.

### 3. Schallemissionsmessungen

Die Grube Stefanie der Bleiberger Bergwerks-Union AG zeigt in bestimmten Abbaubereichen häufig Bergschläge, so daß dort relativ rasch experimentelle Daten im natürlichen Maßstab gewonnen werden können. Allerdings wird dies durch die ungünstigen Umgebungsbedingungen, wie hohe Luftfeuchtigkeit, Tropfwasser, elektromagnetische und akustische Störungen durch den Grubenbetrieb sowie sehr hohe Netzspannungstransienten (häufige Blitzschläge) erschwert.

Im Jahr 1980 wurde mit Vorversuchen in der Grube Stefanie begonnen mit dem Ziel, erste Erkenntnisse über Intensität, Frequenz, Dämpfung und Häufigkeit der natürlichen Felsbruchgeräusche zu gewinnen. Außerdem sollten praktische Erfahrungen über die Installation von Schallaufnehmern sowie den Betrieb der elektronischen Geräte gewonnen werden. Diese Vorversuche von 3 Wochen Dauer wurden mit normalen elektronischen Laborgeräten durchgeführt und erbrachten die notwendigen Ergebnisse über Intensität, Frequenz, Dämpfung und Häufigkeit der Felsbruchgeräusche und Störgeräusche für die Planung der eigentlichen Versuchsmessungen.

Ausgangsbasis für die Planung des Versuchsprogramms und die Wahl der Überwachungsanordnung war dabei der damals übliche Rhythmus des Grubenbetriebes mit einer nächtlichen Ruhepause, der ungestörte, nächtliche Schallemissionsmessungen in regelmäßigen Abständen garantiert hätte. Durch den inzwischen erfolgten Übergang zu einem Schichtbetrieb ist jedoch die nutzbare Meßdauer wegen der Bohrarbeiten stark reduziert worden. Ungestörte Schallemissionsmessungen sind jetzt nur noch zum Wochenende (ca. Freitag 21 h bis Sonntag 24 h) möglich. Während bei regelmäßigen nächtlichen Schallemissionsmessungen die Hoffnung bestand, bei ausreichender Vorwarnfrist praktisch nutzbare Ergebnisse für den kommenden Arbeitstag zu erhalten, besteht kaum eine Chance, aus einer Messung zum Wochenende eine praktisch nutzbare Vorwarnung für eine ganze Arbeitswoche zu erhalten.

In der Zeit von November 1981 bis April 1982 wurde ein intensiver Versuchsbetrieb mit paralleler Protokollierung aller beobachteten Bergschläge bzw. Entspannungsschläge und laufender Betreuung der Schallemissionsapparatur durchgeführt. Aufgabe war zunächst die Beantwortung der Frage, ob mit Schallemissionsmessungen prinzipiell eine Vorwarnung vor Gebirgsschlägen in der Grube Stefanie möglich ist.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die subjektiv (das heißt vom Grubenpersonal) beobachteten Berg- und Entspannungsschläge. Zeit- und Ortsangaben beziehen sich dabei hauptsächlich auf die Hörbarkeit, sind also nicht sehr genau. Nur bei Bergschlägen (mit Hauwerksfall) ist die Ortsangabe wirklich gesichert. Größere Schläge konnten auch in den Aufzeichnungen der nahegelegenen seismologischen Station identifiziert werden, so daß für diese dann auch der genaue Zeitpunkt festgestellt werden konnte.

Ziel des Versuchsbetriebes war zunächst die Registrierung der Schallemissionsraten und die Identifizierung brauchbarer Vorwarnanzeichen aufgrund von Korrelationen mit Bergschlägen innerhalb des Überwachungsbereiches der Apparaturen (also zwischen 11. und 12. Lauf im Bereich der Eismännerkluft und innerhalb der ca. 50 m langen Überwachungsstrecke).

Für Bergschläge außerhalb dieses Bereiches sind Vorwarnungen denkbar (wenn z.B. eine großräumige Spannungsänderung ent-

lang der Eismännerkluft als Ursache vorlag), aber im allgemeinen nicht zu erwarten. Wegen der mangelhaften Ortsangaben war es häufig nicht möglich, von einem Entspannungsschlag (ohne Hauwerksfall) eindeutig festzustellen, ob er innerhalb oder außerhalb des Überwachungsbereiches auftrat. Wenn ein Schlag selbst durch die Schallemissionsapparaturen nicht registriert wurde, so kann man im allgemeinen annehmen, daß er sich außerhalb der Reichweite ereignete. Ein Schlag innerhalb der Reichweite der Apparaturen wurde im allgemeinen deutlich registriert und zeigte außerdem einen nachfolgenden exponentiellen Abfall der Schallemissionsrate (durch die ausgelöste Spannungsumlagerung im benachbarten Felsmaterial). Schläge, die keinen exponentiellen Abfall zeigen, traten daher vermutlich außerhalb der effektiven Reichweite der Apparatur auf. Auch beim Schießen wurde immer wieder beobachtet, daß nahegelegene Ereignisse diesen exponentiellen Abfall zeigen. Gemäß den Beobachtungen an Laborproben ist langanhaltende Schallemission, die nur langsam abklingt, ein Zeichen dafür, daß das Material schon bis knapp unterhalb der Bruchlast belastet ist.

Abb. 6 zeigt den typischen Verlauf der Schallemissionsrate während eines ruhigen (arbeitsfreien) Tages. Wie man sieht, schwankte die über eine Periode von 10 Minuten gemittelte Schallemissionsrate zwischen  $<1$  und weit unter 1000 Impulsen/Minute, wobei bemerkenswert ist, daß es sehr häufig Perioden gab, in denen weniger als 1 Imp./Min. (d.h. möglicherweise gar keine Schallemission) registriert wurde. Derartige Schallemissionsraten könnten daher als normal gelten, anhaltende oder wiederholt auftretende Werte von z.B. mehr als 1000 Imp./Min. könnten als erste Anzeichen eines zu einem Bergschlag führenden, instabilen bruchmechanischen Vorganges aufgefaßt werden.

Eine detaillierte **Auswertung der maximalen Schallemissionsraten** für alle arbeitsfreien (störgeräuschfreien) Tage zwischen 14.11.1981 und 31.1.1982 bestätigt diesen Eindruck. An den 25 arbeitsfreien Tagen wurde nur viermal eine Schallemissionsrate von mehr als 1000 Imp./Min. kurzzeitig registriert (5.12., 2x 19.12., 20.12.).

Die beiden Ereignisse am 19.12. wurden auch durch die parallele seismische Meßstation registriert und es wurde auch



ein Schlag mit unbekanntem Ort gemeldet (siehe Tabelle 1). Am 21.12. traten auch zwei Bergschläge auf. Die Häufigkeit möglicher Fehlalarme kann daher mit weniger als 1 - 2 in 25 Tagen abgeschätzt werden (wenn keine Störgeräusche auftreten).

Eine **Auswertung der minimalen Schallemissionsraten** (während eines ganzen Tages) zeigt, daß offensichtlich ein unruhiger und zu Bergschlägen neigender Gebirgszustand über einige Tage voraus durch einen deutlichen Anstieg der minimalen Schallemissionsraten zu erkennen ist. Während z.B. Mitte November 1981 während eines ruhigen Tages ca. 25-50x das anzeigbare Minimum von  $<1$  beobachtet wurde, wurden am Samstag 19.12.1981 wesentlich höhere Tages-Minima (40, 60, 3x 90) vor dem sehr starken und auch obertags hörbaren Entspannungsschlag um 19h18 registriert. Diese Beobachtung war für den darauffolgenden Sonntag (20.12.1981: 80, 2x 90) sogar noch ausgeprägter. Auch der nach dem Schlag beobachtete lange exponentielle Abfall der Schallemissionsrate deutet darauf hin, daß der allgemeine Gebirgszustand wenig stabil war. Tatsächlich erfolgten am nächsten Tag noch zwei weitere Bergschläge innerhalb der Reichweite der Apparatur. Ein praktischer Nachteil dieser Vorwarnzeichen ist einerseits deren leichte Maskierung durch Störgeräusche sowie andererseits die schlechte Erkennbarkeit auf einem Schreiberstreifen. Bei einem ungünstig gewählten Ratemetersmaßstab (z.B. linear von 0 bis 10000) wären diese überhaupt nicht zu erkennen. Andererseits scheinen diese Vorwarnzeichen bereits einige Tage vor dem Bergschlag aufzutreten, so daß eine Auswertung der ruhigen Wochenenden einen gewissen allgemeinen Vorhersagewert für die kommende Woche haben könnte.

Abb. 7 zeigt ein typisches Beispiel der durch Bohrarbeiten verursachten Störungen (Vollausschlag der Schallemissionsraten zwischen ca. 16h-16h30, 17h-18h30 sowie 20h-20h30, so daß der Entspannungsschlag um 18h samt möglichen Vorwarnzeichen maskiert wurde). Der Anstieg der Schallemissionsraten um ca. 15h kann wegen ebenfalls möglicher Störungen durch weiter entfernte Bohrarbeiten bzw. sonstige Arbeitsgeräusche nicht eindeutig interpretiert werden. Möglicherweise ist dieser Anstieg als Vorwarnzeichen zu werten. Die Abbildung zeigt außerdem um ca. 21h ein Maximum der Schall-



emissionsraten durch Schießen sowie den typischen exponentiellen Abfall der durch Spannungsumlagerungen ausgelösten Felsbruchgeräusche. Abb. 8 zeigt, daß unter günstigen Bedingungen (keine Bohrarbeiten in unmittelbarer Nähe der Schallemissionsapparaturen) auch während der Betriebsperioden in der Grube eine Vorwarnung möglich ist. Am rechten Rand sind die Bandbreiten (zwischen Minima und Maxima) der Schallemissionsraten in der Zeit von 21h-24h des Vortages zum Vergleich eingezeichnet. Die Vorwarnanzeichen bestehen in diesem Fall darin, daß ca. 2 Stunden vor dem Bergschlag stark schwankende und deutlich erhöhte Schallemissionsraten zu beobachten waren, während in der letzten Stunde vor dem Bergschlag außerdem besonders hohe und andauernde Schallemission (>1000 Imp/Min.) auftrat.

Abb. 9 zeigt ähnliche Vorwarnanzeichen, die ebenfalls während des Grubenbetriebes deutlich erkennbar waren. Ein hörbarer Entspannungsschlag um 16h10 war offensichtlich außerhalb der Reichweite der Apparatur. Aber für den Bergschlag um 21h gab es bereits ab 18h30 deutliche Vorwarnanzeichen (siehe zum Vergleich die Bandbreite für die Schallemissionsraten zwischen 0h und 5h).

Abb. 10 zeigt zwei weitere Vorwarnbeispiele für arbeitsfreie (ruhige) Tage mit sehr deutlichem und mehrfachem Ansteigen der Schallemissionsraten. Der gefährliche Gebirgszustand war bereits einige Tage vor dem 27.3.82 durch nur langsames exponentielles Abklingen der Schallemissionsraten nach dem Schießen erkennbar. Am Tage des Bergschlages wurden große Bruchereignisse bereits um ca. 1h15, 2h15 sowie um 7h15 registriert. Um 10h25 wurde obertags ein starker Entspannungsschlag registriert, der Bergschlag selbst mit 5 t Hauwerksfall erfolgte möglicherweise zu einem anderen Zeitpunkt (z.B. 7h15 ?).

Abb. 11 zeigt, daß auch bei reduzierter Verstärkung und erhöhter Diskriminatorschwelle an einem ruhigen, arbeitsfreien Samstag gelegentliche Felsbruchgeräusche (mit sehr hoher Amplitude) registriert werden. Die Amplitude dieser Felsbruchgeräusche entspricht ungefähr der Amplitude von Bohrgeräuschen innerhalb der 50 m Reichweite der Schallemissionsapparaturen. Bis jetzt liegen aber noch zu wenig Meßresultate dieser Art vor, um den Vorhersagewert derart hoher Schallemissionssignale beurteilen zu können.

Bald nach der Beendigung des intensiven Versuchsbetriebes verlangsamte sich die Abbautätigkeit im Überwachungsbereich auf ca. 1/3 des vorherigen Tempos. Es kam innerhalb des Überwachungsbereiches kaum mehr zu Bergschlägen und die Schallemissionsapparatur wurde daher nur zwecks Prüfung der Betriebssicherheit in Betrieb gelassen. Einmal wurde durch Blitzschlag die Kabelverbindung zum Grubeneingang unterbrochen, ein anderes Mal wurde ein Kabel zum Vorverstärker durch mechanische Gewalteinwirkung abgetrennt. An der Anlage selbst traten bis Anfang 1984 keine Defekte auf.

#### **4. Diskussion und Zusammenfassung**

Die bisherigen Ergebnisse können, wie folgt, zusammengefaßt werden:

1. Beide Apparaturen (Geophon- und Piezoanlage) sind imstande, Felsbruchgeräusche innerhalb einer Reichweite von 50 m in den Frequenzbereichen 1 - 2 kHz sowie 2 - 5 kHz mit ausreichender Empfindlichkeit zu registrieren.
2. Beide Apparaturen sind gegen elektromagnetische Störsignale immun, werden aber durch Bohrarbeiten innerhalb einer Distanz von ca. 100 - 200 m gestört.
3. Das in der Grube auftretende Gesteinsmaterial (Kalk) zeigt bei Versuchen im Labor das der Theorie entsprechende Verhalten, nämlich eine frühe und deutliche Bruchvorwarnung durch Anstieg der Schallemissionsrate.
4. Die in der Grube meßbaren Schallemissionen zeigen im Vergleich zu Großbauwerken einen wesentlich höheren Untergrundpegel (ca. 1000-fach), der vermutlich durch Reibungsgeräusche in den zahlreichen Rissen und Klüften zu erklären ist.
5. Aus der Theorie folgt ein wesentlicher Unterschied in bezug auf die praktisch erforderliche Bruchvorwarnung in einem Bergwerk im Vergleich zu einem Großbauwerk. Bei einem Großbauwerk genügt eine Warnung vor einer Annäherung an eine instabile Bruchsituation. Ein Bergwerk be-

findet sich häufig andauernd jenseits der stabilen Bruchsituation und erfordert eine Vorwarnung in bezug auf den tatsächlichen Einsturzzeitpunkt. Dies ist ein wesentlich schwierigeres Problem !

6. Von den während des Versuchsbetriebes insgesamt beobachteten und in der Tabelle gelisteten 35 hörbaren Schlägen waren zehn gefährliche Bergschläge und mit Hauwerksfall zwischen 2 und 120 Tonnen verbunden:

Zwei dieser Bergschläge lagen eindeutig außerhalb des Überwachungsbereiches und wurden daher zu Recht von der Apparatur nicht angezeigt (27. und 28.1.82).

Drei dieser Bergschläge wurden durch Schallemissionsmaxima mindestens eine Stunde vorher angezeigt (Abb. 8-10).

Drei dieser Bergschläge wurden durch Anstieg der Schallemissionsminima einige Tage vorher indirekt angekündigt (19.12.81 bis 7.1.82).

Zwei dieser Bergschläge waren durch Bohrarbeiten maskiert (13. und 22.1.82).

Dies entspricht einer Erfolgsrate (mindestens 3 von 8), die in Anbetracht der wechselnden elektronischen Einstellungen und der noch nicht abgeschlossenen Optimierung der Apparaturen als ermutigendes Resultat zu betrachten ist.

7. Die Vorwarnzeichen sind zur Zeit noch nicht deutlich genug, um eine sofortige Erkennung am Schreiberstreifen durch das Grubenpersonal zu gewährleisten. Anstiege der Schallemissionsraten wären in linearer Darstellung wesentlich deutlicher zu erkennen. Die zahlreichen Ruhephasen sind hingegen wieder nur in logarithmischer Darstellung erkennbar. Bohrgeräusche können zur Zeit noch zahlreiche Fehlalarme verursachen.
8. Die piezoelektrischen Schallaufnehmer scheinen weniger Vorwarnzeichen zu registrieren als die Geophone. Dies entspricht nicht den theoretischen Erwartungen. Es ist

möglich, daß die unterschiedlichen akustischen Ankopplungen (geklemmt/einzementiert) bzw. die unterschiedlichen Schwingungsachsen (parallel/senkrecht) zur Kluftebene die eigentlichen Ursachen für diese Beobachtung sind.

9. Es wird vorgeschlagen, in der nächsten Projektphase (eventuell in einem anderen Überwachungsbereich) folgende Ziele zu verfolgen:

- Wesentliche Verlängerung des Versuchsbetriebes zwecks vollständiger Optimierung der Apparaturen.
- Versuche mit empfindlicheren piezoelektrischen Aufnehmern mit Schwingungsachse senkrecht zur Kluftebene.
- Versuche bei höherer Frequenz und bei höheren Amplituden, um, wenn möglich, auch während der Bohrarbeiten messen zu können.
- Einsatz verbesserter Signalprozessoren mit Ausgabe der Ortsverteilung über Drucker.
- Zusätzlicher Einsatz einer transportablen Apparatur, um mehr Erfahrung in kritischen Abbaubereichen zu gewinnen.

**Literatur:**

- (1) Eder O. J., Hick H., Schmeskal T.,  
Schwara R., Werbik C., Zagiczek S.:  
Schallemissions-Versuchsmessungen zur Bergschlagfor-  
schung in der Grube Stefanie (Bleiberg Bergwerks-Union  
AG), 1. Teil (1980). - SGAE Ber.No. A0122 (PH-301/80)  
Mai 1980 (Vertraulich).
- (2) Hick H.:  
Entwicklung der Schallemissionsmeßtechnik  
am Physikinstitut (1977 - 1981). -  
OEFZS-Bericht No.A0265 (PH-330/81), Oktober 1981.
- (3) Hick H., Schmeskal T., Schwara R., Zagiczek S.,  
Witort P.:  
Schallemissions-Versuchsmessungen zur Bergschlagfor-  
schung in der Grube Stefanie (Bleiberg Bergwerks-Union  
AG), 2. Teil (1981 - 1982). -  
OEFZS-Bericht A 0307-PH-340/82 (Vertraulich)
- (4) Hick H., Schmeskal T., Schwara R., Zagiczek S.,  
Werbik C., Nemet J., et al.:  
Untersuchung zur sicherheitstechnischen Überwachung so-  
wie zur Fehlerauffindung mittels Schallemissionsanalyse  
für Bauwerke aus Spannbeton. -  
OEFZS-Bericht A0404-PH-365/83
- (5) Hick H.:  
Anwendbarkeit der Schallemissionsanalyse auf sicher-  
heitstechnische Probleme der Felsmechanik. -  
OEFZS-Bericht A0335-PH-347/82
- (6) Vargas C. A., Minzoni A., Singh S. K.:  
Far-Field Displacements from a Rectangular Fault with  
Two Rupture Velocities. -  
Pure and Applied Geophysics 118 (1980), pp. 990-1006
- (7) Bieniawski Z. T.:  
Mechanism of Brittle Fracture of Rock, Parts 1 - 3. -  
Int.J.Rock Mech.Min.Sci. Vol.4, 1967

(8) Brady B. T.:

Theory of Earthquakes

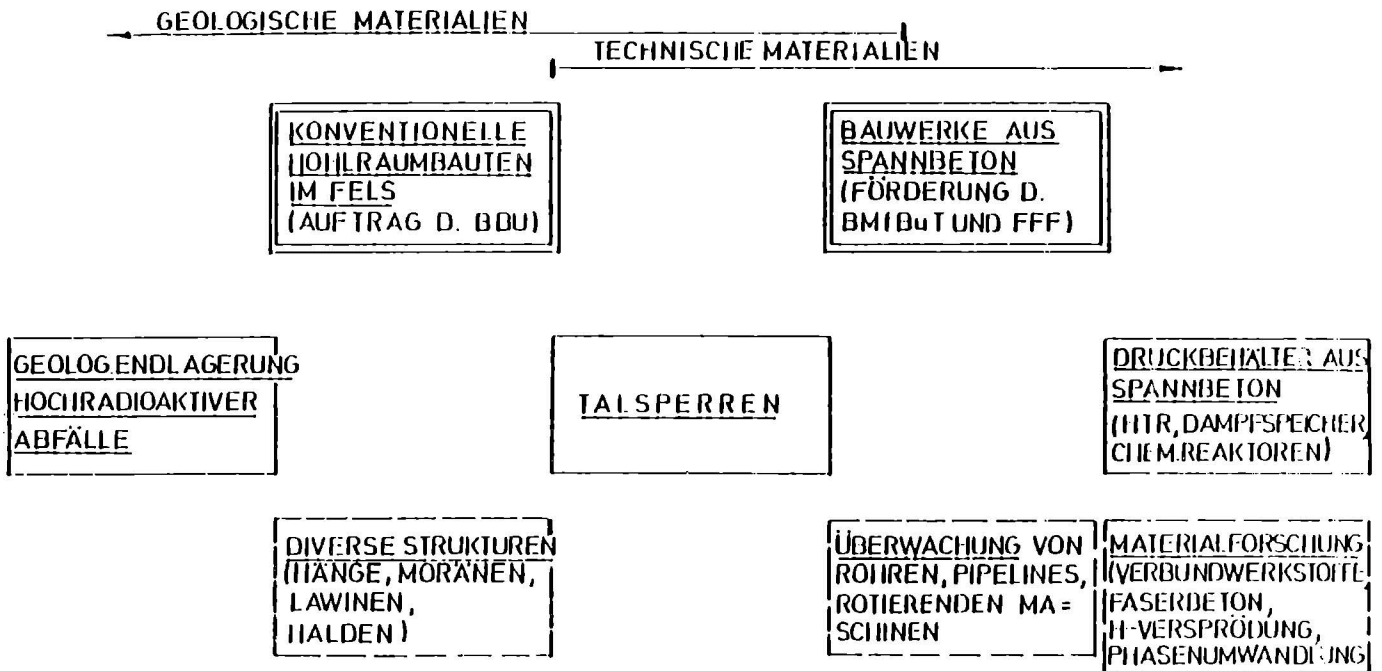
I - A Scale Independent Theory of Rock Failure

II - Inclusion Theory of Crustal Earthquakes

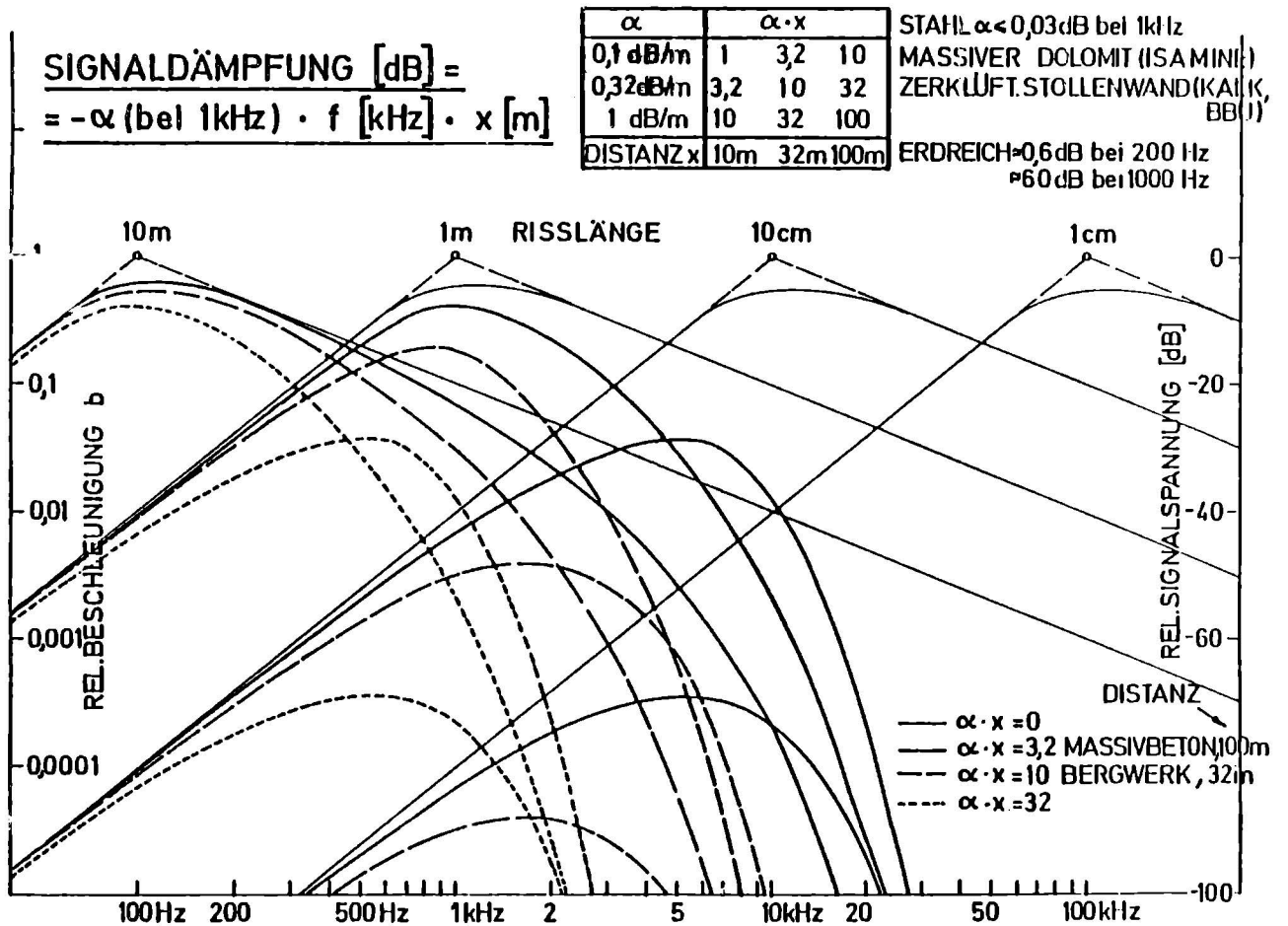
III - Inclusion Collapse Theory of Deep Earthquakes

IV - General Implications for Earthquake Prediction. -

Pure and Applied Geophysics 112 (1974), 113 (1975), 114 (1976), 115 (1976).



**Abb. 1: Sicherheitstechnische Überwachung großer Bauwerke (Arbeitsbereiche des OEFZS)**



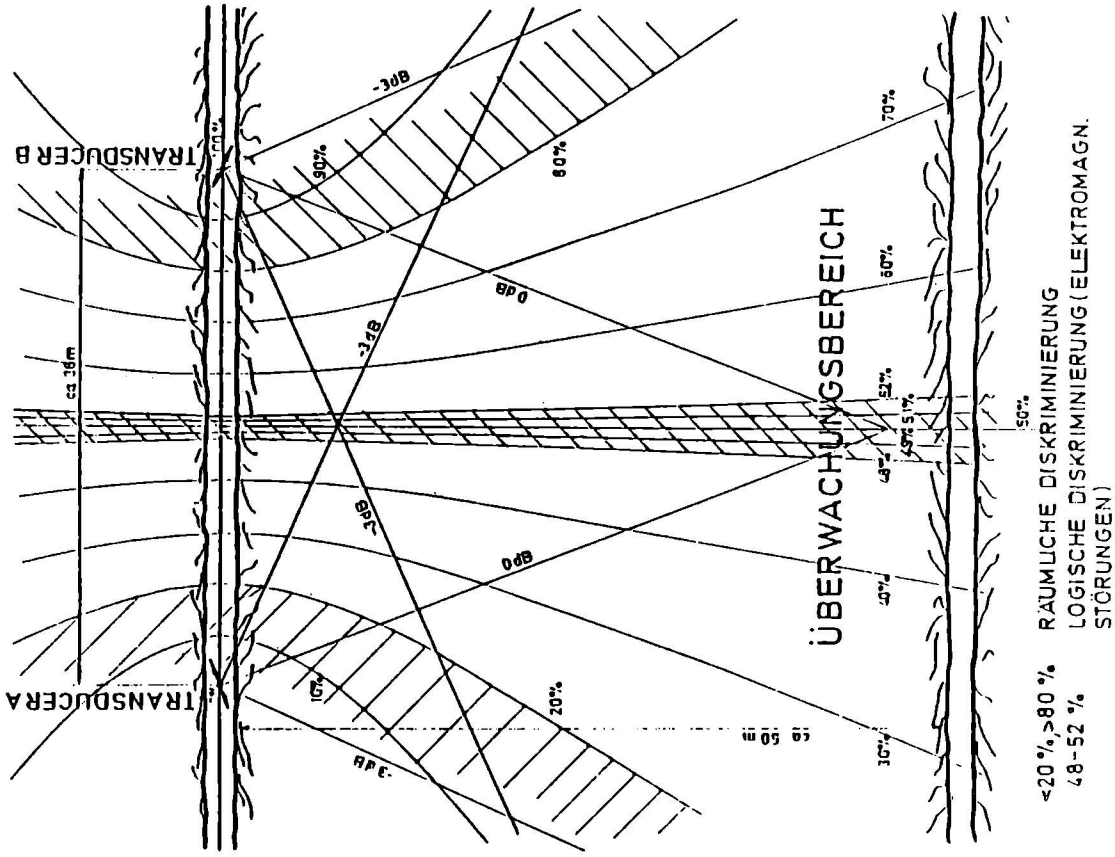


Abb. 4: Anordnung der Überwachungsanlagen in der Grube Stefanie (BBU)

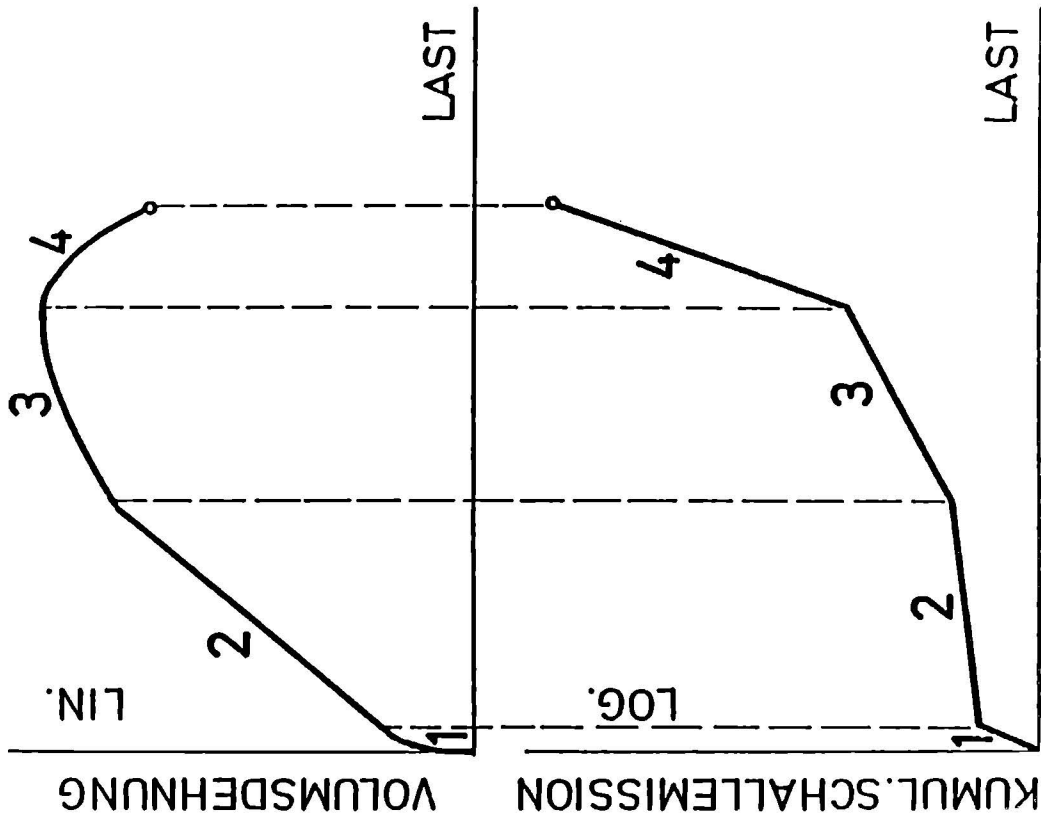


Abb. 3: Volumsdehnung und Schallemission von Beton bzw. Gestein beim Belastungsversuch



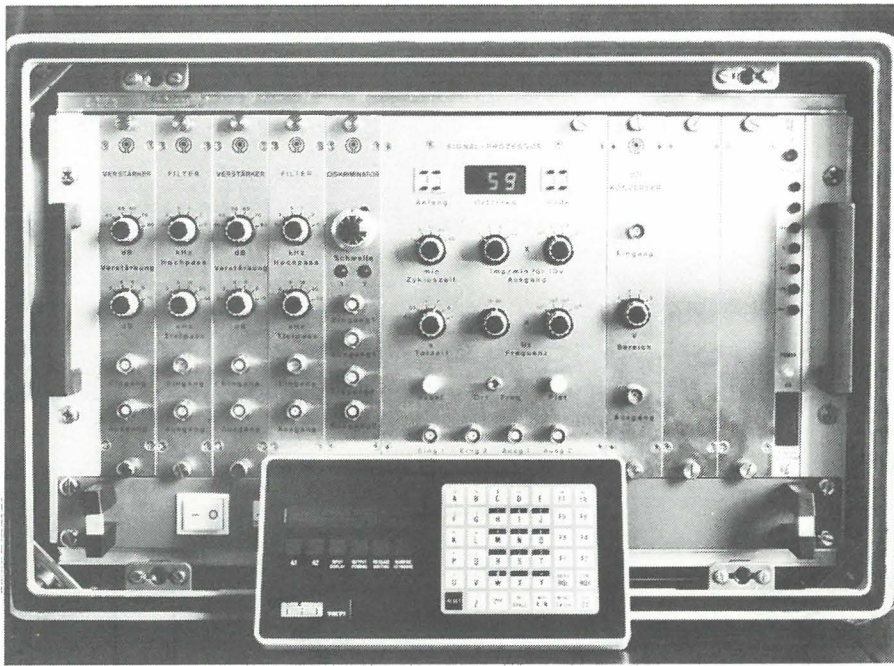


Abb. 5: Ansicht der Überwachungsanlage

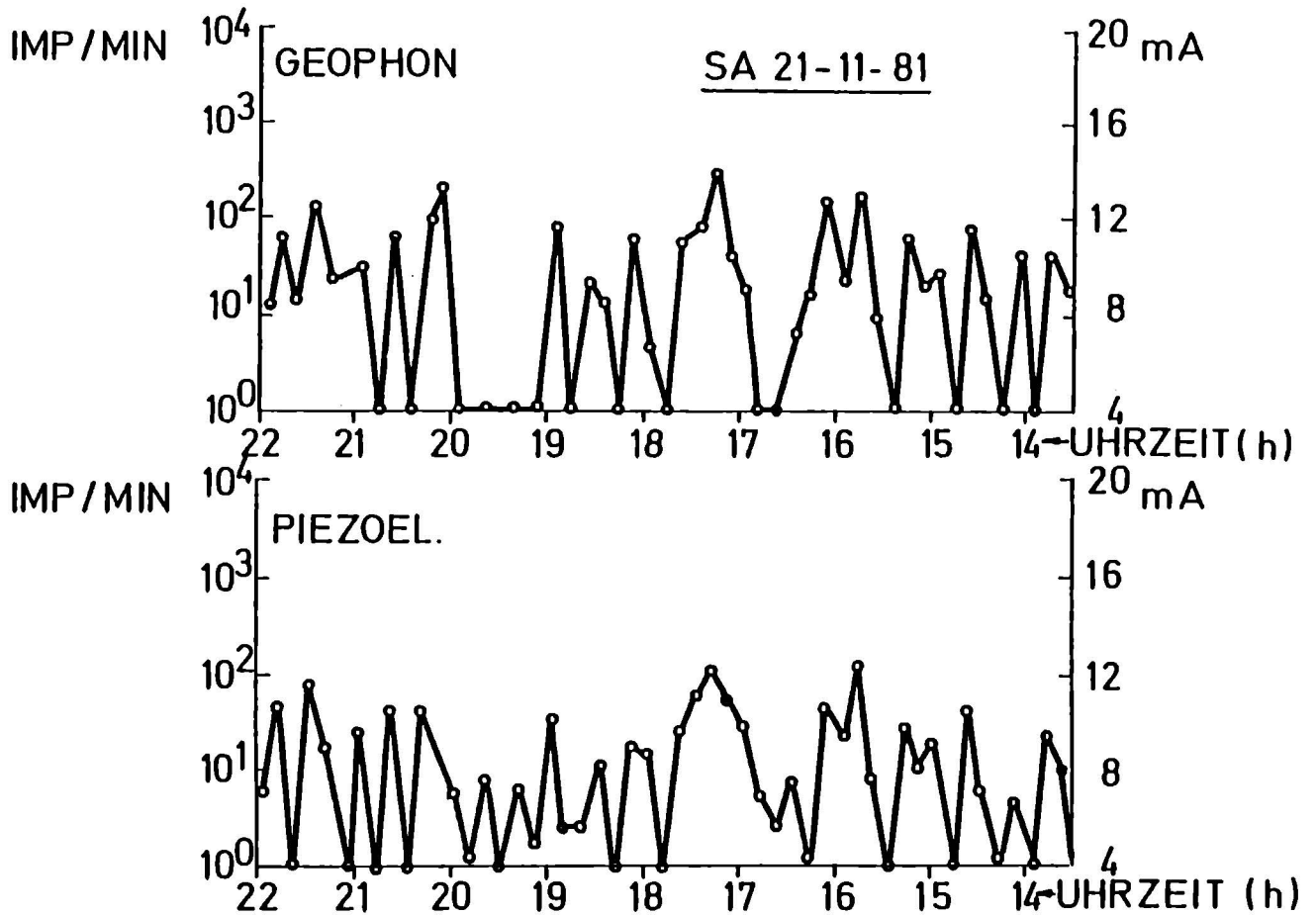


Abb. 6: Typische Schallemission während einer Ruheperiode (Samstag 21. Nov. 1981)

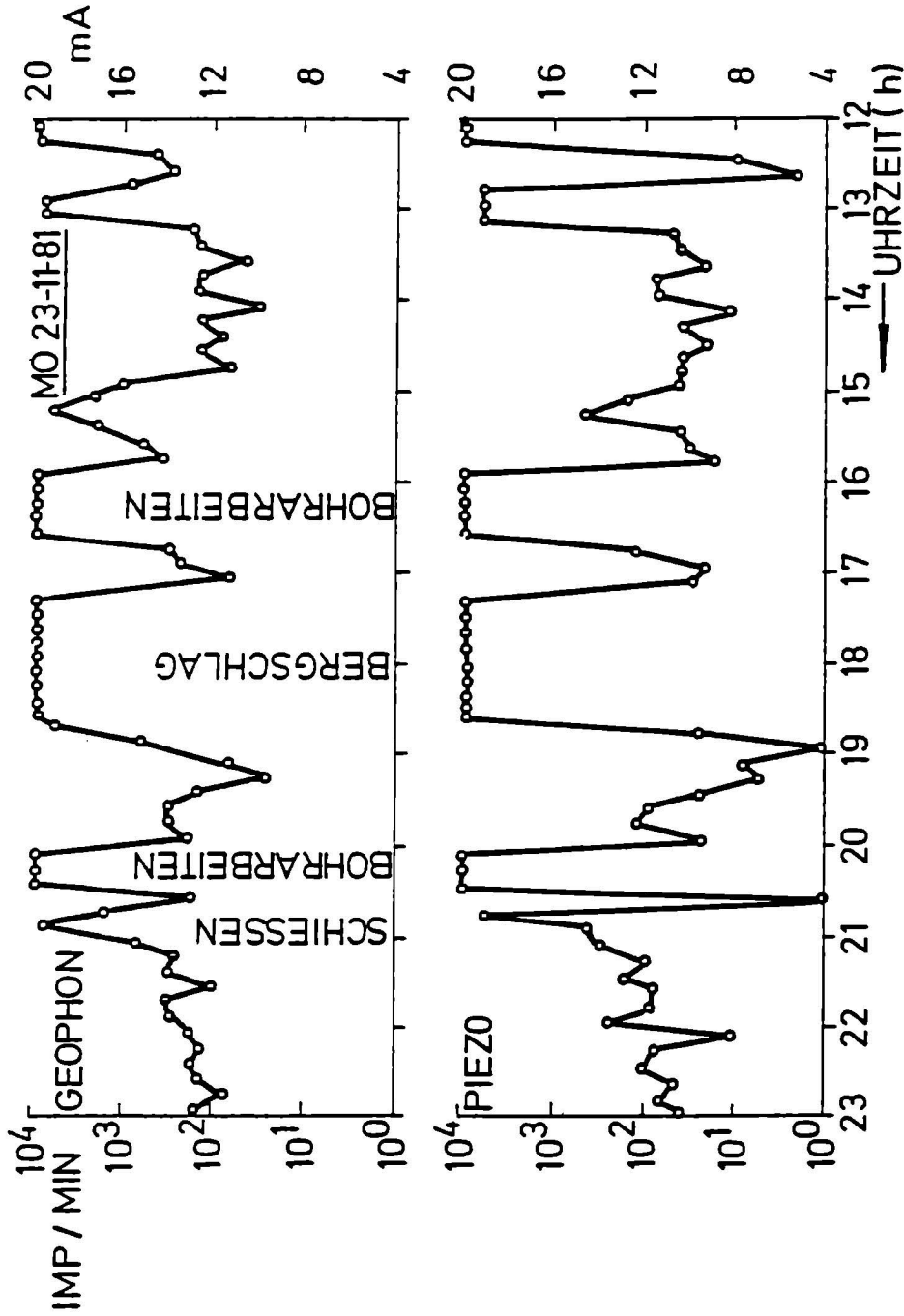


Abb. 7: Bergschlag (durch Bohrarbeiten maskiert), Schießen mit exponentiellem Abfall (Montag 23. Nov. 1981)

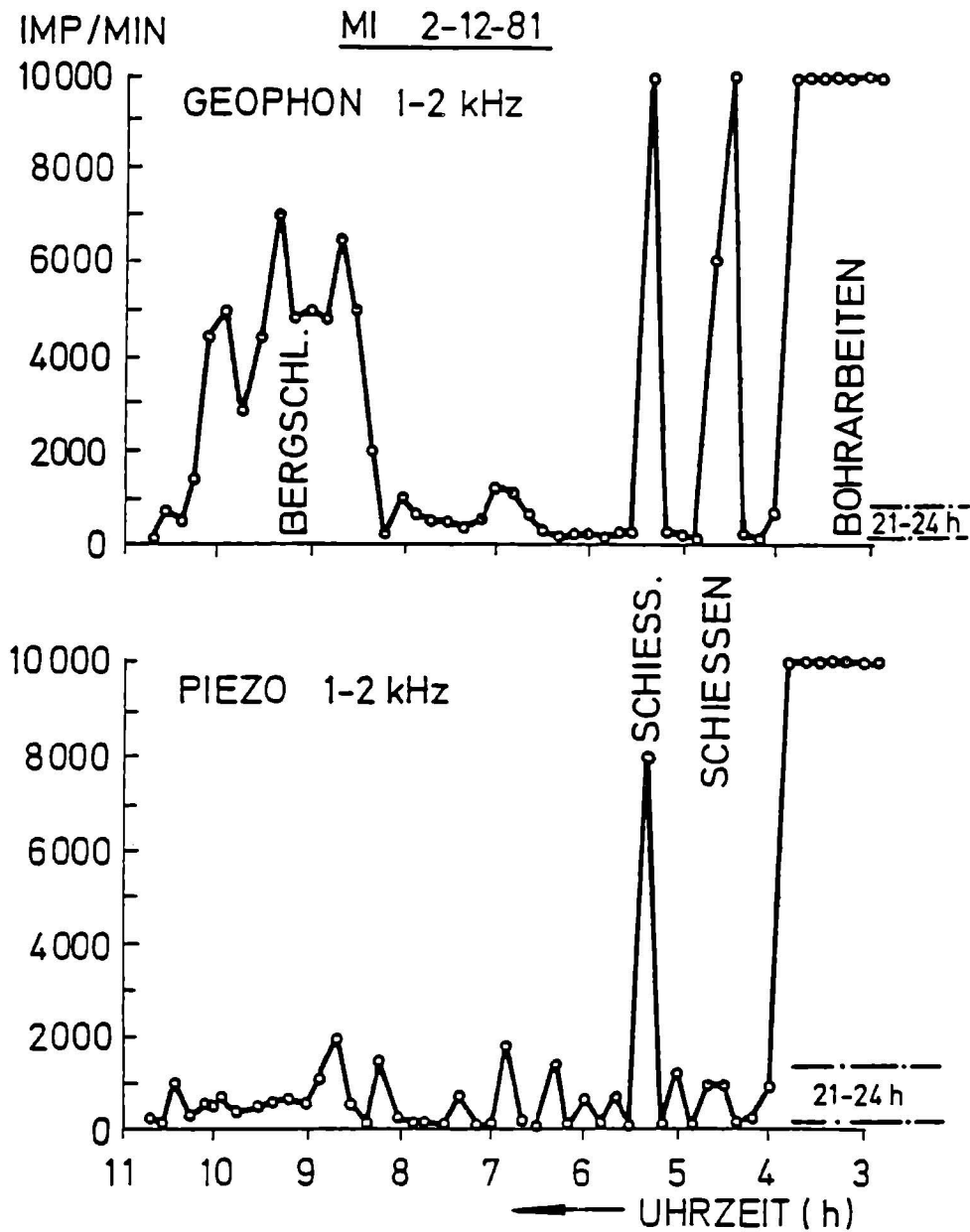


Abb. 8: Schallemission vor Bergschlag (lin.)

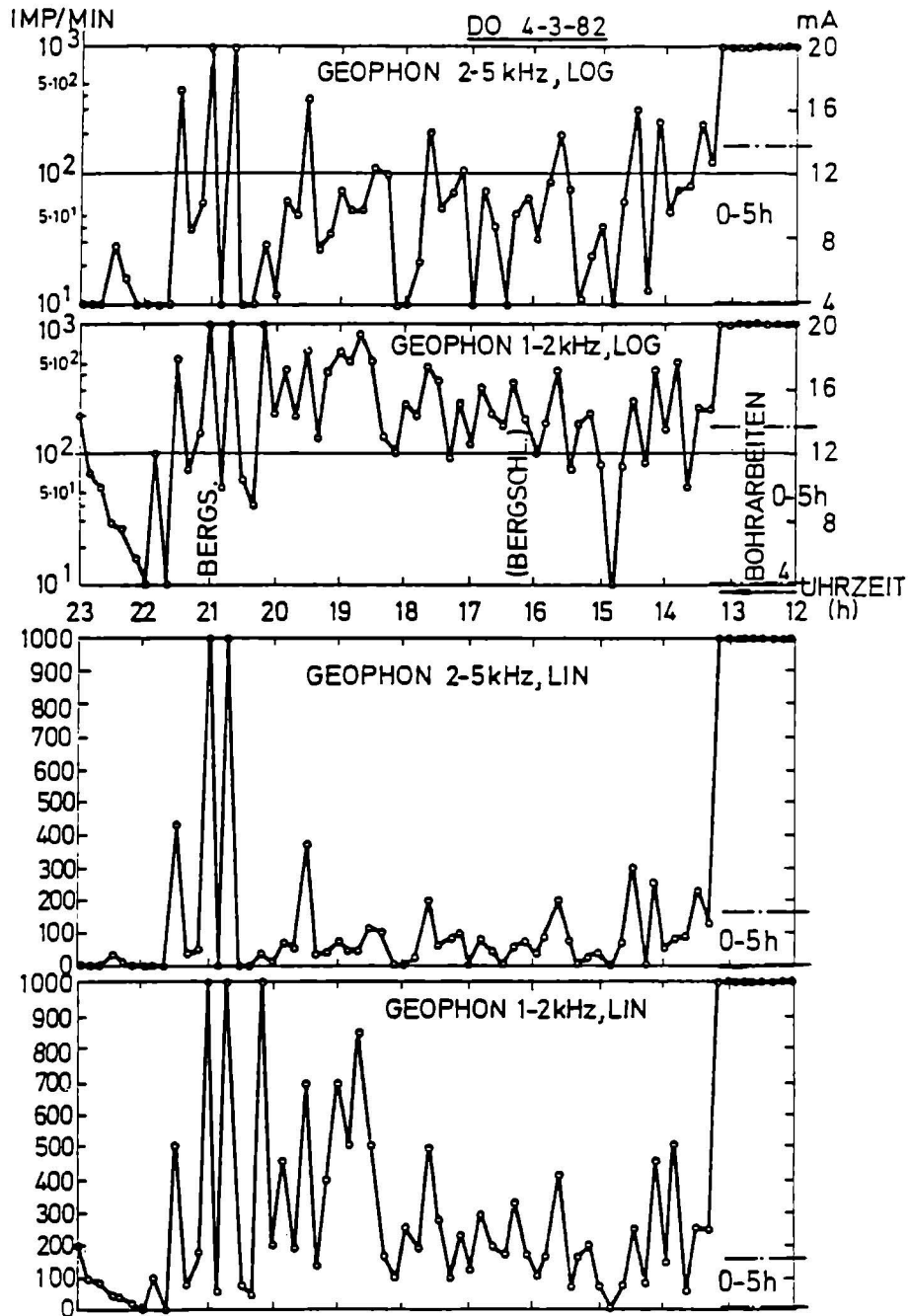


Abb. 9: Vorwarnung vor Bergschlag durch Anstieg bzw. stark schwankende Schallemissionsrate (Donnerstag 4. März 1982)

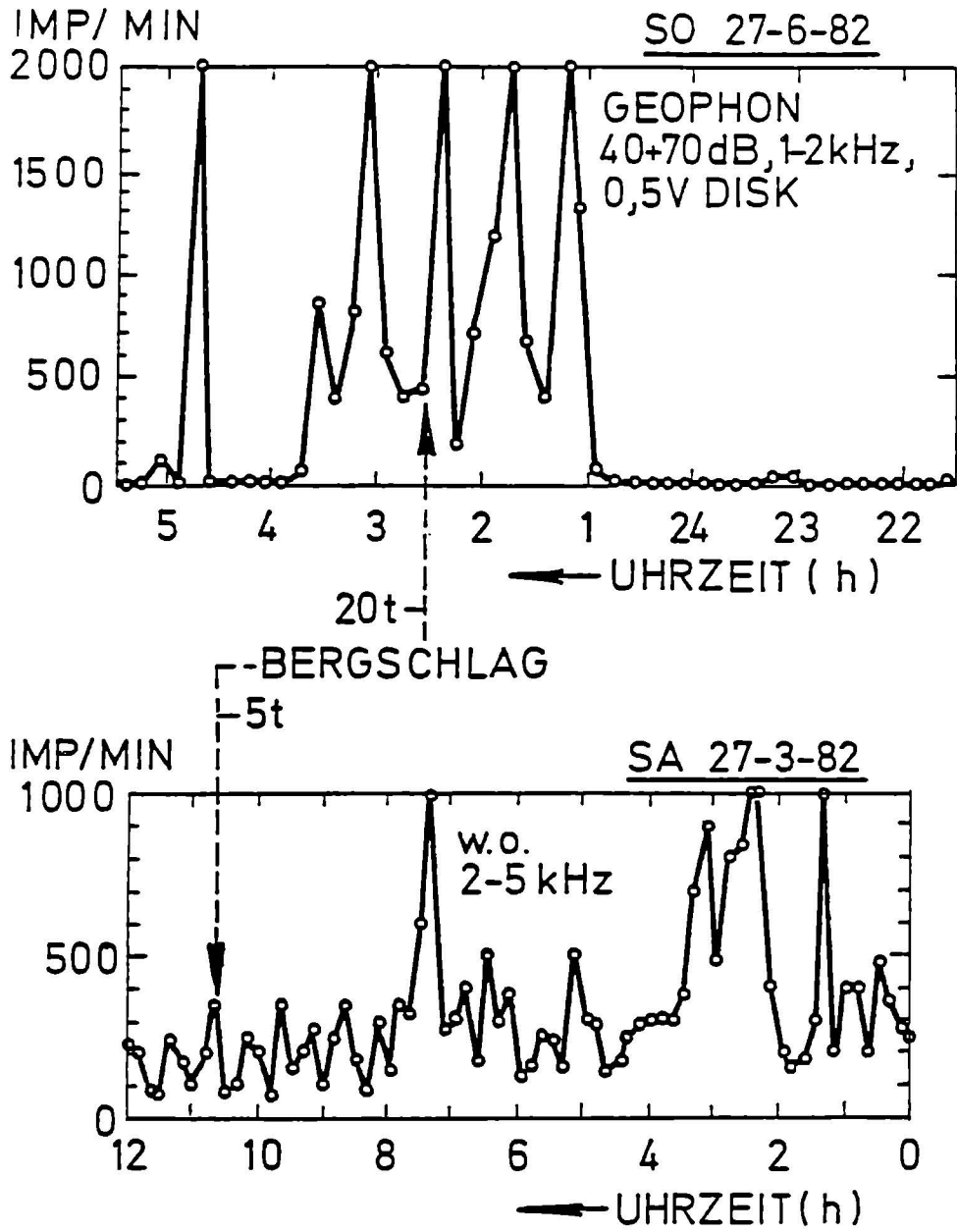
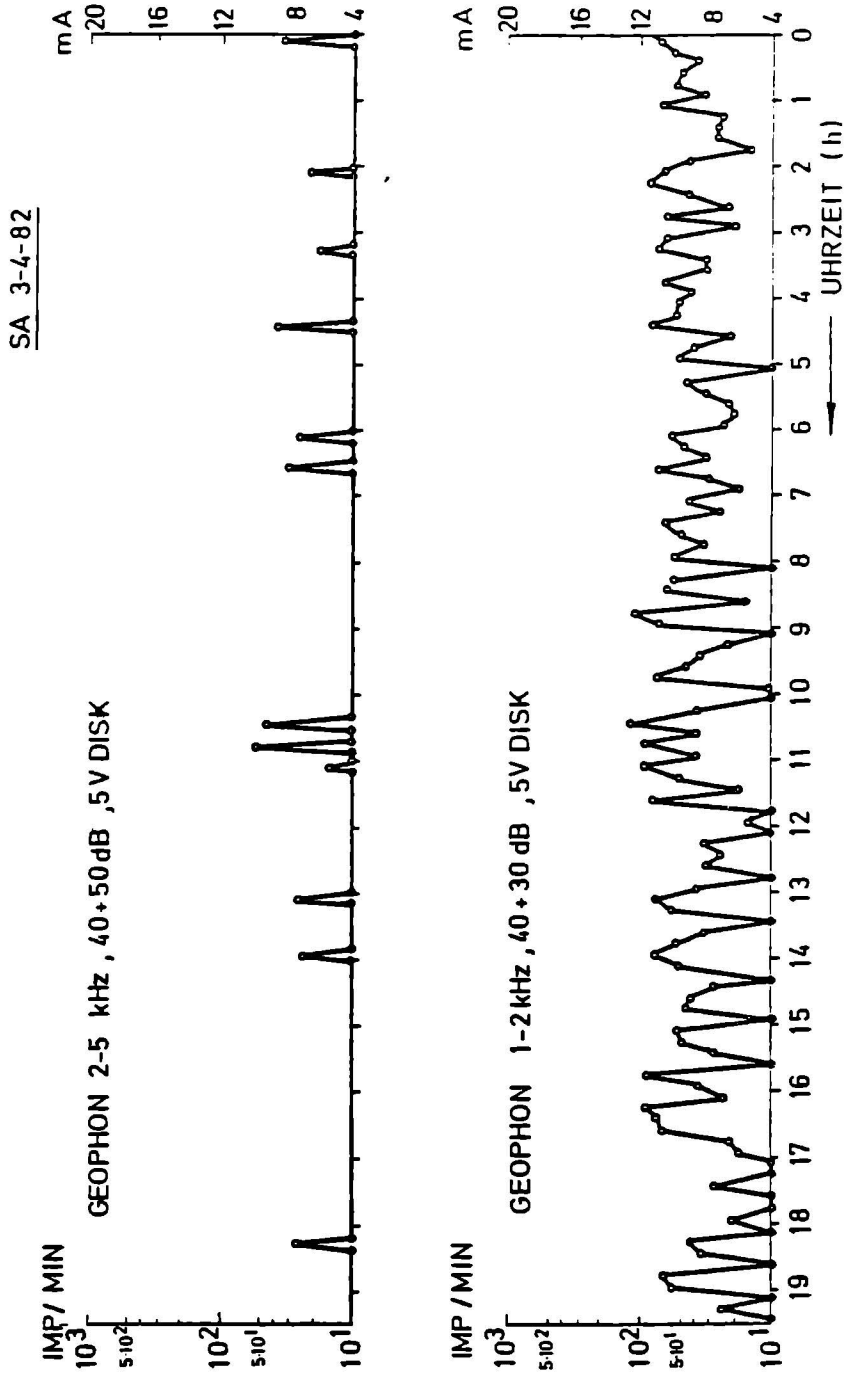


Abb.10: Beispiele von Bergschlag-Vorwarnungen



**Abb.11: Schallemissionsraten von Felsbruchgeräuschen hoher Amplitude**  
(Samstag 3. April 1982)

**TABELLE 1**

**VERZEICHNIS DER BEOBACHTETEN BERGSCHLÄGE**  
(akustisch bzw. auf Grund von Hauwerksfall)

DATUM	UHRZEIT	ORT	HAUWERKS- FALL	BEMERKUNGEN IN BEZUG AUF VORWAR- NUNGSANZEICHEN
23.11.81	18.00	12. Lauf/Eism.Ost		durch Bohrarbeiten maskiert Abb. 7
24.11.81	17.10	12. Lauf/Eism. Ost		Abb. 7
25.11.81	20.45	12. Lauf/Eism. Ost		durch Bohrarbeiten teilweise maskiert
2.12.81	9.15	12. Lauf/Eism. Ost	2 to	VORWARNUNG, siehe Abb. 8
	S 8.58	S = seismisch registriertes Ereignis		
19.12.81	19.12	unbekannt		VORWARNUNG durch Minima (mit exponentiellem Abfall)
	S 19.18			
21.12.81	6.00	13. Lauf Oststrecke	20 to	VORWARNUNG durch Minima außerhalb der Reichweite? (kein exp. Abfall)
	S 5.46			
	13.00	13. Lauf/Oststrecke	20 to	VORWARNUNG durch Minima, durch Bohrarbeiten und Schießen maskiert (kein exp. Abfall)
	S 13.00			
22.12.81	3.07	unbekannt		außerhalb der Reichweite? (kein exp. Abfall)
	S 3.01			
7.1.82	18.00	12. Lauf/Eism. SW	100 to	VORWARNUNG durch Minima
	21.07	12. Lauf/Eism. SW		
13.1.82	12.12	13. Lauf/Eism. Ost	70 to	durch Bohrarbeiten maskiert
19.1.82	21.02	13. Lauf/Oststrecke		durch Bohrarbeiten und Schießen mask. (exp. Abfall)
20.1.82	20.47	13. Lauf/Eism. Ost		durch Bohrarbeiten und Schießen mask. (exp. Abfall)
21.1.82	12.17	13. Lauf/Oststrecke		durch Bohrarbeiten maskiert (exp. Abfall)

DATUM	UHRZEIT	ORT	HAUWERKS- FALL	BEMERKUNGEN IN BEZUG AUF VORWAR- NUNGSANZEICHEN
22.1.82	9.25 15.55	13. Lauf/Oststrecke 13. Lauf/Oststrecke	70 to	durch Bohrarbeiten maskiert
27.1.82	10.15	9. Lauf	8 to	außerhalb der Reichweite
28.1.82	11.32	13. Lauf/Oststrecke	120 to	außerhalb der Reichweite (kein exp. Abfall)
25.2.82	7.10 S 7.10	unbekannt		SEA-Apparaturen außer Betrieb
4.3.82	16.10 S 16.10 S 21.00 S 21.02	unbekannt 12. Lauf/Eism. Ost		nicht registriert VORWARNUNG, siehe Abb. 9
9.3.82	11.35 S 11.22 S 11.35 23.02	12. Lauf/Eism. Ost unbekannt		durch Bohrarbeiten maskiert nicht registriert
27.3.82	10.25	13. Lauf/Ost	5 to	VORWARNUNG, siehe Abb. 10
30.3.82	13.32	unbekannt		nicht registriert

ANMERKUNG: Der genaue Ort eines Bergschlages ist nur nach Feststellung von Hauwerksfall bekannt. Ohne Angabe von Hauwerksfall beziehen sich die Ortsangaben auf die Hörbarkeit des Bergschlages.



## DISKUSSION

### H. Janschek:

Für Untersuchungen haben sich Geophone gegenüber piezoelektrischen Aufnehmern besser bewährt. Hier herrscht ein großer Unterschied zwischen Theorie und Praxis. Theoretisch müßte den piezoelektrischen Aufnehmern der Vorzug gegeben werden, es wurden jedoch bessere Ergebnisse mit Geophonen erzielt. Die Forschung hat die Diskrepanz zwischen Ansteigen der Mikrogeräuschintensität und Absinken der makroskopischen Geräuschetätigkeit bisher nicht geklärt.

### H. Hick:

Im allgemeinen tritt vor den Gebirgsschlägen ein Ansteigen der Mikrogeräuschintensität ein, weil ein Anstieg der mechanischen Spannung zu vermehrter Mikrorißbildung führt. Ein Absinken der makroskopischen Geräuschetätigkeit zufolge Deformation und Reibung kann dem vorausgehen.

### H. Rainer:

Der Zeitabstand zwischen Geräuschintensitäten und Bergschlagereignissen ist sehr variabel.

### H. Wagner:

Zu den Messungen sei bemerkt, daß man nicht allein die Geräuschintensität zur Vorhersage erfassen soll, sondern auch die Energie. Seismoakustische Beobachtung auf dem Goldbergwerk "Western Deep Levels" haben gezeigt, daß der Energieinhalt der seismoakustischen Signale vor einem Gebirgsschlag zunimmt. Weiterhin ist es entscheidend, daß die räumliche und zeitliche Konzentration der seismoakustischen Aktivitäten ausgewertet wird. Eine Zunahme der Aktivität ohne räumliche Konzentration wird als nicht kritisch beurteilt.

### H. Weber:

Wie Prof. Feder anhand seiner Dias zeigte, hängt die Art der Brüche im Gestein und im Gebirge zufolge Überbeanspruchung unter anderem sehr wesentlich gerade von der Art sowie vom

Zustand des Gebirgs ab. Gleiches müßte für das Auftreten vom Bergschlag gelten. Da ich annehme, daß für die Schallemissionsmessungen von Dr. Hick zwecks Bergschlagprognose geotechnische Gesteins- und Gebirgsuntersuchungen nicht ausgeführt wurden, schlage ich derartige Untersuchungen vor. In diesem Zusammenhang bedaure ich die Einstellung der Arbeiten des seinerzeitigen Arbeitskreises "Technische Gebirgsbeschreibung" beim BVÖ.