

Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr. Müller
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

**Entwicklung eines Verfahrens zur definierten Berechnung
von Gewinnungssprengungen und deren
Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der
Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit**

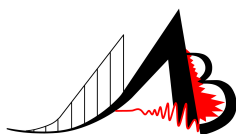
Abschlussbericht über ein Projekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen: 24578-21/0
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Doz. Dr.-Ing. Bernd Müller
Dipl.-Geol. Jörg Haumann
Dipl.-Ing. Helge Niedzwiedz

Prof. Dr. Carsten Drebenstedt
Dipl.-Ing. Juraj Ortuta
Dr.-Ing. Thomas Martienßen

Leipzig, Juni 2009



Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr.-Ing. habil. Bernd Müller

Wiesenring 2
04159 Leipzig

Telefon: +49 (0) 341 – 3 58 70 30
Fax: +49 (0) 341 – 3 58 88 69
e-Mail: dr.b.mueller@t-online.de

TU Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Gustav-Zeuner-Str. 1A
09596 Freiberg

Telefon: +49 (0) 3731 – 39 31 80
e-Mail: drebenst@mabb.tu-freiberg.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|-----------|--------------|----------------|--------------|--------------------|---------------------|
| Az | 24578 | Referat | 21/09 | Fördersumme | 124.000,00 € |
|-----------|--------------|----------------|--------------|--------------------|---------------------|

Antragstitel **Definierte Berechnung von Gewinnungssprengungen und deren Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit**

Stichworte

| | | | |
|----------------------------|-------------------|-------------|-----------------|
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
| 2 Jahre und 1 Monat | 14.02.2007 | | |

Zwischenberichte (Kurzberichte)

August 2007, Februar 2008, August 2008

Bewilligungsempfänger

Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr. Müller
- Movement and Blasting Consulting -
< Doz. Dr. Ing. habil., Dipl.-Geol. B. Müller >
Wiesenring 2
04159 Leipzig

Tel 0341/3587030

Fax 0341/3588869

Projektleitung

Dr. B. Müller

Bearbeiter

Hausmann, Müller, Niedzwiedz et.al.

Kooperationspartner

Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau/Spezialtiefbau
Prof. Dr. Ing. C. Drebenstedt
Zeunerstraße 1
09596 Freiberg/Sa.

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die derzeitigen Verfahren zur Lademengenberechnung, Dimensionierung einer Sprenganlage für verschiedene Sprengziele und die Vorgehensweise für die Erarbeitung einer Erschütterungsprognose sind empirisch bzw. werden auf der Grundlage vereinfachter, physikalisch kritisch zu bewertender Zusammenhänge durchgeführt. Das Projekt befasst sich mit der besseren Beherrschung von Umwelteinwirkungen bei Gewinnungssprengungen und verfolgt die Zielstellung, ein innovatives, emissionsärmeres, energiesparendes sowie anpassungsfähiges Verfahren zur umweltfreundlichen Produktion von Baustoffen im Bereich der 1. Brechstufe „Sprengen im Festgebirge“ zu entwickeln.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In sechs Tagebauen werden 59 Sprengungen vorbereitet, messtechnisch begleitet und analysiert unter Beachtung gezielter Veränderungen der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik. Nach Erfassung der messtechnischen Parameter vom Istzustand werden die eingetretenen Verbesserungen durch Änderung wichtiger sprengtechnischer Größen beurteilt. Dazu wird ein Komplex mit neuen, innovativen Messverfahren wie Laserscanner, Radarsensor, Dehnungssensor, Detonationsgeschwindigkeitsmessgerät, Ultraschallgenerator, Geophone einschließlich einer händischen Klufferfassung und Haufwerkskorngößenanalyse eingesetzt, mit dem systematisch alle wichtigen, bis zu 119 Einzeldaten je Sprengung erfasst werden. Auf diese Weise erhält man eine objektive, vielfältig nutzbare Datensammlung, mit der statistische Untersuchungen, Vergleiche und Interpretationen neuer Wirkprinzipien möglich werden. Das Kernstück der Untersuchungen bildet die Erarbeitung eines realistischen, praktisch nutzbaren physikalischen Modells.

Ergebnisse und Diskussion

Das gesteckte Ziel, ein innovatives, emissionsärmeres, wirtschaftlich verbesserndes sowie ökologisch anpassungsfähiges Verfahren zur umweltfreundlichen Produktion von Baustoffen aus gebrochenen Natursteinen im Bereich der 1. Brechstufe eines Tagebaues „Sprengen im Festgebirge“ zu erarbeiten, konnte mit den komplexen und vielfältigen Messungen sowie Analysen erreicht werden. Aus organisatorischen und betrieblichen Gründen musste die Anzahl der Sprengungen etwas differenziert und verändert werden. Ein Tagebau wurde auf Bitten der Felswerke zusätzlich einbezogen, so dass der ursprüngliche, geplante Aufwand erheblich anstieg.

Den größten Einfluss auf die Sprengbarkeit und energetische Umsetzung des Sprengstoffes haben die vorhandenen Trennflächen. Die gemessenen P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Gesteine sowie Detonationsgeschwindigkeiten der Sprengstoffe gestatten erstmals die Einordnung in die super-, trans- oder subsonische Stoßwellenausbreitung. Von der supersonischen Stoßwellenausbreitung zur subsonischen nimmt die zertrümmernde Wirkung ab und die Erschütterungen steigen an. Mit dem entwickelten physikalischen Modell einer Sprengung kann die Sprengenergie besser ausgenutzt werden und die Bohr-, Spreng- und Zündtechnik umweltfreundlicher, optimal in der Wirkung dimensioniert werden. Durch die Schwinggeschwindigkeits-, Dehnungs-Impuls- und Energieabstandsbeziehungen kann statistisch gesichert die Erschütterung beeinflusst und gesteuert werden, ohne dass das Sprengergebnis wirtschaftlich leidet. Werden die erzielten theoretischen und praktischen Ergebnisse in die Praxis umgesetzt, ist eine innovative, umweltfreundlichere, energiesparendere und umweltverträglichere Sprengtechnik möglich.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse sind teilweise bereits erschienen: Vorträge und Aufsätze in der *Spreng-Info* 07, 08, 09, EFEE^{*)}-Tagung Wien 2007, TU Bergakademie 2009, HTW-Dresden 2008, FRAGBLAST 9 in Granada 2009 mit Workshop Erschütterungen; Vorschläge zur Änderung der DIN 4150, Teil 1 und 3; Aufsätze in der Zeitschrift FRAGBLAST der ISEE^{**)}

^{*)} EFEE = European Federation of Explosives Engineers (Europäischer Sprengverband);

^{**)} ISEE = International Society of Explosives Engineers (Internationaler Sprengverband, USA)

Fazit

Die wesentlichen Ziele des Forschungsprojektes wurden erreicht. Die komplexe messtechnische Begleitung hat eine solide Basis für die Untersuchungen gebildet, ohne dass alle verfügbaren Daten vollständig ausgewertet werden konnten. Es ergeben sich weitere Lösungsansätze mit den Dehnungs- und Radarmessungen, die die physikalischen Zusammenhänge tiefgründiger und mit mehr statistisch gesicherten Daten ermöglichen. Die Wirkungen der super-, trans- und subsonischen Stoßwellendurchgänge gilt es weiter zu ergründen. Die Verzögerungszeit und deren Auswirkungen sollten bei künftigen Forschungsarbeiten als offenes Problem im Komplex untersucht werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | 2 |
| Verzeichnis der Bilder | 4 |
| Verzeichnis der Tabellen | 8 |
| Liste der Symbole..... | 10 |
| Griechische Symbole | 12 |
| Zusammenfassung | 14 |
| 1 Einleitung und Veranlassung | 16 |
| 2 Stand der Technik und Ziele der praxisorientierten Forschung | 17 |
| 2.1 Derzeitiger Stand der Technik zur Dimensionierung der Sprenganlagen und Beurteilung von Erschütterungen | 17 |
| 2.2 Zielstellung und Umweltrelevanz der Forschungsarbeiten | 20 |
| 2.3 Auswahl der Versuchsbetriebe und das Sprengziel | 24 |
| 3 Eingesetzte Messtechniken zur Erfassung wichtiger Eingangsgrößen | 27 |
| 3.1 Überblick..... | 27 |
| 3.2 Messung von gesteinsdynamischen Kenngrößen der Festgesteine | 28 |
| 3.3 Erfassung des Trennflächengefüges der Festgebirge | 33 |
| 3.4 Ermittlung der geometrischen Parameter und Entfernungen mit der Laser-Technik | 35 |
| 3.5 Messungen mit dem Radarsensor..... | 36 |
| 3.6 Erfassung der Detonationsgeschwindigkeit von Sprengstoffen in-situ..... | 38 |
| 3.7 Haufwerksanalyse..... | 39 |
| 3.8 Dehnungsmessungen mit dem FBG-Sensor..... | 41 |
| 3.9 Erfassung der Schwinggeschwindigkeit mit 3-Komponenten Geophonen | 45 |
| 3.10 Zusammenstellung der Eingangsparameter für die Untersuchungen..... | 45 |
| 4 Theoretische Grundlagen..... | 53 |
| 4.1 Objektive Beurteilung der Sprengbarkeit eines Festgebirges | 53 |
| 4.2 Anwendung der Prinzipien der Impulstheorie | 57 |
| 4.3 Physikalisches Modell der Wirkungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung..... | 59 |
| 5 Felsmechanische Gegebenheiten und Sprengbarkeit in den Versuchsbetrieben..... | 65 |
| 5.1 Tagebau Elbingerode | 65 |
| 5.1.1 Geologische Verhältnisse..... | 65 |
| 5.1.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit..... | 67 |
| 5.2 Tagebau Görzdorf | 68 |
| 5.2.1 Geologische Verhältnisse..... | 68 |
| 5.2.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit..... | 70 |
| 5.3 Tagebau Koschenberg | 71 |
| 5.3.1 Geologische Verhältnisse..... | 71 |
| 5.3.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit..... | 73 |
| 5.4 Tagebau Leukersdorf | 75 |
| 5.4.1 Geologische Verhältnisse..... | 75 |
| 5.4.2 Felsmechanische Gegebenheiten und Sprengbarkeit..... | 77 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.5 | Tagebau Lüptitz..... | 79 |
| 5.5.1 | Geologische Verhältnisse..... | 79 |
| 5.5.2 | Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit..... | 81 |
| 5.6 | Tagebau Winterberg..... | 82 |
| 5.6.1 | Geologische Verhältnisse..... | 82 |
| 5.6.2 | Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit..... | 84 |
| 6 | Steuerung der Zertrümmerung und des Abwurfes von Gewinnungssprengungen | 86 |
| 6.1 | Zusammenhänge und deren sprengtechnisch-energetische Interpretation | 86 |
| 6.1.1 | Trennflächenabstände als Haupteinfluss auf die Stückigkeit | 86 |
| 6.1.2 | Die Bedeutung gesteinsdynamischer Eigenschaften | 89 |
| 6.1.3 | Steuerung der Zertrümmerung | 92 |
| 6.1.4 | Beeinflussung des Abwurfs..... | 99 |
| 6.1.5 | Sonstige Einflüsse auf den Abwurf und die Auflockerung | 100 |
| 6.1.6 | Bemerkungen zur Zündverzögerung | 102 |
| 6.2 | Sprengpraktische Schlussfolgerungen und umweltrelevante Auswirkungen | 104 |
| 6.2.1 | Energiesparende Verbesserung der Stückigkeit und des Abwurfes | 104 |
| 6.2.2 | Verbesserung der Zertrümmerung durch Erhöhung des Energie-eintrages | 106 |
| 7 | Beeinflussung von Erschütterungen bei Gewinnungssprengungen | 108 |
| 7.1 | Bisheriges und das erarbeitete Modell zur Erschütterungsbeurteilung | 108 |
| 7.1.1 | Stand der Technik zur Erschütterungsbewertung | 108 |
| 7.1.2 | Neues Modell zur Erschütterungsprognose | 113 |
| 7.2 | Ergebnisse der Untersuchungen zu den Erschütterungsimmissionen | 118 |
| 7.2.1 | Impuls-Abstandsbeziehungen | 118 |
| 7.2.2 | Energie-Abstandsbeziehungen | 131 |
| 7.2.3 | Zonen der dynamischen Einwirkungen um eine Sprenganlage..... | 136 |
| 7.3 | Umweltrelevante Nutzung der Ergebnisse und die praktische Umsetzung | 143 |
| 8 | Empfehlungen und Schlussfolgerungen | 147 |
| 8.1 | Grundsätzliche Empfehlungen für die Versuchsbetriebe..... | 147 |
| 8.2 | Vorschläge zur Veränderung und Ergänzung der DIN 4150, Teil 1 und 3..... | 149 |
| 8.3 | Empfehlungen für die sprengstoffherstellende Industrie..... | 150 |
| | Danksagung | 152 |
| | Fazit | 154 |
| | Literaturverzeichnis | 156 |
| | Anhang | 166 |

Verzeichnis der Bilder

| | | |
|------------|--|----|
| Bild 3.1: | Messapparatur UKS-D der Fa. Geotron Elektronik mit PC | 29 |
| Bild 3.2: | Einsatz eines Kernbohrgerätes zur Prüfkörperherstellung für das UKS-D-Messgerät..... | 29 |
| Bild 3.3: | Prüfkörper des Tagebaues Elbingerode (Kalkstein)..... | 30 |
| Bild 3.4: | Prüfkörper des Tagebaues Winterberg (Kalkstein) | 30 |
| Bild 3.5: | Prüfkörper des Tagebaues Koschenberg (Metagrauwacke)..... | 30 |
| Bild 3.6: | Prüfkörper des Tagebaues Görzdorf (Gneis) | 31 |
| Bild 3.7: | Prüfkörper des Tagebaues Lüptitz (Rhyolith)..... | 31 |
| Bild 3.8a: | Prüfkörper des Tagebaues Leukersdorf (Rhyolith, Rhyolith-Pyroklastite mit verschiedenen Korngrößen)..... | 31 |
| Bild 3.8b: | Prüfkörper des Tagebaues Leukersdorf (Rhyolith, Rhyolith-Pyroklastite mit verschiedenen Korngrößen)..... | 32 |
| Bild 3.9: | Zusammenhang zwischen akustischer Impedanz und der einaxialen Druckfestigkeit von nicht und rissgeschädigten Prüfkörpern..... | 34 |
| Bild 3.10: | 3D-Laserscanner (Gerät und Funktionsskizze nach Herstellerangaben, www.riegl.com)..... | 35 |
| Bild 3.11: | Messung der Ausbruchgeschwindigkeit einer Gewinnungssprengung mit dem Radar-Sensor (Radio Detection and Ranging) unter Ausnutzung des Dopplereffektes | 37 |
| Bild 3.12: | Ergebnisbeispiele der gemessenen Ausbruchgeschwindigkeiten in Beziehung zur Reflektivität für verschieden geklüftete und sprengbare Festgebirge im s-Takt | 37 |
| Bild 3.13: | Beispiel eines entzerrten Fotos mit Maßstab 1 x 2 m (oben) und der Zuordnung von Siebgrößen (unten)..... | 40 |
| Bild 3.14: | RRSB-Netz (Rosin-Rammler-Sperling-Bennet); spezielle Diagrammskalierung für die Daten von „Siebanalysen“ | 40 |
| Bild 3.15: | Oben - PC-Auswerteeinheit und langer dynamischer Dehnungssensor mit einer Übersetzung von 10 : 1 sowie einem Messbereich von 0,1 ... 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$; Auflösung 0,1 $\mu\text{m}/\text{m}$; Unten - Beziehung zwischen der Dehnung ϵ und der definierten Bragg-Wellenlänge monochromatischen Lichts [BA 00a]..... | 42 |
| Bild 3.16: | Kurzer dynamischer Dehnungssensor mit einem Messbereich bis 3000 ... 3500 $\mu\text{m}/\text{m}$ (geeignet als Sensor hinter dem Bohrloch)..... | 43 |
| Bild 3.17: | Beispiel eines dynamischen Dehnungs-Stauchungszustandes durch Sprengwirkung im Nahbereich bei 49,1 m von der nächstliegenden Bohrlochladung mit lokaler Verformung | 43 |
| Bild 3.18: | Beispiel eines dynamischen Dehnungs- und Stauchungszustandes durch Sprengwirkung im Fernbereich bei 270 m ohne Verformung am Messort; oben Frequenzanalyse der Dehnungskurve mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT)..... | 44 |
| Bild 3.19: | Beispiel einer Schwinggeschwindigkeitskurve in der x-Achse mit dazugehöriger Frequenzanalyse der Fast-Fourier-Transformation (FFT)..... | 45 |
| Bild 3.20: | Geometrische Parameter einer Sprenganlage | 46 |
| Bild 4.1: | Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Klufkörpergröße und dem spezifischen Sprengstoffverbrauch vergleichbarer Sprengziele bei verwendetem gelatinösen Sprengstoff [MÜ 74, KL 74, Archiv]..... | 54 |
| Bild 4.2: | Die akustischen Impedanzen der untersuchten Festgesteine in Abhängigkeit zur Rohdichte zwecks Darstellung der Streuung der Einzelwerte..... | 54 |
| Bild 4.3: | Klassifikation der Festgesteine und Festgebirge hinsichtlich der Sprengbarkeit/Gewinnungsfestigkeit auf der Grundlage der akustischen Impedanz, des Klufabstandes bzw. der Klufkörperkantenlänge (rote Bereiche entsprechen den Versuchsbetrieben) [MÜ 07a]..... | 55 |

| | | |
|------------|--|--------|
| Bild 4.4: | Vergleich der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzungen von den Tagebauen Elbingerode, Lüptitz und Koschenberg | 56 |
| Bild 4.5: | Zündfolge der Großbohrlochsprengung vom 06. 05. 2008 im Tagebau Elbingerode nach den Prinzipien der Impulstheorie (Beispiel) | 58 |
| Bild 4.6: | Prinzip der Überlagerung von Stoßwellen bei gleichzeitiger (simultaner) Zündung von Ladungen nach der Impulstheorie | 59 |
| Bild 4.7: | Neues physikalisches Modell der Wirkungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung..... | 60 |
| Bild 4.8: | Zusammenhang zwischen Sprengstoffdichte und Detonationsgeschwindigkeit gewerblicher Sprengstoffe [CO 96; Rest eigene Erfassung] | 64 |
| Bild 5.1: | Regionaleinheiten des Harzes in [FRA 09, HIN 98, MO 93, MR 01, SCH 08] rot = Tagebaue Elbingerode und Winterberg | 66 |
| Bild 5.2: | Tagebauriss Elbingerode mit Eintragung der Sprengorte und der vereinfachten Raumstellung des Trennflächengefüges | Anhang |
| Bild 5.3: | Gliederung des Erzgebirgs-Antiklinoriums nach [FRA 09, LEO 95, TI 02] | 69 |
| Bild 5.4: | Tagebauriss Görsdorf mit Eintragung der Sprengorte und der vereinfachten Raumstellung des Trennflächengefüges | Anhang |
| Bild 5.5: | Regionale Teilelemente im Bereich des Lausitzer Antiklinoriums, Darstellung ohne Sedimente des Känozoikums nach [FRA 09, MO 64, HIR 69, LEO 95, KR 00] | 72 |
| Bild 5.6: | Tagebauriss Koschenberg mit Eintragung der Sprengorte und der vereinfachten Raumstellung des Trennflächengefüges | Anhang |
| Bild 5.7: | Geologie des Erzgebirgs-Antiklinoriums nach [FRA 09, LEO 95, TI 02] | 76 |
| Bild 5.8: | Tagebauriss Leukersdorf mit Eintragung der Sprengorte und der vereinfachten Raumstellung des Trennflächengefüges | Anhang |
| Bild 5.9: | Geologie des Nordwestsächsischen Eruptivkomplexes, Darstellung ohne känozoische Bildungen nach [FRA 09, WA 06]..... | 80 |
| Bild 5.10: | Tagebauriss Lüptitz mit Eintragung der Sprengorte und der vereinfachten Raumstellung des Trennflächengefüges | Anhang |
| Bild 5.11: | Tagebauriss Winterberg mit Eintragung der Sprengorte und der vereinfachten Raumstellung des Trennflächengefüges | Anhang |
| Bild 6.1: | Zusammenhang zwischen durchschnittlichen Kluftkörpern, dem spezifischen Sprengstoffverbrauch und Füllungsgrad | 87 |
| Bild 6.2: | Zertrümmerung als Differenz der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzung und Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser im Tagebau Koschenberg..... | 88 |
| Bild 6.3: | Zertrümmerung als Differenz der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzung und Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser im Tagebau Lüptitz | 88 |
| Bild 6.4: | Zertrümmerung als Differenz der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzung und Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser im Tagebau Elbingerode..... | 89 |
| Bild 6.5: | Vergleich der Detonationsgeschwindigkeit der eingesetzten Sprengstoffe mit der P- und S-Wellengeschwindigkeit zwecks Ermittlung der grundlegenden Fälle der Wellenausbreitung nach [RO 98a]..... | 92 |
| Bild 6.6: | Zusammenhang zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Z_0} zur erzielten Masse der durchschnittlichen Haufwerkskorngröße (AGSM) im Tagebau Elbingerode | 93 |
| Bild 6.7: | Zusammenhang zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Z_0} zur erzielten Masse der durchschnittlichen Haufwerkskorngröße (AGSM) im Tagebau Winterberg..... | 93 |
| Bild 6.8: | Zusammenhang zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Z_0} zur erzielten Masse der durchschnittlichen Haufwerkskorngröße (AGSM) im Tagebau Görsdorf..... | 94 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Bild 6.9: | Vergleich der Korngrößenverteilung Festgebirge - Haufwerk; Sprengung mit Einzellochzündung und zwei Sprengungen mit der Zündfolge nach der Impulstheorie im Rosin-Rammler-Sperling-Bennet-Diagramm | 95 |
| Bild 6.10: | Auswertung der Haufwerkszusammensetzung der Sprengungen im Vergleich mit der Kluffkörperzusammensetzung des Festgebirges im Tagebau Koschenberg | 97 |
| Bild 6.11: | Auswertung der Haufwerkszusammensetzungen der Sprengungen im Vergleich mit der Kluffkörperzusammensetzung des Festgebirges im Tagebau Elbingerode | 97 |
| Bild 6.12: | Beispielhafte Darstellung eines 3-D-Laserscanner-Bildes mit den Bohrlöchern der Sprengung vom 06.05.2008 im Tagebau Elbingerode..... | 98 |
| Bild 6.13: | Beeinflussung der Auflockerung des Haufwerkes durch die Größe des wirksamen Detonationsdruckes pro Einheitsvolumen im Tagebau Lüptitz | 98 |
| Bild 6.14: | Beispiel eines gelenkten Ausbruches einer 4-Reihensprengung durch die Zündfolge nach der Impulstheorie (Tagebau Lüptitz)..... | 99 |
| Bild 6.15: | Beziehung zwischen der gemessenen kinetischen Energie des Haufwerkes und dem durch die Gesamtladung eingebrachten Schwadenvolumen | 101 |
| Bild 6.16: | Beziehung zwischen der gemessenen, durchschnittlichen kinetischen Energie des Haufwerkes und der mittleren Kluffkörpergröße in den Versuchsbetrieben (außer Tagebau Winterberg)..... | 101 |
| Bild 6.17: | ppv - r -Diagramm von erzielten Schwinggeschwindigkeiten vergleichbarer Sprenganlagen in einem sehr schwer sprengbaren Rhyolith-Gebirge mit elektronischer und nichtelektrischer Zündung..... | 103 |
| Bild 6.18: | ppv_{max} - r -Diagramm von Erschütterungsmessungen vergleichbarer Sprenganlagen im sehr schwer sprengbaren Granodiorit-Gebirge mit elektronischer (Dreiecke) und nichtelektrischer (schwarze Kreise) Zündung | 103 |
| Bild 6.19: | Beziehung zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Zm} der gesamten Sprenganlage und dem Volumen der Sprengung V_{Sp} | 106 |
| Bild 7.1: | Modell einer Gewinnungssprengung mit den Wirkungszonen und den wichtigsten Vorgängen | 115 |
| Bild 7.2: | Dehnungs-Stauchungskurve - gemessen 0,8 m hinter einer detonierenden Bohrlochladung in einem Rhyolith-Tagebau [MÜ 01b]..... | 115 |
| Bild 7.3: | Darstellung der rechnerisch ermittelten Dehnung gegen die Zeit hinter einer detonierenden Ladung für einen Radius von 0,8046 m [HU 99] | 115 |
| Bild 7.4: | ppv - r -Diagramm Tagebau Elbingerode | 119 |
| Bild 7.5: | ppv - r -Diagramm Tagebau Görsdorf | 119 |
| Bild 7.6: | ppv - r -Diagramm Tagebau Koschenberg – gesamt – | 120 |
| Bild 7.7: | ppv - r -Diagramm Tagebau Koschenberg - Nordwand..... | 120 |
| Bild 7.8: | ppv - r -Diagramm Tagebau Koschenberg - Tiefsohle | 121 |
| Bild 7.9: | ppv - r -Diagramm Tagebau Leukersdorf | 121 |
| Bild 7.10: | ppv - r -Diagramm Tagebau Lüptitz..... | 122 |
| Bild 7.11: | ppv - r -Diagramm Tagebau Winterberg..... | 122 |
| Bild 7.12: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Elbingerode | 124 |
| Bild 7.13: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Görsdorf | 124 |
| Bild 7.14: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Koschenberg – gesamt – | 125 |
| Bild 7.15: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Koschenberg - Nordwand | 125 |
| Bild 7.16: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Koschenberg - Tiefsohle | 126 |
| Bild 7.17: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Leukersdorf | 126 |
| Bild 7.18: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Lüptitz..... | 127 |
| Bild 7.19: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Winterberg..... | 127 |
| Bild 7.20: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ε_{dyn} -Diagramm Tagebau Görsdorf..... | 129 |
| Bild 7.21: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ε_{dyn} -Diagramm Tagebau Koschenberg..... | 129 |
| Bild 7.22: | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ - ε_{dyn} -Diagramm Tagebau Leukersdorf..... | 130 |
| Bild 7.23: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^n$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Elbingerode | 132 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Bild 7.24: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Görsdorf | 132 |
| Bild 7.25: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg – gesamt – | 133 |
| Bild 7.26: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg - Nordwand..... | 133 |
| Bild 7.27: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg - Tiefsohle | 134 |
| Bild 7.28: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Leukersdorf | 134 |
| Bild 7.29: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Lüptitz..... | 135 |
| Bild 7.30: | $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Winterberg (rot = ANFO; blau = Emulsionsprengstoff)..... | 135 |
| Bild 7.31: | Vergleich der Regressionsgeraden der Energie-Abstandsbeziehungen aller Tagebaue; es bedeuten: 1a = Kalkstein Winterberg (ANFO), 1b = Kalkstein Winterberg (Emulsion), 2 = Kalkstein Elbingerode, 3 = Rhyolith Lüptitz, 4 = Rhyolith-Tuff Leukersdorf, 5 = Metagrauwacke Koschenberg, 6 = Gneis Görsdorf..... | 138 |
| Bild 7.32: | Prinzipdarstellung des Weg-Zeit-Lagrange-Diagramms [in RO 04] | 138 |
| Bild 7.33: | Schematisierte zeitliche Rissentwicklung nach der detonativen Sprengstoffumsetzung für ein Festgebirge ohne Trennflächen und einer P-Wellengeschwindigkeit von 4.000 m/s..... | 139 |
| Bild 7.34: | Verformungs-Entfernungs-Diagramm für den Tagebau Koschenberg zur Festlegung der „Zone der nachgewiesenen Verformung“ durch Dehnungsmessungen..... | 141 |
| Bild 7.35: | Zonen der dynamischen Einwirkungen um eine Sprenganlage am Beispiel vom Tagebau Leukersdorf | 142 |

Verzeichnis der Tabellen

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Tabelle 2.1: | Versuchsbetriebe mit den wichtigsten Sprengzielen..... | 25 |
| Tabelle 2.2: | Sprengversuche in den Tagebauen mit den wesentlichsten Änderungen der Sprenganlagen | 26 |
| Tabelle 3.1: | Überblick der erforderlichen Eingangsgrößen für die objektive Bewertung von Sprengungen und deren Sprengergebnis | 27 |
| Tabelle 3.2: | Festgesteins- (1) und Festgebirgseigenschaften (2) als grundlegende Größen (Komplex 1) | 47 |
| Tabelle 3.3: | Geometrische und bohrtechnische Parameter einer Sprenganlage vor den Sprengungen (Komplex 2) | 48 |
| Tabelle 3.4: | Spreng- und zündtechnische Parameter/Merkmale vor den Sprengungen (Komplex 3) | 49 |
| Tabelle 3.5: | Größen, Kennwerte des Sprengergebnisses und berechnete Eingangswerte für weitere Untersuchungen nach den Sprengungen (Komplex 4) | 51 |
| Tabelle 4.1: | Durchschnittliche Kluftkörper der Festgebirge in den jeweiligen Tagebauen | 55 |
| Tabelle 5.1: | Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte des Kalksteines vom Tagebau Elbingerode | 67 |
| Tabelle 5.2: | Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte des Graugneises vom Tagebau Görzdorf | 70 |
| Tabelle 5.3: | Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte der Metagrauwacke vom Tagebau Koschenberg | 74 |
| Tabelle 5.4: | Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte der Festgesteine vom Tagebau Leukersdorf | 77 |
| Tabelle 5.5: | Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte des Rhyolithes vom Tagebau Lüptitz..... | 81 |
| Tabelle 5.6: | Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte des Kalksteines vom Tagebau Winterberg..... | 84 |
| Tabelle 7.1: | Ermittlung des Einflusses der Stabilisierung des Geophons am gleichen Messort bei gleichen dynamischen Impuls [MÜ 07c] | 109 |
| Tabelle 7.2: | Korrelationskoeffizienten zur Beurteilung und zum Vergleich von ausgewählten Erschütterungsprognosebeziehungen (rot umrandet = statistisch gesichert)..... | 113 |
| Tabelle 7.3: | Ergebnisse ausgewählter Korrelationskoeffizienten von statistischen Berechnungen verschiedener Einflussparameter der Erschütterungen [erweitert nach MÜ 07c] | 117 |
| Tabelle 7.4: | Statistische Ergebnisse der Auswertung der Schwinggeschwindigkeitsmessungen zur Entfernung Sprengort – Messstelle... 118 | |
| Tabelle 7.5: | Statistische Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Impuls-Abstandsbeziehungen der Schwinggeschwindigkeit in den einzelnen Tagebauen | 123 |

Liste der Symbole

| | | |
|-----------------------|---|------------------------|
| a, b, c | empirisch ermittelte, dimensionslose Faktoren bzw. Exponenten, die je nach geologisch-geomechanischen Bedingungen und der zur Anwendung gebrachten Bohr- und Sprengtechnik ihre Größe ändern..... | [-] |
| a_B | Bohrlochabstand..... | [m] |
| a_B' | Bohrlochabstand, gezündet..... | [m] |
| c_d | Detonationsgeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| c_M | Ausbruchgeschwindigkeit des Haufwerkes/der Sprengmasse | $[\frac{m}{s}]$ |
| c_P | P-Wellengeschwindigkeit, Gestein | $[\frac{m}{s}]$ |
| c_S | S-Wellengeschwindigkeit, Gestein | $[\frac{m}{s}]$ |
| E_{dyn} | dynamischer Elastizitätsmodul | $[\frac{kN}{mm^2}]$ |
| E_{kinM} | kinetische Energie der ausbrechenden Sprengmasse | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| E_{potM} | potentielle Energie der ausbrechenden Massen | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| E_{qstat} | quasistatische Energie einer Sprenganlage | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| E_{dyn} | dynamische Energie einer Sprenganlage..... | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| E_B | dynamische Energie der Bohrlochladung | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| E_S | dynamische Energie der gesamten Sprengladung..... | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| E_{SWE} | Dehnungs-Wellenenergie | $[\frac{kgm^2}{s^2}]$ |
| F | Kraft | [N] |
| g | Normalfallbeschleunigung | $[9,81 \frac{m}{s^2}]$ |
| Δh_w | Anteil der Wurfhöhe des Haufwerkes | [m] |
| ΔI_{RM} | Impuls/Kraftstoß..... | [Ns] |
| I_M | Impulsmoment des ausbrechenden Haufwerkes..... | $[\frac{kgm}{s^2}]$ |
| L_Z | Lademenge pro Zündzeitstufe (zur Dimensionsbereinigung muss durch 1 kg gerechnet werden)..... | [kg] |
| l_B | Bohrlochlänge..... | [m] |
| l_{Bo} | Einheitslänge Bohrloch | [1 m] |
| k, k', n, n', m, m' | Exponenten & Faktoren, die durch Regressionsanalyse statistisch ermittelt werden | [-] |
| m_M | Sprengmasse..... | [kg] |
| n | Faktor für den unterschiedlichen Kegelwinkel α (für $\alpha = 90^\circ$ beträgt $n = 1$) | [-] |
| n_v | Anzahl der Einheitsvolumina | [-] |

| | | |
|------------------|--|----------------------------------|
| ppv_{max} | maximale Schwinggeschwindigkeit | $\left[\frac{mm}{s} \right]$ |
| ppv | Schwinggeschwindigkeit..... | $\left[\frac{mm}{s} \right]$ |
| P_o | Detonationsdruck des Sprengstoffes [CO 96] | $\left[\frac{kg}{ms^2} \right]$ |
| P_{ZM} | Detonationsdruck der Zertrümmerungswirkung in einer Sprenganlage | $\left[\frac{kg}{ms^2} \right]$ |
| P_{ZO} | wirksamer Detonationsdruck je Einheitsvolumen | $\left[\frac{kg}{ms^2} \right]$ |
| q | spezifischer Sprengstoffverbrauch | $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ |
| r | Entfernung Sprengort-Messpunkt bei Erschütterungsmessungen | [m] |
| R | Radius Ladung und Messpunkt [nach HU 99] | [m] |
| $\Delta t, t$ | Zeit..... | [s] |
| V_B | Sprengvolumen um ein Bohrloch ($a_B \cdot w \cdot l_B$) | [m ³] |
| V_K | Kegelvolumen | [m ³] |
| V_O | Einheitsvolumen ($a_B \cdot w \cdot l_{BO}$)..... | [m ³] |
| V_{SB} | Volumen Sprengstoff im Bohrloch | [m ³] |
| V_{So} | Volumen Sprengstoffmenge pro Einheitsvolumen..... | [m ³] |
| w' | Vorgabe, gezündet | [m] |
| w | Vorgabe | [m] |
| w_s | söhlige Vorgabe..... | [m] |
| W_B | maximale Lademenge pro Bohrloch | [kg] |
| W_{BL}, W_{Bi} | Lademenge eines Bohrloches | [kg] |

Griechische Symbole

| | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ε | Dehnung/Stauchung | $\left[\frac{mm}{m} \right]$ |
| $\varepsilon_{max}/\varepsilon_{dyn}$ | maximale dynamische Dehnung | $\left[\frac{mm}{m} \right]$ |
| ρ_s | Sprengstoffdichte | $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ |
| ρ_G | Rohdichte, Gestein | $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$ |
| λ_s | Seitenverhältnis, gezündet | [-] |
| ξ | Füllungsgrad | [-] |
| ν | Poissonzahl | [-] |
| σ | Spannung | $\left[\frac{kg}{ms^2} \right]$ |

Zusammenfassung

In sechs Natursteintagebauen wurden 59 Sprengungen in-situ vorbereitet, messtechnisch begleitet und ausgewertet. Es wurden die gesteinsdynamischen Eigenschaften und das Trennflächengefüge der jeweiligen Festgebirge statistisch erfasst. Mit dem Laserscanner, Laserentfernungsmessgerät, Digitalkamera, Radarsensor, Detonationsgeschwindigkeitsmessgerät, mehreren Dehnungssensoren und Geophonen erfolgten spezielle Datenerfassungen der Sprenganlagen und des Sprengergebnisses inklusive einer digitalen Haufwerksanalyse. Die Sprengbarkeit der Festgebirge wurde quantitativ definiert. Die verwendeten Grundprinzipien der Impulstheorie wurden zu einem verbesserten, innovativen, physikalischen Modell des Detonationsdruckes und der energetischen Bewertung weiterentwickelt. Den größten Einfluss auf die Stückigkeit des Haufwerkes und den Abwurf haben die Trennflächenabstände der Festgebirge. Die energetische Wirkung und Umsetzung von Sprengstoffen ist wegen der besseren Stoßwellenausbreitung in weniger geklüfteten Massiven erheblich größer als in stark klüftigen. Die ermittelten dynamischen Kennwerte ermöglichen die Beurteilung der detonativen Sprengstoffumsetzung in den Gesteinen als super-, trans- oder subsonisch. Von der suspersonischen Ausbreitung der Stoßwellenfront zur subsonischen nimmt die zertrümmernde Wirkung ab und die Erschütterungen zu. Mit dem wirksamen Detonationsdruck, der allein durch die Zündfolge erhöht werden kann, nimmt die bessere energetische Ausnutzung des Sprengstoffes zu. Je höher der wirksame Detonationsdruck, um so besser ist der Abwurf mit gleichzeitiger Verringerung der Erschütterungen. Die alleinige Verwendung von Emulsionssprengstoff mit umweltfreundlichen Schwaden und geringen CO₂-Anteilen ist zukunftsweisend. Eine abgestimmte Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers konnte bis 30 % Bohrmeter einsparen helfen. Auf der Grundlage des neuen physikalischen Modells und der systematischen Erschütterungsmessungen konnten in jedem Tagebau statistisch gesicherte Impuls-Abstands- und Energie-Abstandsbeziehungen sowohl für die Schwinggeschwindigkeit als auch für die Dehnung ermittelt werden. Mit diesen Beziehungen sind Erschütterungen beherrschbar, beeinflussbar und die Sprengungen umweltfreundlicher auslegbar. Der nachgewiesene Zusammenhang mit der Verbesserung der Stückigkeit und der Einhaltung der zulässigen Erschütterungen gestattet die Gestaltung einer umweltbewussten Bohr-, Spreng- und Zündtechnik ohne Einschränkung des gewünschten Sprengergebnisses. Die Dehnungsmessungen erlauben sowohl die Rückrechnung von ausgelösten Spannungen um die detonierende Ladung als auch die Abgrenzung einer Zone von nachgewiesenen Verformungen um die Sprengung. Außerhalb dieser Zone ist es physikalisch mit großer Wahrscheinlichkeit auszuschließen, dass Rissbildungen an Gebäuden oder Bauwerken jeder Art entstehen können. Aus den

Ergebnissen leiten sich Änderungsvorschläge an die DIN 4150, Teil 1 und 3 ab. Werden die erzielten theoretischen und praktischen Ergebnisse in die Praxis umgesetzt, ist eine innovative, umweltfreundlichere, energiesparende und umweltverträglichere Sprengtechnik möglich.

1 Einleitung und Veranlassung

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Reihe neuartiger Sprengstoffe mit großer Handhabungssicherheit und verbesserter Ladetechnik entwickelt, die die Arbeiten an der Sprengstelle erheblich erleichterten und die Sicherheit deutlich erhöhten. Zu diesen vielfältigen Explosivstoffen konnten nichtelektrische und elektronische Zündsysteme bereitgestellt werden, mit denen die Sprenganlagen optimal und beliebig groß ausgelegt werden können. Nicht zuletzt ist eine verbesserte, leistungsfähige Bohrtechnik auf dem Markt zu erwerben, mit welcher die Laderäume der Sprenganlagen genauer, schneller und kostengünstiger in das Festgebirge einzubringen sind.

Im Gegensatz dazu ist es bisher international noch nicht ausreichend und praktikabel umsetzbar gelungen, den Vorgang während und insbesondere nach einer detonativen Sprengstoffumsetzung mit einem geeigneten, physikalisch erklärbaren sowie anpassungsfähigem Modell zu berechnen.

Die Verfahren der Ladungsberechnung, Dimensionierung einer Sprenganlage, die Festlegung des Ausbruches, die Auslegung der Zündfolge und die Wahl der Explosivstoffe und Zündmittel basieren auf Erfahrung und empirischen Auffassungen. Die Wahl der richtigen Verzögerungszeiten zwischen den Ladungen für die einzelnen Festgebirge oder Sprengziele ist weitestgehend ungeklärt, obwohl die Vielfalt der Zündzeitstufen von nichtelektrischen und elektronischen Zündverfahren einen großen Spielraum zulassen würde.

Das erzielte Sprengergebnis nach dem Abtun einer Sprenganlage wird an der Stückigkeit, der Haufwerkslage, der Auflockerung und den Nebenwirkungen, insbesondere den ausgelösten Sprengerschütterungsimmissionen beurteilt. Alle aufgeführten Kategorien bilden eine verfahrensbedingte Einheit, die vom eingesetzten, in der Sprenganlage verteilten Sprengstoff beeinflusst werden muss. Nicht zuletzt werden die Sprengerschütterungen auf der Grundlage vereinfachter, bekannter Beziehungen empirisch bewertet, ohne den physikalischen Gesamtzusammenhang analysiert zu haben.

Aus dem vorgenannten allgemeinen Stand der Technik zu einem physikalisch brauchbaren Modell der detonativen Sprengstoffumsetzung mit allen Nebenwirkungen darf die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass diese fehlende wissenschaftliche Durchdringung der Sprengtechnik mit den umweltrelevanten Auswirkungen der Erschütterungen einer spürbaren Verbesserung bedarf. Diese Feststellung war letztlich die Anregung und Veranlassung der Aktivierung des Forschungsprojektes.

2 Stand der Technik und Ziele der praxisorientierten Forschung

2.1 Derzeitiger Stand der Technik zur Dimensionierung der Sprenganlagen und Beurteilung von Erschütterungen

Die Gewinnung, Förderung, Verarbeitung und die Aufbereitung von gebrochenen Natursteinen verursacht die nachstehenden Umweltbeeinflussungen:

- Lärm, Schwaden und Staub durch Sprengen, Laden, Fördern und die Aufbereitung
- Erschütterungen durch Sprengwirkung und die Brechanlagen
- Emissionen von Sprengschwaden und Verbrennungsabgasen in die Atmosphäre
- Veränderung der natürlichen Morphologie und Landschaft der Lithosphäre
- Mögliche Störungen des Berg- und Grundwasserhaushaltes der Hydrosphäre mit mutmaßlichen Eingriffen in die Biosphäre.

Aus dieser Aufzählung ist erkennbar, dass ein erheblicher Teil der Umweltbelastungen durch die Bohr- und Sprengtechnik verursacht werden. Jede Verbesserung der Sprengtechnik und der Verringerung der Nebenwirkungen führt zu einer Einschränkung der Umweltbeeinträchtigungen. Die bisher bekannten theoretischen Grundlagen, Ladungsbemessungen und die überwiegend empirische Vorgehensweise bei der Projektierung von Sprenganlagen sowie der Bewertung der Sprengerschütterungsimmissionen sind wenig geeignet, um gesicherte, gesteuerte Veränderungen der Umweltbeeinflussungen vornehmen zu können.

Zur Berechnung von Sprenganlagen und zur Beurteilung des Sprengergebnisses werden sehr verschiedene und physikalisch nicht eindeutig erklärbare Theorien oder empirische Zusammenhänge zu Grunde gelegt [BE 90, HE 93, HOP 98, HU 99, IL 95, LA 63, OR 02, PE 94, TH 78]. In der Regel sind für bestimmte Sprengverfahren unterschiedliche empirische Formeln entwickelt worden. Derartige Beziehungen basieren beispielsweise auf der Proportionalität der Lademenge W_B und dem zu sprengenden Volumen [HE 93, HOP 98, JE 81]. So wurden aus der Theorie der Trichterwirkung die Ladungsberechnungen abgeleitet, bei der sich ein Kegelvolumen V_k in erster Näherung mit einem Kegelwinkel von 90° wie folgt berechnet:

$$V_k = \frac{\Pi \cdot w^3}{3} \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

Man geht davon aus, dass der Kegelwinkel von 90° das beste Sprengergebnis liefert. Aus (1) wird infolge der Proportionalität V_k zu W_B die allgemeine Gleichung zur Ladungsberechnung entwickelt:

$$W_{Bi} = q \cdot w^3 \cdot n \quad [\text{kg}] \quad (2)$$

Im Wert des spezifischen Sprengstoffverbrauches q sind dazu verschiedene sprengtechnische und natürliche Bedingungen von verschiedenen Autoren wie Druckfestigkeit des Gesteines, Arbeitswert des Sprengstoffes, ein Strukturwert des Festgebirges, die Verspannung der Sprenganlage, Verdämmung der Sprengladung sowie der Füllungsgrad ζ des Laderaumes eingebracht und als Faktor gewichtet worden, wodurch der empirische Charakter der Berechnungsverfahren weiter verstärkt wurde. Weicht die Sprenganlage deutlich von der trichterförmigen Sprengwirkung ab, so ist die Lademengenermittlung auf das Sprengvolumen um ein Bohrloch V_B zu beziehen [HE 93]:

$$V_B = l_B \cdot a_B \cdot w \quad [\text{m}^3] \quad (3)$$

Die Lademenge eines Bohrloches ergibt sich aus:

$$W_{BL} = q \cdot V_B \quad [\text{kg}] \quad (4)$$

Bei dieser Vorgehensweise ist die Ermittlung des spezifischen Sprengstoffverbrauches q als entscheidender Parameter für die Berechnung der Lademenge und Ableitung geometrischer Größen der Sprenganlage entweder mittels der genannten empirischen Angaben oder aus Erfahrung abzuleiten [HE 93, TH 78]. Diese prinzipielle Bemessung einer Gewinnungssprengung wird in den meisten Ländern ähnlich praktiziert [BE 90, BU 80, HE 93, HOP 98, HU 99, JE 81, LA 63, OR 02, PE 94, SE 03, TH 78, TH 92].

Von [TH 78] wurde das Trichtermodell bereits abgelehnt und dafür ein Wirkungsbereich bei der Umsetzung einer Ladung angenommen, welcher durch radiale Druckspannungen nach allen Seiten um das Bohrloch gekennzeichnet ist und mit dem Seitenverhältnis

$$\lambda_s = \frac{a_B}{w} \quad [-] \quad (5)$$

optimiert wird. Das Seitenverhältnis sollte 1 bis 1,3 betragen [LA 63]. Letztlich ist bekannt, dass mit steigendem Sprengstoffeinsatz und bei voller Ausladung der Bohrlöcher mit hochwertigen Sprengstoffgemischen die Stückigkeit verbessert werden kann [HE 93, HOP 98, LA 63, TH 78].

In verschiedenen Arbeiten werden der Sprengvorgang überwiegend theoretisch bewertet und mit Berechnungsverfahren beispielsweise der Detonationsdruck sowie die entstehenden Dehnungen um das Bohrloch eingeschätzt oder mit Dehnungsmessstreifen erfasst [CU 04,

DO 00, ES 06, HA 06, HU 99, LE 99, L003, MC 04, PE 94, RO 98a, RO 98b, SA 02a, SE 03, SP 99]. Die Messungen mit Dehnungsmessstreifen führten allerdings nicht zu den erwarteten Ergebnissen [LE 99]. In [HU 99] werden eingehende Berechnungen der Dehnungszustände für verschiedene Sprengwirkungen angegeben, von denen sprengtechnische Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Durch Hochgeschwindigkeitskameras wurde versucht, den Ausbruchmechanismus von Sprengungen zu erfassen [CH 83, HI 87, HU 99, LÜ 86, PE 94, SE 03]. Die punktuellen Geschwindigkeitsangaben des ausbrechenden Haufwerkes erbrachten keine kontinuierlichen Ergebnisse. Die infolge der unmittelbar nach der detonativen Sprengstoffumsetzung beginnende Ausbreitung der Schwaden sowie des Feinstaubes behinderten die systematische Auswertung der Ausbruchverhältnisse einer Sprengung mit der Hochgeschwindigkeitskamera. Einige der physikalisch nachgewiesenen Beziehungen und Berechnungsansätze konnten in die Untersuchungen übernommen oder zu Grunde gelegt werden [CO 96, CU 04, ES 06, HA 06, JL 95, LE 99, LO 03]. In den verfügbaren Fachbeiträgen fehlt allerdings eine komplexe theoretische, durch Messungen gestützte Analyse des Sprengvorganges von der Detonation bis zum Haufwerksabwurf und daraus ableitbare praktische Empfehlungen für die Bemessung sowie Auslegung einer Sprenganlage.

Mit den modernen Zündsystemen sind die zündtechnischen Möglichkeiten sehr vielfältig und praktisch in allen Variationen realisierbar. Dazu werden in den einzelnen Hand- und Fachbüchern anwendungsreife Beispiele und Empfehlungen dokumentiert [BE 90, HE 93, HOP 98, HU 99, JL 95, TH 78, VO 00]. Eindeutige, sichere und praktische Vorgaben sowie Nachweise, welche Zünder, Zündfolgen und Verzögerungszeiten für die einzelnen Sprengziele bei Gewinnungssprengungen zur Anwendung kommen sollen, sind in der derzeitigen Fachliteratur nicht zu finden.

Die Beurteilung von Sprengerschütterungsimmissionen wird ebenfalls vorzugsweise empirisch vorgenommen [BE 90, BÖ 82, DI 1/97, DI 3/99, DO 85, DO 00, HE 93, HI 87, HOP 98, KO 58, LÜ 86, MÜ 96a, MÜ 07c, PE 94, SI 00]. Daneben gibt es Versuche die Erschütterungen mit statistischen und numerischen Modellen zu behandeln [BL 99, BL 06, KI 03]. Die darin verwendeten Modelle lassen keine begründeten und sprengtechnisch nachgewiesenen Zusammenhänge erkennen. Die Dauer des Detonationsdruckes wird mit 10^{-6} s als viel zu kurz und die des Gasdruckes mit 10^{-3} s Einwirkung beschrieben [KI 03]. Diese zeitliche Bewertung stimmt nicht mit dem bisher bekannten Ablauf der detonativen Sprengstoffumsetzung überein [CO 96, CU 04, ES 06, HU 99, LE 99, LA 63, LO 03, RO 98b]. Derzeitig anerkannte Erschütterungsbeziehungen sind nicht dimensionsgerecht und statistisch bei streuender Datengrundlage nicht gesichert. Die meisten Beziehungen gehen auf die grundlegende Arbeit von KOCH zurück, der die Entfernung Emissionsort - Messpunkt

und die Lademenge pro Zündzeitstufe der Erschütterungsbewertung zu Grunde legt [KO 58]. Zur Erfassung von Sprengerschütterungen und anderen dynamischen Einwirkungen werden derzeit nahezu ausschließlich Geophone eingesetzt, mit denen die Ersatzgrößen der Schwinggeschwindigkeit und Frequenz am Immissionsort bestimmt werden können. Von DOWDING und anderen Autoren wurden Dehnungsmessstreifen zur Messung der dynamischen Dehnungen verwendet [DO 85, DO 00, LE 99]. Die Verwendung der Schwinggeschwindigkeit als Maß für die Erschütterungseinwirkung hat den entscheidenden Nachteil, dass bisher keine genaue Interpretation der Werte zur Schadensbeurteilung von Bauwerken jeder Art möglich ist. Das ist auch der entscheidende Grund für eine fehlende, international anerkannte und übereinstimmende Festlegung von Grenzwerten für Bauwerke bzw. Gebäude, deren Einhaltung eine Risschädigung ausschließt. Diese vorgenannten empirischen und recht unterschiedlichen Vorgehensweisen führten häufig dazu, dass oft wenig umweltrelevante, emissionsarme und wirtschaftliche, sprengtechnische Lösungen zur Anwendung kommen [MÜ 03a, MÜ 03b, MÜ 03c, TH 78]. Die Fertigprodukte aus gebrochenem Naturstein sind durch die aufgeführten ungünstigen Umwelteinwirkungen meist stark belastet.

2.2 Zielstellung und Umweltrelevanz der Forschungsarbeiten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist es vorgesehen, ein innovatives, emissionsärmeres sowie anpassungsfähiges Verfahren zur umweltfreundlichen Produktion von Baustoffen aus gebrochenem Naturstein im Bereich der 1. Brechstufe „Sprengen des Festgebirges“ zu entwickeln. Das daraus abgeleitete, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsthema „Entwicklung eines Verfahrens zur definierten Berechnung von Gewinnungssprengungen und deren Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit“ (Kurztitel: „Umweltfreundliche Sprengtechnik“) wird seit dem 15.02.2007 bis 14.03.2009 unter der Federführung des GEOTECHNISCHEN SACHVERSTÄNDIGENBÜROS DR. MÜLLER - MOVEMENT AND BLASTING CONSULTING -, Leipzig zusammen mit der TU BERGAKADEMIE FREIBERG, INSTITUT FÜR BERGBAU UND SPEZIALTIEFBAU sowie INSTITUT FÜR MARKSCHEIDEWESEN UND GEODÄSIE bearbeitet. Zur Erfüllung der Zielstellung sollen die Hauptwirkungen der detonativen Sprengstoffumsetzung durch eine gebirgsbezogene Projektierung und systematische Optimierung der Bohr-, Spreng- und Zündparameter verbessert werden, die ihrerseits eine höhere energetische Ausnutzung der eingesetzten Sprengstoffe garantiert. Die Umsetzung dieser veränderten Techniken soll eine geringstmögliche Schadstoffemission bei der Zerkleinerung des Haufwerkes bewirken.

Letztlich ist die Ladungsbemessung hinsichtlich der geometrischen, spreng- und zündtechnischen Parameter auf der Grundlage eines physikalisch gestützten Modells entsprechend der jeweiligen naturgegebenen Bedingungen und des Sprengzieles auszurichten. Diese vorgenannten Veränderungen und Optimierungen sind unter Beachtung der Reduzierung der Nebenwirkungen insbesondere der Erschütterungsimmissionen und Belästigungen der Anwohner vorzunehmen. Es ist die generelle Zielstellung des Projektes, die unter Praxisbedingungen angewandte Bohr-, Spreng- und Zündtechnik durch moderne Messtechnik vorzubereiten, zu begleiten und zu überwachen, aus der Interpretation der Messergebnisse eine genaue, angepasste Berechnung sowie Optimierung der Bohr- und Sprengparameter zu entwickeln und die von Sprengungen ausgelösten Erschütterungsimmissionen und Umwelteinwirkungen physikalisch gesichert zu verringern und genauer zu prognostizieren.

Mit den einzelnen Zielen des Vorhabens:

- Ermittlung optimaler Lademengen bzw. des spezifischen Sprengstoffverbrauches für die jeweiligen Festgebirge
- Einsatz von Sprengstoffen mit geringsten Schadstoffemissionen
- Bestmögliche Umsetzung und Ausnutzung der Sprengstoffenergie für die Zertrümmerung des Festgebirges und zur Senkung des Energiebedarfs der weiteren Bearbeitung im Brech- bzw. Aufbereitungsprozess
- Entwicklung von Möglichkeiten zur Vergrößerung von Sprenganlagen zwecks Verringerung der Häufigkeit von Sprengungen und deren Emissionen
- Erarbeitung von Beziehungen zur Prognose von Sprengerschütterungen auf der Grundlage eines physikalisch nachweisbaren Modells und statistisch gesicherter Eingangswerte
- Aufzeigen von Möglichkeiten zur Reduzierung von Sprengerschütterungen, zur Erhöhung der Umweltverträglichkeit der Sprengarbeiten

soll die Hauptaufgabe erreicht werden, ein umweltfreundlicheres, emissionsärmeres Fertigprodukt aus gebrochenem Naturstein in den verschiedensten Tagebauen zu erzeugen. Nicht zuletzt soll mit der praxisnahen Forschung die Sicherheit der Bohr- und Sprengarbeiten im Festgebirge nachweisbar verbessert werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden verallgemeinert folgende Aufgabenstellungen bearbeitet:

- Eine umfangreiche, messtechnische Begleitung von mehr als 55 Gewinnungssprengungen vor, während und nach der Zündung mit den modernsten Verfahren und Geräten wie Laserscanner, Laserentfernungsmessgerät, Radarsensor, Faser-BRAGG-Gitter-Dehnungssensoren, Drei-Komponenten-Geophonen sowie

einer händischen, fotogestützten Haufwerksanalyse in sechs Tagebauen der Natursteinindustrie mit unterschiedlichsten Gebirgseigenschaften.

- Es ist eine anwenderfreundliche Klassifikation der Festgebirge hinsichtlich einer objektiven Beurteilung der Sprengbarkeit zu erarbeiten.
- Die einzelnen zu sprengenden Festgebirge sind quantitativ händisch und felsmechanisch hinsichtlich des Trennflächengefüges sowie der dynamischen Eigenschaften der Festgesteine zu untersuchen und die Sprengbarkeit objektiv zu beurteilen.
- Die Veränderungen ausgewählter Bohr-, Spreng- oder Zündparameter sind mit jeweils drei Sprengungen unter vergleichbaren Bedingungen zu testen und messtechnisch nachzuweisen.
- Die Messergebnisse sind auf der Grundlage der bisherigen Vorstellungen und der Impulstheorie auszuwerten.

Im Ergebnis des Forschungsprojektes sind folgende Komplexe zu erreichen und zu beschreiben:

- Die Ladung eines Bohrloches pro Volumen Festgebirge soll ausgewogen und physikalisch begründbar berechnet, deren optimale Verteilung in der Sprenganlage vorgegeben und die Zündfolge je nach Sprengziel für jeden Tagebau sprengtechnisch gesichert ausgelegt werden. Diese Vorgehensweise gestattet einen umweltverträglichen Abbau unter voller Ausnutzung der verfügbaren Natursteinvorräte.
- Die Berechnung und Beeinflussung der Sprengerschütterungsimmissionen auf der Grundlage eines neuen physikalischen Modells ermöglicht eine genaue Anpassung der Gewinnungssprengungen an die jeweiligen Bedingungen im Umfeld der Tagebaue und verringert die Umwelteinwirkungen in Form der Erschütterungen.
- Die Möglichkeit der Vergrößerung von Sprenganlagen und damit die Verringerung der Anzahl der Sprengungen pro Zeiteinheit selbst vermindert die Umweltbelastung der Bewohner, Natur und Bebauung.
- Die Herstellung von gebrochenen Natursteinen als Massenbaustoffe ist nach Umsetzung der Ergebnisse umweltfreundlicher.
- Die Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz und Sicherheit von Tagebaubetrieben der Natursteinindustrie wird durch das Forschungsvorhaben nachweisbar erhöht.

Dazu gehören die im Schreiben der Deutschen Bundesstiftung Umwelt vom 14.02.2007 formulierten Bewilligungsaufgaben:

- Die abgeleiteten Verfahrensweisen sind ökologisch und ökonomisch in Abgrenzung zum Stand der Technik zu bilanzieren.
- Es ist zu prüfen, inwieweit neben der Kenngröße des Impulses bzw. der Impulsausbreitung eine Einbeziehung der Gesamtenergie als Bestimmungsparameter weiterführend ist.
- Letztlich sollen Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse vorgeschlagen werden.

Auf der Grundlage der „Impulstheorie“, die als theoretisches physikalisches Modell für die Beurteilung des Sprengvorganges angesehen werden kann, wurden wesentliche, ursächlich auf die Sprengstoffumsetzung und Erschütterungen wirkende Einflussfaktoren nachgewiesen [MÜ 01a, 01b, 01c, 01d, 02a, 02b, 03a, 03b, 03c, 04b, 05/06]. Die genauere physikalische Bewertung der detonativen Sprengstoffumsetzung soll die Optimierung des Sprengstoffeinsatzes, die bessere energetische Ausnutzung der Sprengstoffe und die Beeinflussung der Erschütterungsimmissionen ermöglichen. Im vorliegenden Abschlussbericht werden Möglichkeiten einer Herabsetzung und besseren Beherrschung von Umwelteinwirkungen bei Gewinnungssprengungen im Festgebirge aufgezeigt. Dadurch soll die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der mittelständigen baustoffherstellenden Betriebe bei gleichzeitiger Umweltentlastung erhöht werden.

Aus den vorgenannten Aufgaben ergeben sich die umweltrelevanten Zielstellungen:

- Sprengungen sind stets mit Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen verbunden. Die Möglichkeit einer Vergrößerung der Sprenganlagen unter Einhaltung oder Reduzierung der Erschütterungen ist zu gewährleisten und soll das Produktionsvolumen nicht schmälern. Die Emissionen Lärm und Erschütterungen werden herabgesetzt, ohne die Haufwerksqualität einzuschränken.
- Der eingesetzte Sprengstoff ist energetisch für die Zertrümmerung besser als bisher auszunutzen.
- Es ist eine Erhöhung der Zerkleinerung des Haufwerkes durch die Gewinnungssprengungen zu erreichen, um den Energieaufwand für den nachfolgenden Brechprozess zu minimieren und letztlich höhere Durchsatzleistungen der Anlage zu erzielen.

- Die Auswahl der Sprengstoffe sollte einerseits unter Beachtung einer optimalen Wirkung in der Sprenganlage und andererseits unter Berücksichtigung der geringsten Schadstoffemission der Sprengschwaden erfolgen.

Darüber hinaus ist bei der weiteren Auswertung der vielfältigen Messergebnisse zu erwarten, dass andere umweltrelevante Erkenntnisse aus der Projektbearbeitung ableitbar sind.

2.3 Auswahl der Versuchsbetriebe und das Sprengziel

Die Sprengversuche wurden generell in-situ unter normalen Tagebaubedingungen und in deutlich verschiedenen Festgebirgen durchgeführt. Als Tagebaue wurden die in Tabelle 2.1 zusammengestellten gewählt.

In den Bildern 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 und 5.11 (siehe Anhang) sind die Tagebaugrundrisse der Versuchsbetriebe mit der Lage und Größe der messtechnisch erfassten Sprengungen dokumentiert. Die Durchführung der Versuche musste den laufenden betrieblichen Anforderungen angepasst werden, so dass die Sprengungen nicht immer in vergleichbaren Homogenbereichen oder Abschlagsrichtungen abgetan werden konnten. Die Variation der bohr- und sprengtechnischen Veränderungen zur Optimierung der Sprengungen wurde gleichermaßen den Möglichkeiten und Anforderungen der Versuchsbetriebe untergeordnet, damit ein möglichst risikofreies Arbeiten gewährleistet werden konnte. Die Tabelle 2.2 vermittelt die wichtigsten Änderungen während der Sprengversuche und fasst die Anzahl der erfassten Sprengungen im Versuchszeitraum zusammen. In den Tagebauen Leukersdorf und Koschenberg konnten dazu weitere Messergebnisse aus früheren Sprengungen einbezogen werden, die die Aussagen und Ergebnisse erweitern.

Tabelle 2.1: Versuchsbetriebe mit den wichtigsten Sprengzielen

| Tagebau (Bundesland) | Festgesteine | Verbesserung der Haufwerks- stückigkeit | Optimierung der Sprenganlage | Stabilisierung oder Verringerung der Spreng- erschütterungs- immissionen |
|---------------------------------|---|--|---|---|
| Elbingerode (Sachsen-Anhalt) | organogener Kalkstein | Verbesserung und Vergleich- mäßigung; wenig Kornanteil < 30 mm | weitere Einsparungen erwünscht | ohne besondere Anforderungen |
| Winterberg (Niedersachsen) | organogener Kalkstein | Verbesserung und Vergleich- mäßigung; wenig Kornanteil < 30 mm | deutliche Optimierung der Sprenganlagen | ohne besondere Anforderungen |
| Koschenberg (Brandenburg) | Metaklastite / Metagrauwacke | ohne Probleme | Einsparungen der Bohr- und Sprengtechnik | eindeutige Stabilisierung und Verringerung erforderlich |
| Leukersdorf (Sachsen) | Rhyolith- Pyroklastite und Rhyolith (effusiv) | teilweise Verbesserung im Pyroklastitanteil | mögliche Optimierung erwünscht | eindeutige Stabilisierung und Verringerung erforderlich |
| Lüptitz (Sachsen) | Rhyolith (subvulkanisch) | Verbesserung der Stückigkeit | Einsparungen oder Erhöhungen zwecks besserer Stückigkeit | ohne besondere Anforderungen |
| Görsdorf (Sachsen) | Gneis (Paragneis) | Vergleich- mäßigung der Stückigkeit | ohne besondere Forderungen | eindeutige Stabilisierung und Verringerung erforderlich |

Tabelle 2.2: Sprengversuche in den Tagebauen mit den wesentlichsten Änderungen der Sprenganlagen

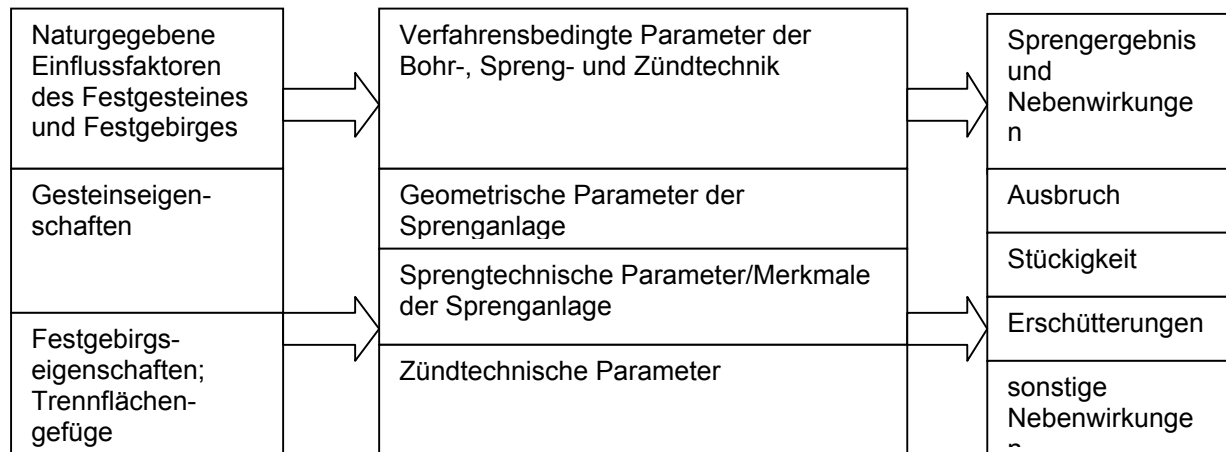
| Tagebau | Anzahl der Sprengversuche [alt] | Wesentliche Änderungen in der Sprenganlage | | | | |
|-------------|---------------------------------|--|--|---|--|---|
| | | geometrische Parameter [Bohrlochdurchmesser] (mm) | Sprengstoffart | spez. Sprengstoffverbrauch (kg/m ³) | Zündfolge [Verzögerungszeiten] (ms) | Einbruch |
| Elbingerode | 7 | durch Zündfolge und Bohrschema [95] | Nobelit 2030 Blendex / Nitram Emulgit 85 P Anfomex | 0,32 - 0,37 | Einzelloch Impuls [17, 25, 42] | links rechts asymmetrisch mittig |
| Winterberg | 5 | durch Zündfolge und Bohrschema [95] | Andex Eurodyn Nobelit 2030 | 0,19 - 0,32 | Einzelloch Impuls [20, 42] | links rechts mittig |
| Koschenberg | 16 [52] | durch Zündfolge und Bohrschemavergrößerung [92, 96, 102] | Nobelit 2030 Emulgit 22 P | 0,34 - 0,58 | Impuls mit Varianten [25, 42] | links rechts mittig |
| Leukersdorf | 9 [6] | durch Zündfolge [89, 92, 103] | Perunit Blendex 80 | 0,37 - 0,52 | Einzelloch geteilte Ladesäule Impuls [25] | links rechts mittig |
| Lüptitz | 10 | durch Zündfolge (nur ≥ 2. Reihe) [102] | Emulgit 85 P + Emulgit 22 P nur Emulgit 22 P | 0,46 - 0,55 | Einzelloch Impuls [25, 42] | asymmetrisch rechts mittig |
| Görsdorf | 8 | durch Zündfolge und Bohrraster [97, 102] | nur Nobelit 2030 | 0,46 - 0,87 | Einzelloch Impuls [25, 42] | links rechts asymmetrisch mittig |

3 Eingesetzte Messtechniken zur Erfassung wichtiger Eingangsgrößen

3.1 Überblick

Die im Rahmen des Forschungsprogramms erforderlichen Eingangsparameter und Messdaten der einzelnen Kategorien sind verallgemeinert in Tabelle 3.1 veranschaulicht.

Tabelle 3.1: Überblick der erforderlichen Eingangsgrößen für die objektive Bewertung von Sprengungen und deren Sprengergebnis



Bei der Erfassung von Eingangsgrößen, Ergebnissen und Ereignissen ist darauf zu achten, dass man die Messungen vor, während und nach der detonativen Sprengstoffumsetzung an den entsprechenden Stellen vornimmt.

Vor der Sprengung werden nachstehende Parameter erfasst oder festgelegt:

- Gesteins- und Gebirgseigenschaften im Bereich der Sprenganlage
- Vermessung der Sprenganlage und der ausgelegten oder fertiggestellten geometrischen Parameter
- Festlegung der Spreng- und Zündtechnik

Während der Sprengung sind zu messen:

- Ausbruchgeschwindigkeit
- Videoaufnahme des gesamten Ablaufes
- Dehnungs- und Schwinggeschwindigkeitsmessungen zur Erfassung der Erschütterungen

Nach der Sprengung werden aufgezeichnet:

- Haufwerkslage, -höhe, -weite, -auflockerung
- Haufwerksstückigkeit
- Tatsächliche Spreng- und Zündtechnik gemäß protokollarischer Dokumentation in den Versuchsbetrieben
- Mögliche Nebenwirkungen wie Lärm, toxische Schwaden oder Steinflug

Die Vielfalt der Einflussgrößen und der Komplex des Sprengergebnisses erfordern eine umfassende Messtechnik mit hohen Genauigkeitsansprüchen. Das Sprengergebnis wird zusammenhängend beurteilt nach:

- ⇒ Stückigkeit und Ladefähigkeit des Haufwerkes
- ⇒ Haufwerkslage (Höhe, Weite, Auflockerung)
- ⇒ Schwadenbildung
- ⇒ Erschütterungen
- ⇒ sonstige Nebenwirkungen und sicherheitliche Beurteilung

In den folgenden Kapiteln wird die eingesetzte Messtechnik zur Erfassung der wesentlichsten Parameter beschrieben. Ein Teil der ausgewerteten Größen zur Bohr-, Spreng- und Zündtechnik ist den betrieblichen Dokumenten und Angaben entnommen worden. Von jeder Sprengung existieren entsprechende Sprengprotokolle aus den Versuchsbetrieben.

3.2 Messung von gesteinsdynamischen Kenngrößen der Festgesteine

Die Ermittlung der akustischen Impedanz der Festgesteine ist sowohl für die Bewertung des Untergrundes am Standort der Erschütterungsmessgeräte als auch für die Zuordnung der Sprengbarkeit nach Bild 4.1 von erheblicher praktischer Bedeutung [MÜ 07d, MÜ 08b]. Daneben liefern die gesteinsdynamischen Untersuchungen eine Reihe von interessanten Kennwerten der Festgesteine, die im Rahmen der Beurteilung des Sprengvorganges und – ergebnisses von entscheidender Bedeutung sind. Als Messapparatur kommt das eigens für die Forschungsaufgabe angeschaffte Ultraschallmessgerät UKS-D, bestehend aus einem Ultraschall-Generator USG 40 und einem PC-Oszilloskop Pico Scope® 3224 der Fa. GEOTRON ELEKTRONIK Rolf Krompholz, Pirna zum Einsatz (Bild 3.1).

Zur Untersuchung von Gesteinsproben mit dem UKS-D ist es erforderlich, die Probestücke mittels Kernbohrungen aus dem Festgebirge oder größeren Klüftkörpern zu entnehmen. Das Bild 3.2 vermittelt die Probenahme beispielhaft vor Ort. Nach der Entnahme des Bohrkernes

aus dem Kernrohr werden die eigentlichen Prüfkörper mit einem Schlankheitsgrad von 1 : 2 zugeschnitten. Die Bilder 3.3 bis 3.8 zeigen die in den einzelnen Versuchsbetrieben genommenen Prüfkörper.

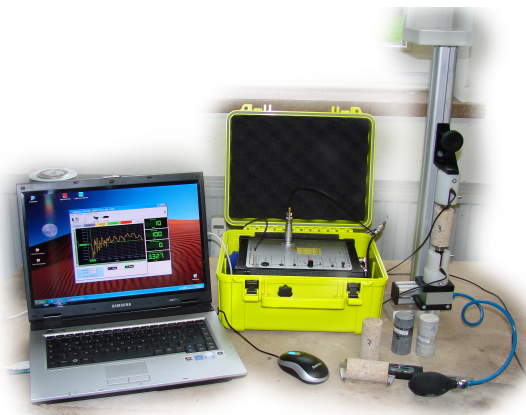


Bild 3.1: Messapparatur UKS-D der Fa. GEOTRON ELEKTRONIK mit PC



Bild 3.2: Einsatz eines Kernbohrgerätes zur Prüfkörperherstellung für das UKS-D-Messgerät



Bild 3.3: Prüfkörper des Tagebaues Elbingerode (Kalkstein)

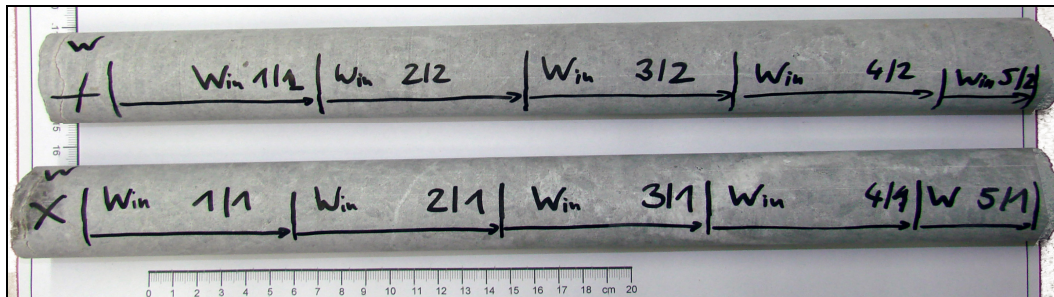


Bild 3.4: Prüfkörper des Tagebaues Winterberg (Kalkstein)



Bild 3.5: Prüfkörper des Tagebaues Koschenberg (Metagrauwacke)



Bild 3.6: Prüfkörper des Tagebaues Görzdorf (Gneis)

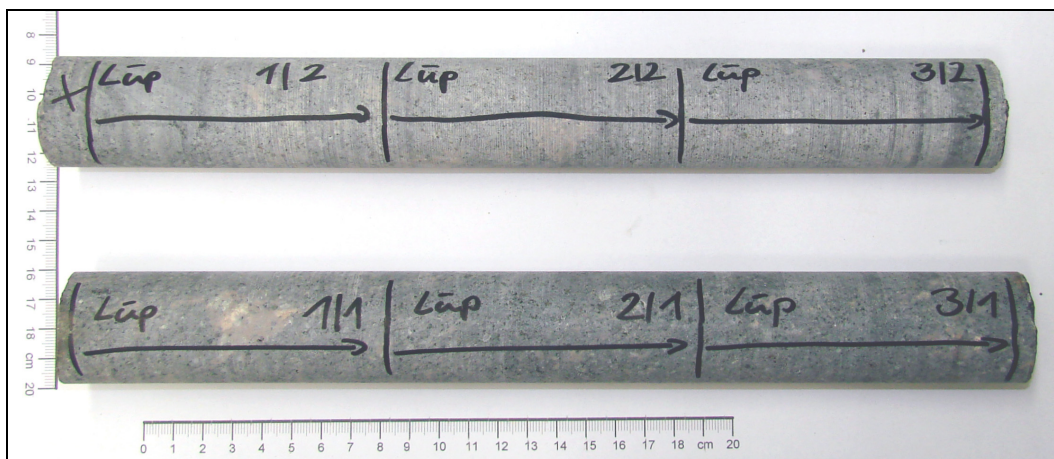


Bild 3.7: Prüfkörper des Tagebaues Lüptitz (Rhyolith)



Bild 3.8a: Prüfkörper des Tagebaues Leukersdorf (Rhyolith, Rhyolith-Pyroklastite mit verschiedenen Korngrößen)



Bild 3.8b: Prüfkörper des Tagebaues Leukersdorf (Rhyolith, Rhyolith-Pyroklastite mit verschiedenen Korngrößen)

An diesen Proben, die die Tagebauverhältnisse repräsentieren, wurden folgende gesteinsdynamischen Eigenschaften zerstörungsfrei und mit hoher Genauigkeit an den Festgesteinen bestimmt:

- P-Wellengeschwindigkeit [c_P] (m/s)
- S-Wellengeschwindigkeit [c_S] (m/s)
- Rayleigh-Wellengeschwindigkeit [c_R] (m/s)
- akustische Impedanz [Z_G] = Rohdichte [ρ_G] · P-Wellengeschwindigkeit [c_P] (kg/m²s)
- dynamischer Elastizitätsmodul [E_d] (kN/mm²)
- G- oder Schub-Modul [G] (kN/mm²)
- Poissonzahl [ν] (-)

Die Kenntnis dieser Parameter ist für die sprengtechnischen, energetischen und theoretischen Untersuchungen unerlässlich und zwingend erforderlich gewesen. Mit diesen gesteinsdynamischen Kennwertermittlungen wurde gleichzeitig eine neue kreative Möglichkeit zur sicheren, objektiven und umfassenden Beurteilung von Gesteins- und Baustoffeigenschaften eröffnet [MÜ 98b, MÜ 07d, MÜ 08b]. Diese Bestimmungen können gleichzeitig die Zusammenhänge zwischen Fest- und Lockergesteinen (Fels und Boden) vermitteln.

3.3 Erfassung des Trennflächengefüges der Festgebirge

Das natürliche Vorkommen der Festgesteine (Fels) sind die Festgebirge mit den jeweils geologisch-tektonisch bedingten Lagerungsverhältnissen, welche durch das Vorhandensein von Trennflächen gekennzeichnet sind [ML 63]. Infolge der räumlichen Regelung des Trennflächenanteiles und der wechselhaften Trennflächenabstände wird das Festgebirge felsmechanisch als

geregeltes Diskontinuum

aufgefasst. Die Trennflächen (syn. Kluffflächen, Rupturen, latente Risse) sind natürliche Brüche, entlang derer der Zusammenhalt des Korngefüges vom Festgestein aufgehoben ist und die eine genetisch bedingte, gesetzmäßige Raumstellung aufweisen. Brüche sind beispielsweise parallel zur Schichtung von Sedimentgesteinen - Schichtflächen, zur Schieferung von metamorphen Gesteinen - Schieferungsflächen, zur Fließrichtung von magmatischen Gesteinen - Fließflächen; Brüche durch Abkühlung von magmatischen Gesteinen - Absonderungs- oder Säulenflächen sowie entlang von Bewegungsbahnen innerhalb des Festgebirges - Störungsflächen.

Als Trennflächenschar werden annähernd parallele Trennflächen einer Richtung und Genese verstanden, wobei die Festgebirge in der Regel drei richtungskoordinierte Raumlagen aufweisen. Der Begriff des Trennflächengefüges umfasst die Ausbildung, Anordnung, Verteilung und Orientierung der Trennflächen bzw. Kluffkörper eines Homogenbereiches im Festgebirge gleicher Entstehung. Das wichtigste Merkmal des Festgebirges für die Sprengtechnik ist der Trennflächenabstand der einzelnen Trennflächenscharen. Der Trennflächenabstand ist der kürzeste Abstand zwischen den Trennflächen der gleichen Größenordnung und Trennflächenschar. Die natürlich vorkommen Festgebirge offenbaren sich felsmechanisch als bereits zerbrochene, gerissene Medien.

Für die sprengtechnisch-energetische Bewertung des Zertrümmerungsverhaltens kann man allgemein feststellen, dass für den Bruchbeginn und die -ausbreitung im Festgestein schon vor der Einwirkung von Verformungsenergie zum einen zahlreiche statistisch verteilte Systeme von natürlichen Rissen bzw. Fehlstellen im atomaren und Mikrobereich sowie zum anderen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten auftretenden Trennflächen im Mikro- und Makrobereich von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Je nachdem in welcher Größenordnung eine Beanspruchung erfolgt, werden diese Diskontinuitäten in der Rangfolge vom Makro- bis zum atomaren Bereich ihren Einfluss auf die Bruchentstehung und -intensität geltend machen.

Bei allen Festigkeitsuntersuchungen sind Rissbildungen und Brüche zu beachten, die ihrerseits bei Vorhandensein das erwartete Ergebnis deutlich verfälschen (Bild 3.9). Mit zunehmender Zertrümmerung des Gebirges müssen immer höhere Spannungen aufgebracht werden, um die Zerstörung zu vergrößern.

Die weitere Zertrümmerung von intensiv gerissenen und geklüfteten Festgebirge ist daher mit einem hohen Energieaufwand bzw. geringen Wirkungsgrad der Energieumsetzung verbunden.

Vor diesen bruchmechanisch bedeutsamen Hintergrund gehörte es zum Grundanliegen der Forschungstätigkeit, in den Versuchsbetrieben die Raumstellung und die Kluftabstände händisch zu erfassen. Die Erfassung der Raumstellung des Trennflächengefüges erfolgte mit dem zweikreisigen Geologenkompass der FREIBERGER PRÄZISIONSMECHANIK GMBH. Die Einzelwerte der Einfallrichtung und des Einfallwinkels wurden im sogenannten SCHMIDT'schen Netz ausgewertet. Das SCHMIDT'sche Netz ist die flächentreue, stereographische Projektion einer unteren Halbkugel mit Längen- und Breitenkreisen auf eine Ebene. In dem Diagramm wird die Normale einer Fläche in die untere Halbkugel als Durchstoßungs- oder Polpunkt eingetragen. Die Verteilung der Punkte wird so ausgewählt, dass man Linien gleicher Flächenprozentage statistisch ableiten kann. Die Trennflächenabstände wurden pro Schar gesondert, statistisch gesichert und unter Beachtung der Größenordnung bzw. Erstreckung der Flächen vorgenommen.

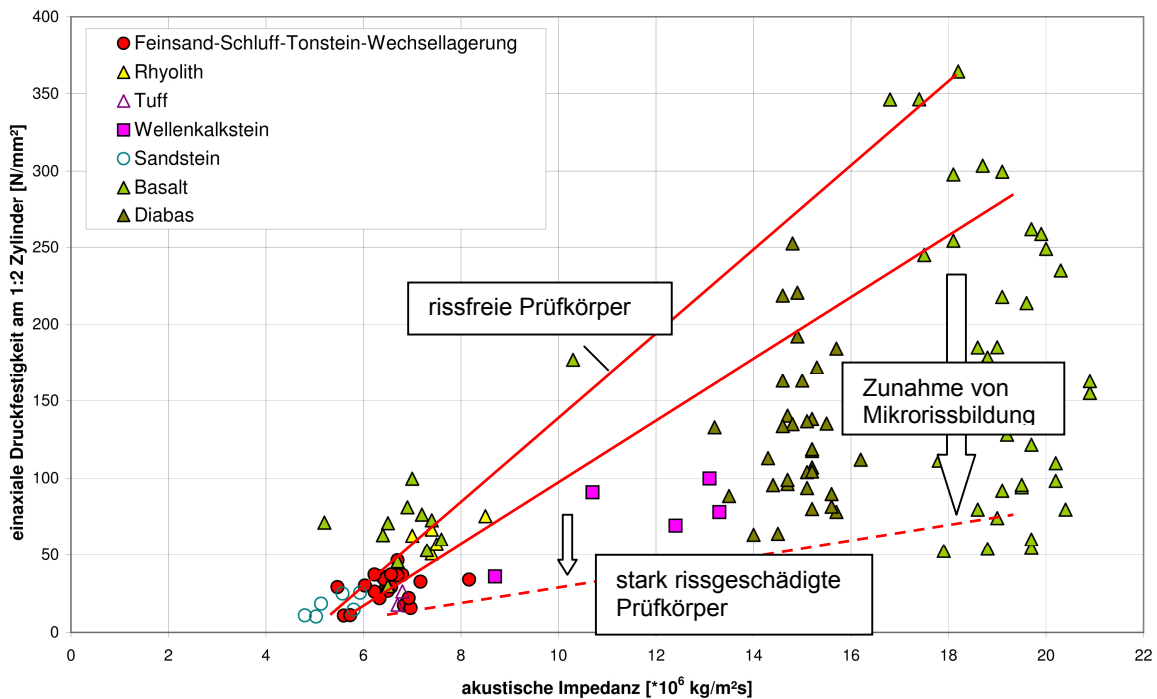


Bild 3.9: Zusammenhang zwischen akustischer Impedanz und der einaxialen Druckfestigkeit von nicht und rissgeschädigten Prüfkörpern

3.4 Ermittlung der geometrischen Parameter und Entfernungen mit der Laser-Technik

Mit einem 3-D-Laserscanner wird die Sprenganlage vor und das gesprengte Haufwerk nach der Sprengung erfasst. Der eingesetzte 3-D-Laserscanner der Fa. RIEGL LMS GMBH ist in Bild 3.10 dargestellt.

Aus den Ergebnissen der 3-D-Erfassungen werden die dreidimensionale Sprenganlage mit genauem Volumen, das erzielte Haufwerksvolumen, die Auflockerung des Haufwerkes, die Grabenbildung vor der Ausbruchböschung, die Haufwerkshöhe, die Haufwerksweite und weitere wichtige geometrische Parameter abgeleitet. Die eigentliche Bohr- und Sprenganlage wird sowohl durch den Tagebaubetrieb als auch durch unser Forscherteam mit verschiedenen Messsystemen abgesteckt und vorbereitet. Zur Ermittlung der Bohrlochabstände, Vorgaben, Reihenabstände, Geophon-, Radarsensor- und Dehnungssensorstandorte wird das Laserentfernungsmessgerät LEM 300 Geo der Fa. JENOPTIK eingesetzt. Die Messdaten beider Lasermesssysteme müssen in das bestehende und von den Betrieben zur Verfügung gestellte Festnetz der jeweiligen Tagebaurisse eingeordnet werden. Auf diese Weise wird eine genaue Position der Sprenganlage auf geografisch Nord bezogen innerhalb der Tagebaue ermittelt und kann damit hinsichtlich seiner Orientierung zur Raumstellung des Trennflächengefüges bestimmt werden.

Die genau eingemessenen Bohrschemata der einzelnen Sprengungen werden in das 3D-Bild vom Laserscanner eingeordnet, so dass eine optimale Bewertung der geometrischen Bedingungen und des räumlichen Bezuges zum Trennflächengefüge ermöglicht wird.

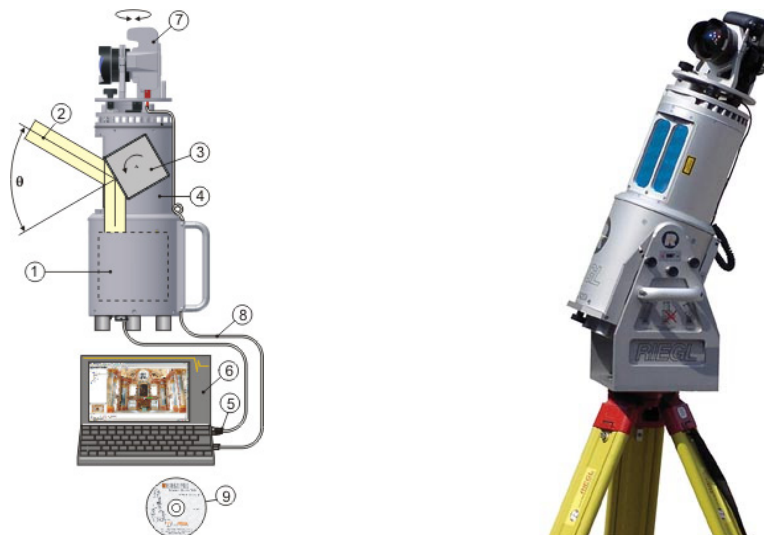


Bild 3.10: 3D-Laserscanner (Gerät und Funktionsskizze nach Herstellerangaben, www.riegl.com)

3.5 Messungen mit dem Radarsensor

Mit einem modifizierten Regen-Radar-Instrument vom Typ METEK, MVR 3 wurde die Ausbruchgeschwindigkeit der gezündeten Sprenganlagen in Richtung des Auswurfes bestimmt. Das Instrument ist ein frequenzmoduliertes Dauerstrich-Doppler Radar mit einer Leistung von 50 mW bei einer Frequenz von 24 GHz. Das eingesetzte Doppler-Radar-Gerät integriert Geschwindigkeit und rückgestreute Energie bzw. Reflektivität über einstellbare Zeit- und Entfernungsintervalle. In einer bestimmten Entfernung > 300 m kann der Kegel des Radarstrahles so weit streuen, dass die ausbrechenden Massen nahezu über die gesamte freie Böschungfläche der Sprenganlage erfasst werden (Bild 3.11) [BO 03].

Damit war gewährleistet, dass der Radarsensor in sicherer Entfernung vor der Sprenganlage aufgestellt werden kann. Die Geschwindigkeitsauflösung ist im Minimum 0,2859 m/s und in jedem Entfernungsintervall kann eine maximale Geschwindigkeit von 36,6 m/s mit dem Radargerät gemessen werden. Weiter ist hervorzuheben, dass der vom Radarkegel ausgestrahlte Messbereich die Geschwindigkeiten der meisten fliegenden Haufwerksstücke in den verschiedensten Richtungen auch durch Staub, Nebel, Schnee und Regen komplett erfasst. Es ist daher möglich, die Bewegungen des Haufwerkes auch von den nachfolgenden Reihen aufzunehmen, sofern diese nicht verdeckt werden. Die vom Gerät gemessenen Frequenzverschiebungen führen direkt zu einem Geschwindigkeits-Energie-Spektrum, d.h. zu rückgestreuter Energie - auch als Reflektivität bezeichnet - als Funktion von Entfernung und Geschwindigkeit [HR 02]. Das Gerät muss parallel zur Ausbruchrichtung aufgestellt werden, weil nur Geschwindigkeiten in Richtung des Radarstrahles genau gemessen werden können. Die Antenne des Gerätes ist ein parabolischer, im Durchmesser 60 cm großer Offsetspiegel. Der Radarkegel hat eine Apertur von 3° und bei einer Öffnung von 0,75° eine Dämpfung von 6 dB. Das Gerät sendet und empfängt gleichzeitig. Die empfangenen Daten werden gestapelt, gemittelt und jede Sekunde ausgelesen. Damit wurden je Messung jeweils 10 bis 11 gestapelte Spektren ermittelt. Die Auswertung der Messungen erfolgt mit einer speziellen Software der Universität Hamburg, Institut für Geophysik, die letztlich die Reflektivität auf der Ordinate in Abhängigkeit zur Ausbruchgeschwindigkeit auf der Abszisse angibt (Bild 3.12). Die Reflektivität ist indirekt mit der Größe des jeweils ausbrechenden Masseanteiles des Haufwerkes proportional.

Im Bild 3.12 sind Beispiele von ausbrechenden Haufwerksmassen im weniger geklüfteten, schwer sprengbaren Rhyolith von Lüptitz (links) und einem stärker geklüfteten, mittelschwer sprengbaren Festgebirge von Leukersdorf gegenübergestellt. Man erkennt tendenziell, dass gröberes Haufwerk eine höhere und sehr feinkörnige Massen eine geringere Ausbruchgeschwindigkeit aufweisen.

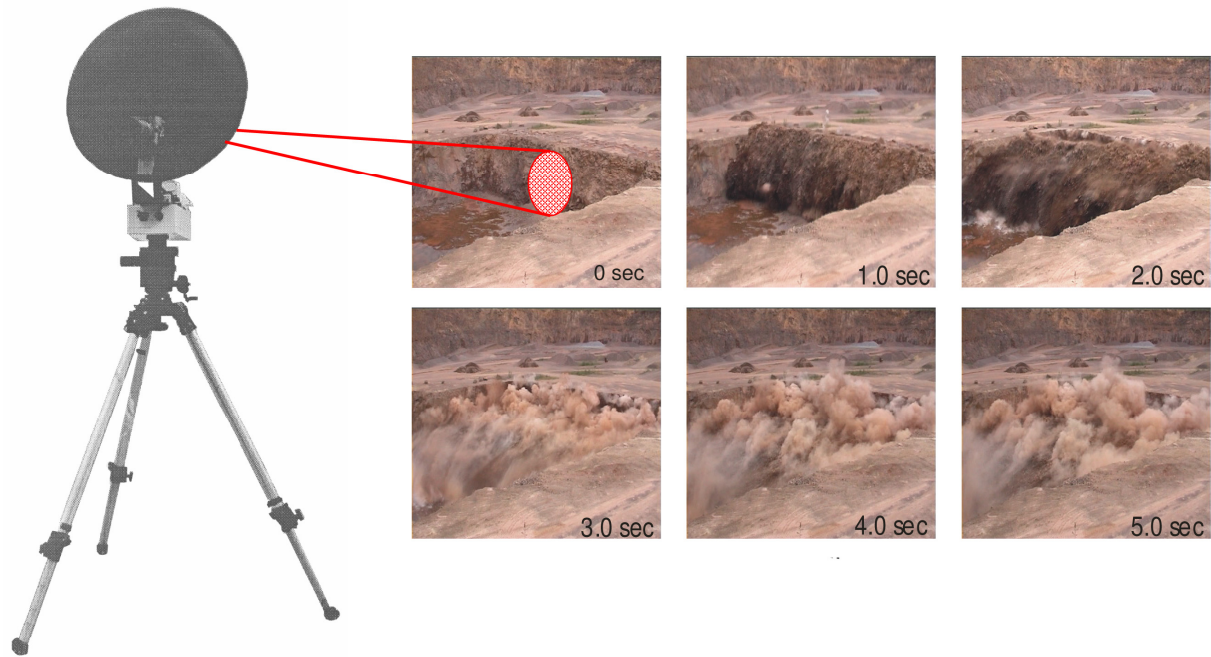


Bild 3.11: Messung der Ausbruchgeschwindigkeit einer Gewinnungssprengung mit dem Radar-Sensor (Radio Detection and Ranging) unter Ausnutzung des Dopplereffektes

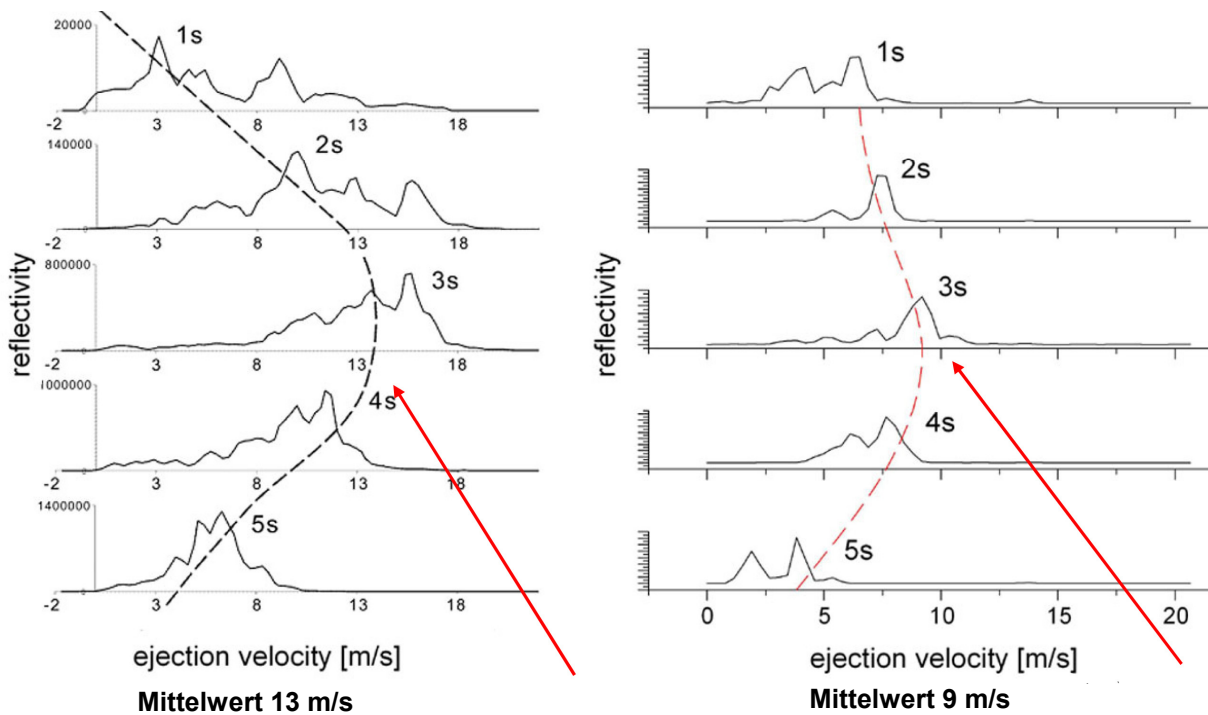


Bild 3.12: Ergebnisbeispiele der gemessenen Ausbruchgeschwindigkeiten in Beziehung zur Reflektivität für verschieden geklüftete und sprengbare Festgebirge im s-Takt

3.6 Erfassung der Detonationsgeschwindigkeit von Sprengstoffen in-situ

Während der Forschungsarbeiten stellte sich zunehmend heraus, dass die Detonationsgeschwindigkeit eine große Bedeutung für die unmittelbare Umsetzung des Sprengstoffes und seiner zertrümmernden Wirkung hat. Die bis dahin verwendeten Kennwerte der Detonationsgeschwindigkeiten stammen von den Herstellern. Die Detonationsgeschwindigkeit ändert sich durch das Einbringen in Bohrlöcher infolge der verschiedenen Bohrlochdurchmesser, der Einschlussverhältnisse und der Initiierungsart, so dass eine genaue Größe der Geschwindigkeit nur in-situ ermittelt werden kann [SH 98].

Dazu wurde seit März 2008 das c_d -Messgerät MINI TRAP (SIN 500 92) mit einer Auswertesoftware, welches freundlicherweise von der Fa. ORICA GERMANY zur Verfügung gestellt. Das Messprinzip dieses Gerätes beruht auf der Erfassung des Widerstands im elektrischen Stromkreis in Messsonden, basierend auf dem Ohm'schen Gesetz.

Das Messsystem besteht aus den Komponenten:

- Akku als Stromquelle
- Spezial-Widerstands-Koaxialkabel (mit $10,3 \Omega/m$) als „Messsonde“ bis ins Bohrlochtiefste verbracht, kurzgeschlossen mit dem Booster bzw. der Schlagpatrone verbunden
- digitales Speicheroszilloskop mit entsprechender Software zur Darstellung und Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit

Es können nur detonierende Ladungen gemessen werden, die im Bohrlochtiefsten gezündet werden. Fällt der untere Zünder aus, ist keine Messung möglich. Die Konstantstromquelle muss einen sehr geringen Strom freigeben, um den Zünder im Bohrlochtiefsten nicht zur frühzeitigen Detonation zu bringen [SH 98]. Das Gerätesystem ist robust, unter Temperaturbedingungen von -40 bis $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ einsetzbar und hat eine Gesamtspeicherkapazität von 1 Million Datenpunkte bei der Abtastfrequenz bis zu 1 MHz.

In den speziellen Anlagebänden für die Tagebaue sind die erfolgreichen Messergebnisse einzeln dokumentiert.

3.7 Haufwerksanalyse

Zwecks Nachweis der erreichten Zerkleinerungswirkung nach den Sprengungen mit und ohne Veränderung der Parameter ist es zwingend erforderlich eine Haufwerksanalyse durchzuführen. Nachdem sich die verschiedensten Systeme der automatisierten fotogrammetrischen Korngrößenermittlung hinsichtlich der erzielten Ergebnisse als zu ungenau erwiesen, wurde durch die Bearbeiter eine händische, fotogestützte Auswertung mit dem Ziel der Einordnung der Körnungslinie in das ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET-Netz (RRSB) entwickelt [DI 4/76, FR 96, HI 01, MI 01, MAR 06, OU 96, ZI 05]. Im Gegensatz zu anderen Autoren und Software-Entwicklungen wird die Haufwerksanalyse schrittweise wie folgt durchgeführt:

1. Fotografische Dokumentation der Oberflächen und Anschnitte des Haufwerkes mit einer hochauflösenden Digitalkamera und jeweils 10 Bildern sowie einem Maßstab von 2 x 1 m (Bild 3.13)
2. Maßstabsgerechtes Entzerren des Fotos (Bild 3.13, oben)
3. Zuordnung von Siebgrößen (> 16 mm) nach der Flächenmethode auf dem entzerrten Bild
4. Auszählen der Siebgrößen und Berechnung der Korngrößenanteile in Prozent der Durchgangssumme
5. Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung als Körnungslinie und im RRSB-Netz nach DIN 66145 (Bild 3.14)
6. Ermittlung von Haufwerkskennwerten wie Korngrößenmittelwert, Richtungsfaktor und Haufwerkskennziffer; Berechnung der spezifischen Oberfläche des Korngrößengemisches

Die auf diese Weise bestimmten Korngrößenverteilungen werden mit dem im Festgebirge vorhandenen Kluftkörpergrößengemisch sowie untereinander verglichen, um auf diese Weise die tatsächliche Zerkleinerungswirkung der Versuchssprengungen objektiv zu bestimmen [MÜ 74, MÜ 79]. Die eigens im Rahmen der Forschungsarbeiten entwickelte und beschriebene Vorgehensweise erbringt gegenüber anderen Verfahren wie WIPFRAG[®]; UNIFRAG[®] eine höhere Auflösung des Kornbandes von ≥ 16 mm sowie deutlich genauere Kornverteilungskurven des gesprengten Haufwerkes (Bild 3.14) [FR 96, HI 01].

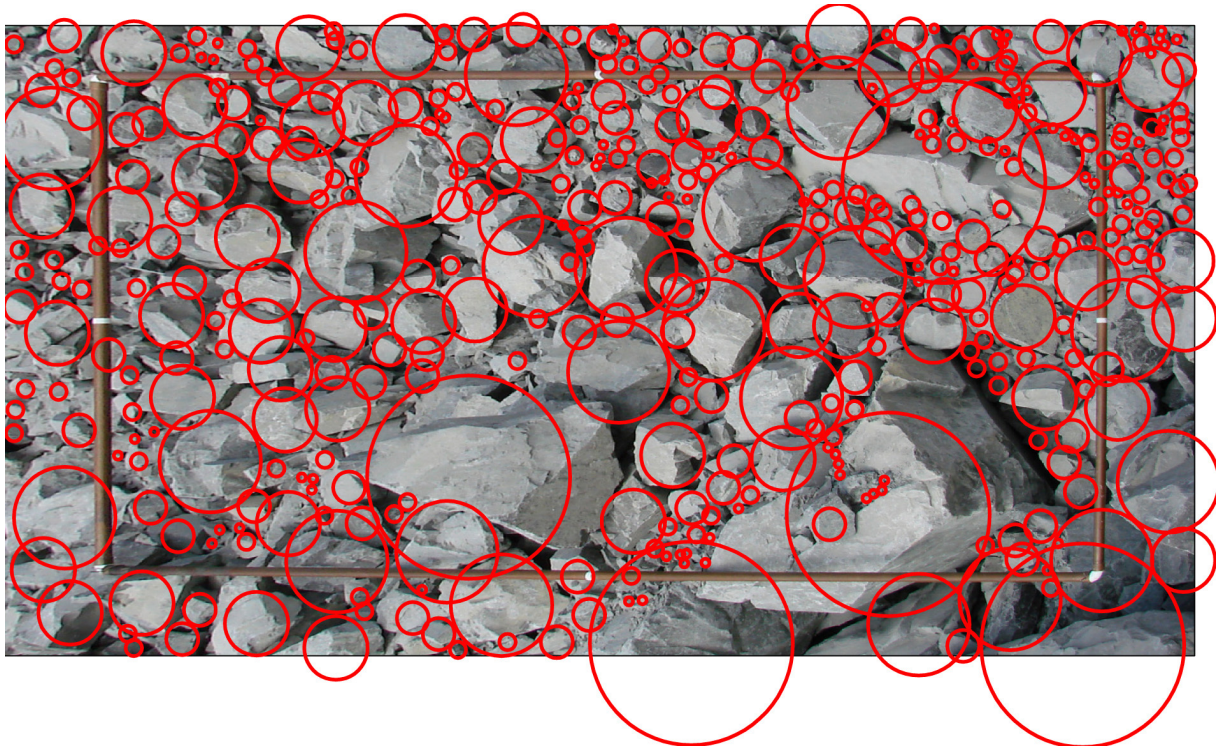


Bild 3.13: Beispiel eines entzerrten Fotos mit Maßstab 1 x 2 m (oben) und der Zuordnung von Siebgrößen (unten)

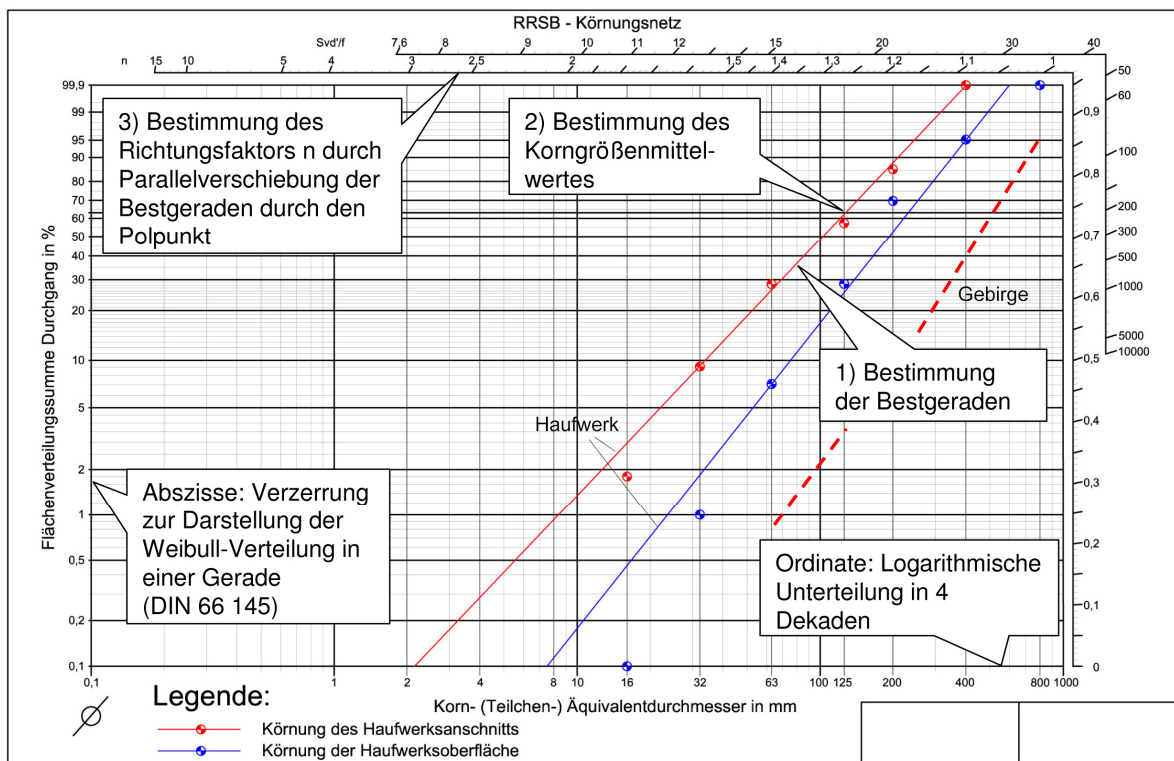


Bild 3.14: RRSB-Netz (ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET); spezielle Diagrammskalierung für die Daten von „Siebanalysen“

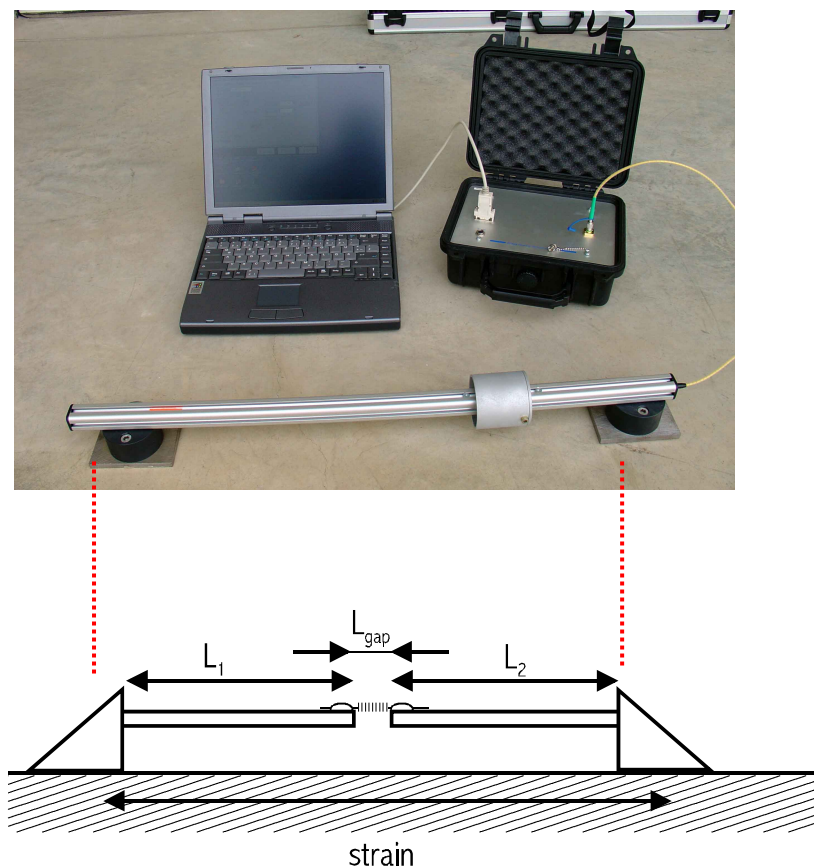
3.8 Dehnungsmessungen mit dem FBG-Sensor

Der für die hochauflösende Messung von Dehnungs-Stauchungszuständen entwickelte Sensor der Fa. AOS (ADVANCED OPTICS SOLUTIONS), Dresden besteht aus zwei Profilen, die mit ihren Enden auf dem zu messenden Material befestigt sind. Die Profile werden so dimensioniert, dass sie sich spielfrei ineinander schieben lassen. An der von außen sichtbaren Übergangsstelle ist die Faser mit BRAGG-Gitter befestigt. Dieses Gitter stellt das sie querende Licht als monochromatische BRAGG-Welle ein. Wird durch Dehnung- oder Stauung der Faser das Gitter verändert, ändert sich auch das Spektrum der BRAGG-Welle. Diese Veränderung wird gemessen und in eine Längenänderung umgerechnet. Aus dem Verhältnis des Abstandes der Befestigungspunkte der Glasfaser zu dem Abstand der Befestigungspunkte des Sensors bestimmt sich der Verstärkungsfaktor [BA 00a, BA 00b]. Lange Sensoren haben die höchste Genauigkeit und Auflösung (Bild 3.15). Kurze Sensoren können Dehnungszustände bis 3000 ... 3500 μm erfassen und sind geeignet, direkt hinter einer Bohrlochladung zu messen (Bild 3.16). Da die verwendeten Profile nur eine Verschiebung in der Längsachse des Sensors zulassen, wird eine Verfälschung des Messergebnisses durch Torsion vermieden. Das im Jahre 2000 entwickelte Messverfahren zur Bestimmung insbesondere von dynamischen Dehnungs-Stauchungszuständen über lange Zeiträume zeichnet sich im Gegensatz zu Dehnungsmessstreifen-Anwendungen durch hohe Driftstabilität der Sensoren und Störsicherheit gegenüber dem Einfluss elektromagnetischer Felder aus [BA 00a]. Es können Dehnungen von 0,1 – 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ bei einer maximalen Auflösung von 0,1 $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen werden.

Bei den Messungen wird der Sensor an der Messstelle stets senkrecht zur Hauptabstrahlrichtung der Sprenganlage mit dem intakten, nicht geklüfteten oder gerissenen Festgestein bzw. einem Bauelement in Gebäuden beispielsweise auf Beton mit einem Spezialkleber an den zwei Auflagepunkten fest verbunden oder verschraubt und kann zur Einzel- sowie Dauermessung genutzt werden. Zwischen beiden Klebeflächen wird die dynamische Dehnung bzw. Stauchung des massiven Elementes während der Erschütterungseinwirkung als direkte Messgröße erfasst. Durch das ausgereifte, robuste und genaue Messen mit Faser-BRAGG-Gitter-Sensoren kann statt der Ersatzgröße Schwinggeschwindigkeit die in eine Spannung umrechenbare Dehnung an der Sprengstelle, im Freifeld, an Gebäuden, Anlagen, Bauwerken jeder Art, unter und über Tage kurzzeitig und dauerhaft zeitbezogen erfasst werden. Der Einsatz von FBG-Sensoren garantiert sowohl im unmittelbaren Sprengbereich als auch im fernen Gebäude eine genaue Erfassung der Dehnungs- und Stauchungszustände und ist damit zur Bewertung von Sprengerschütterungsimmissionen objektiv geeignet. Unter starken dynamischen Einwirkungen beispielsweise im Nahbereich einer Sprengung können mit dem

Dehnungssensor lokale Verformungen zwischen den beiden Auflagepunkten nachgewiesen werden (Bild 3.17).

Im Fernbereich > 100 m bleiben solche Verformungen aus und man erhält Kurven, die anderen Schwingungsaufzeichnungen ähneln. Mit den Messergebnissen von Dehnungszuständen können somit gleichermaßen wie bei der Schwinggeschwindigkeit Frequenzanalysen mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) vorgenommen werden (Bild 3.18). Derartige Aufzeichnungen im Bild 3.18 gestatten eine recht genaue Zuordnung in die einzelnen Zündzeitstufen der Sprengung und helfen, die maximale Dehnung auf eine bestimmte Ladung zu beziehen.



$$\varepsilon = \frac{L_{gap}}{L_1 + L_2 + L_{gap}} \cdot \frac{1}{1 - p_e} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = GF \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Bild 3.15: Oben - PC-Auswerteeinheit und langer dynamischer Dehnungssensor mit einer Übersetzung von 10 : 1 sowie einem Messbereich von 0,1 ... 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$; Auflösung 0,1 $\mu\text{m}/\text{m}$; Unten - Beziehung zwischen der Dehnung ε und der definierten BRAGG-Wellenlänge monochromatischen Lichts [BA 00a]



Bild 3.16: Kurzer dynamischer Dehnungssensor mit einem Messbereich bis 3000 ... 3500 $\mu\text{m}/\text{m}$ (geeignet als Sensor hinter dem Bohrloch)

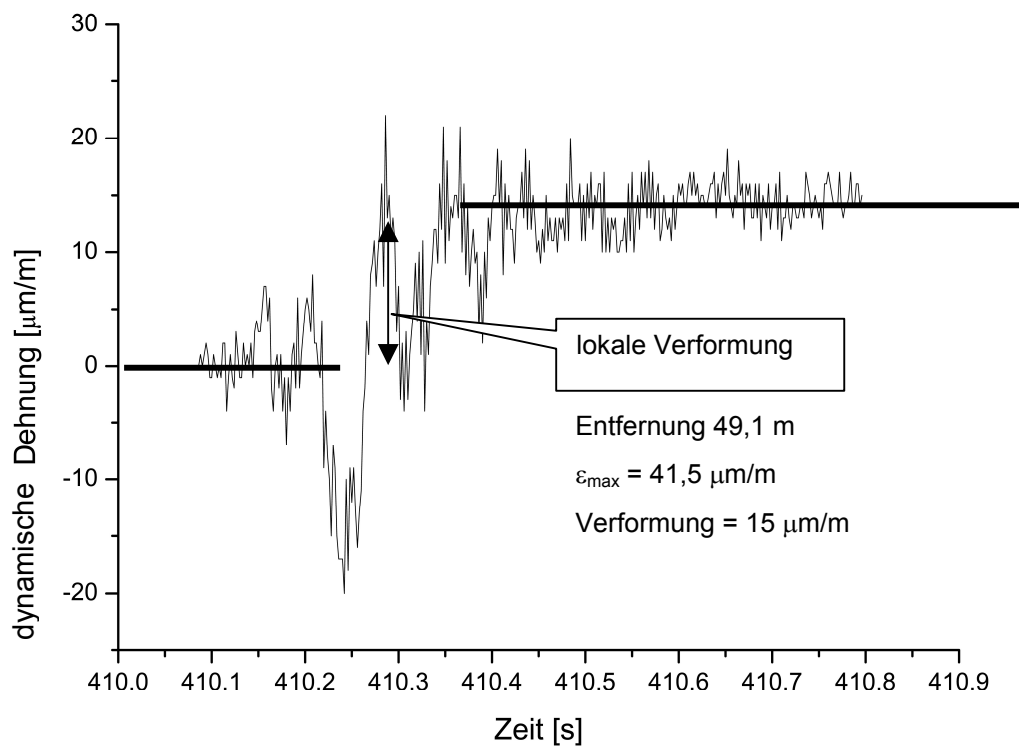


Bild 3.17: Beispiel eines dynamischen Dehnungs-Stauchungszustandes durch Sprengwirkung im Nahbereich bei 49,1 m von der nächstliegenden Bohrlochladung mit lokaler Verformung

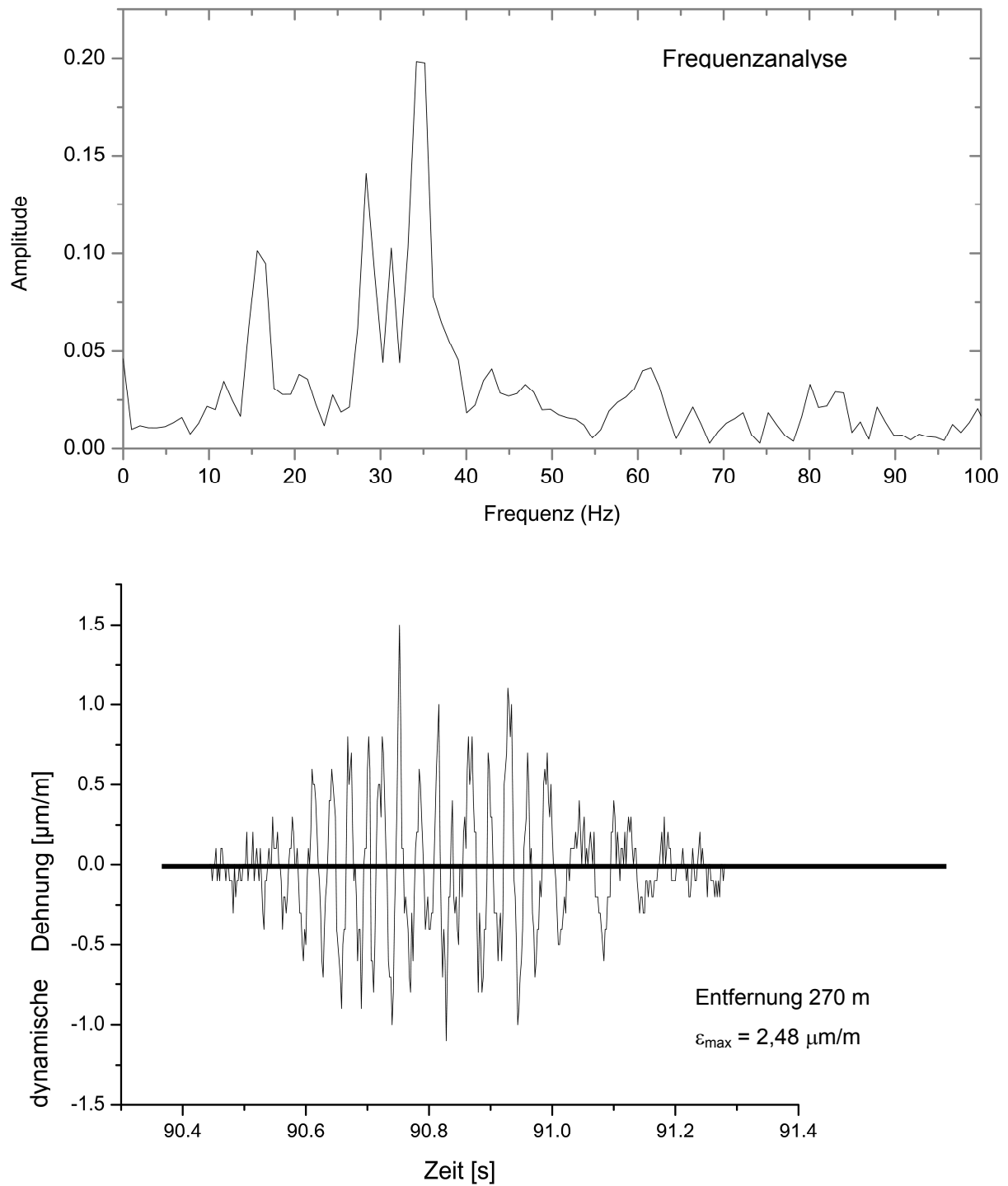


Bild 3.18: Beispiel eines dynamischen Dehnungs- und Stauchungszustandes durch Sprengwirkung im Fernbereich bei 270 m ohne Verformung am Messort; oben Frequenzanalyse der Dehnungskurve mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT)

3.9 Erfassung der Schwinggeschwindigkeit mit 3-Komponenten Geophonen

Jede Sprengung wird mit mehreren, systematisch aufgestellten 3-Komponenten Geophonen parallel zu den Dehnungsmessungen an verschiedenen Standorten hinsichtlich der Erschütterungsimmissionen überwacht. Es werden je zwei 4- bzw. 8-Kanal-Auswerteeinheiten mit bis zu acht Geophonen der Fa. METRON, Göteborg in Schweden eingesetzt.

Die Aufstellung der Geophone erfolgt im Freifeld so, dass diese auf festem, tragfähigem Untergrund aufgestellt werden und mit einer stets gleichen horizontalen Komponente x oder y zur Sprenganlage ausgerichtet sind. Es wird darauf geachtet, dass die Standorte systematisch vom Nah- (> 50 m) bis zum Fernbereich (max. 1200 m) angeordnet sind. Geringere Entfernungen zum Sprengort werden wegen der Ungenauigkeit der Geophone im stark belasteten Bereich weitestgehend vermieden. Auf diese Weise ist die statistisch wichtige Einflussgröße der Entfernung Sprengort - Messort ausreichend breit variiert. In den Gebäuden werden die Geophone im tiefsten Bereich und auf Untergründen verbracht, die eine gute Kopplung mit dem jeweiligen Bauraum garantieren. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeitskurven werden hinsichtlich des Kurvenverlaufes, der Einflüsse der einzelnen Zündzeitstufen und durch eine Frequenzanalyse pro Komponente systematisch bewertet (Bild 3.19).

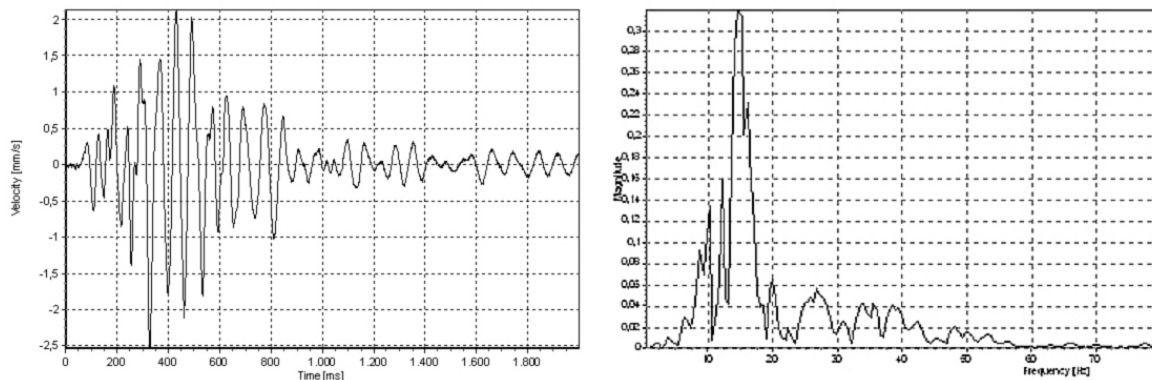


Bild 3.19: Beispiel einer Schwinggeschwindigkeitskurve in der x -Achse mit dazugehöriger Frequenzanalyse der Fast-Fourier-Transformation (FFT)

3.10 Zusammenstellung der Eingangsparameter für die Untersuchungen

In den nachfolgenden Tabellen 3.2 bis 3.5 werden die erfassten, berechneten, gemessenen Parameter und weitere für die Untersuchungen wichtige Eingangswerte sowie qualitative Merkmale zwecks Übersichtlichkeit zusammengestellt. Die Tabelle 3.2 enthält die

Festgesteins- und Festgebirgseigenschaften als grundlegende Parameter, die außerhalb und im Umfeld der Sprengungen systematisch ermittelt worden sind. Diese Eigenschaften wurden nicht vor jeder Sprengung einzeln erfasst, sondern nur bei Änderung entsprechend ergänzt. Zum besseren Verständnis der wichtigsten geometrischen Parameter einer Sprenganlage dient die Darstellung Bild 3.20.

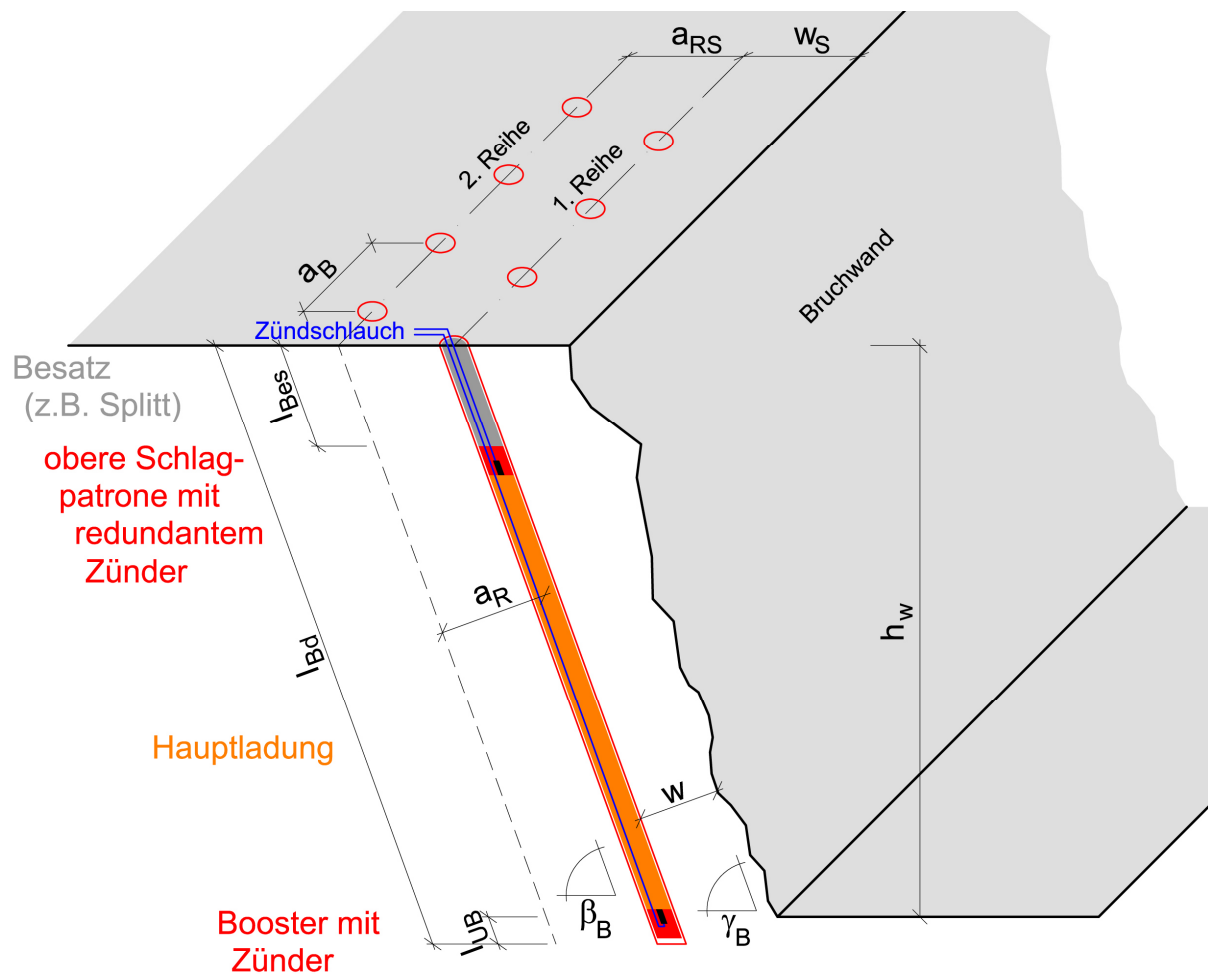


Bild 3.20: Geometrische Parameter einer Sprenganlage

Tabelle 3.2: Festgesteins- (1) und Festgebirgseigenschaften (2) als grundlegende Größen (Komplex 1)

| lfd. Nr. (1) | Festgesteinseigenschaften/ -merkmale (1) Gesteinsbenennung | Dimension | Kürzel | Bestimmung nach internat. Normen |
|--------------|--|------------------------|---|--|
| 1.1 | Rohdichte | $\frac{kg}{m^3}$ | ρ_G | Labor |
| 1.2 | P-Wellengeschwindigkeit (Druck) | m/s | c_P | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.3 | S-Wellengeschwindigkeit (Scher) | m/s | c_S | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.4 | R-Wellengeschwindigkeit (Rhyolith) | m/s | c_R | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.5 | Poisson-Zahl | - | ν | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.6 | akustische Impedanz | $10^6 \frac{kg}{m^2s}$ | Z_G | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.7 | dynamischer E-Modul | $\frac{kN}{mm^2}$ | E_d | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.8 | G-Schubmodul | $\frac{kN}{mm^2}$ | G | Ultraschallgenera tor USG 40 |
| 1.9 | Wasseraufnahme | M.-% | A_b | Labor |
| 1.10 | einaxiale Druckfestigkeit (1 : 2) | $\frac{N}{mm^2}$ | σ_D | Labor (Zylinder) |
| | Festgebirgseigenschaften/-merkmale (2) | | | |
| 1.11 | Homogenbereich *) | - | H_i | in situ |
| 1.12 | Raumstellung Trennflächengefüge für K1, K2, K3 | °) °) | Γ γ $\Gamma\gamma_1/\Gamma\gamma_2$ | statistisch gesichert, händisch |
| 1.13 | Trennflächenabstände je Klufthchar K ₁ K ₂ K ₃ | m m m | a_{K1} a_{K2} a_{K3} | statistisch gesichert, händisch |
| 1.14 | Kluftkörper, durchschnittlich | m ³ | V_{KK} | statistisch gesichert, händisch |
| 1.15 | Kluftkörperzusammensetzung | - | - | Korngrößenvertei lung aus a_{K1} , a_{K2} , a_{K3} |
| 1.16 | Kluft- oder Trennflächenreibungswinkel für K ₁ K ₂ K ₃ | °) °) °) | φ_{K1} φ_{K2} φ_{K3} | Abgleitertest |
| 1.17 | Kippwinkel (Kluftkörperformen) | °) | χ | Berechnung |
| 1.18 | Störungen (Einfallrichtung, -winkel) | °) | Γ_s, γ_s | beschreibend mit geometrischen Angaben |
| 1.19 | Kluffüllungen | - | - | beschreibend, Mineral |
| 1.20 | Klufföffnungen | mm | - | beschreibend, mit Öffnungen in mm |
| 1.21 | Bergwasserführung | - | - | beschreibend, Wasser in den Bohrlöchern |

*) Je Homogenbereich werden derartige Erfassungen des Trennflächengefüges erforderlich

Tabelle 3.3: Geometrische und bohrtechnische Parameter einer Sprenganlage vor den Sprengungen (Komplex 2)

| lfd. Nr. (2) | Geometrische und bohrtechnische Parameter | Dimension | Kürzel | Bestimmung |
|--------------|---|-------------------|-----------------------|--|
| 2.1 | Wandhöhe einer Sprenganlage | m | h_w | Laserscanner |
| 2.2 | Vorgabe, söhlig | m | w_s | Lasorentfernungsmessgerät |
| 2.3 | Vorgabe (echt) | m | w | Betriebl. |
| 2.4 | Vorgabe, gezündet | m | w' | Vermessung zeichnerisch |
| 2.5 | Reihenabstand, söhlig | m | a_{RS} | Lasorentfernungsmessgerät, Betriebl. |
| 2.6 | Reihenabstand (echt) | m | a_R | Vermessung |
| 2.7 | Reihenabstand, gezündet | m | a_R' | zeichnerisch |
| 2.8 | Bohrlochabstand | m | a_B | Lasorentfernungsmessgerät, |
| 2.9 | Bohrlochabstand, gezündet | m | a_B' | betriebliche Vermessung, zeichnerisch |
| 2.10 | Bohrlochlänge, durchschnittlich | m | l_{Bd} | Betriebl. Vermessung |
| 2.11 | Länge der Unterbohrung | m | l_{UB} | Betriebl. Vermessung |
| 2.12 | Einheitslänge Bohrloch | m | l_{Bo} | Rechengröße |
| 2.13 | Bohrlochdurchmesser | mm | d_B | Betriebl. Angabe |
| 2.14 | Bohrlochneigung | °) | β_B | Betriebl. Angabe |
| 2.15 | Anzahl der Reihen | - | n_R | Lasorentfernungsmessgerät |
| 2.16 | Anordnung der Bohrungen | - | - | beschreibend |
| 2.17 | Anzahl der Bohrungen, gesamt | - | n_B | Lasorentfernungsmessgerät |
| | 1. Reihe | - | n_{B1} | |
| 2.18 | Anzahl der Bohrungen | - | n_{B2} | |
| | 2. Reihe | - | $n_{B3} \dots n_{Bi}$ | betriebliche Angaben |
| | 3. Reihe | - | | |
| 2.19 | Gesamtbohrmeter | m | Bm_{ges} | rechnerisch |
| 2.20 | Volumen der Sprenganlage | m ³ | V_{Sp} | Laserscanner |
| 2.21 | (Volumen der Sprenganlage) | (m ³) | (V_{Sp}') | (Angabe lt. Sprengprotokoll) |
| 2.22 | Volumen je Bohrloch | m ³ | V_B | rechnerisch |
| 2.23 | Einheitsvolumen ($a_B' \cdot w' \cdot l_{Bo}$) | m ³ | V_o | rechnerisch |
| 2.24 | Endbesatz bzw. Zwischenbesatzlänge | m | l_{Bes}, l_{ZBes} | Betriebl. Angabe |
| 2.25 | Anzahl aller Einheitsvolumina der Sprenganlage | - | n_v | rechnerisch |
| 2.26 | Seitenverhältnis, gebohrt | - | λ_{SB} | rechnerisch |
| 2.27 | Seitenverhältnis, gezündet | - | λ_S | rechnerisch |
| 2.28 | Raumstellung der freien Böschungsfäche der Sprenganlage | °) | Γ_B | händisch |
| | Einfallrichtung | °) | γ_B | händisch |
| | Einfallwinkel | | | |

Tabelle 3.4: Spreng- und zündtechnische Parameter/Merkmale vor den Sprengungen (Komplex 3)

| lfd. Nr. (3) | Sprengtechnische Parameter | Dimension | Kürzel | Bestimmung |
|--------------|--|------------------|--------------------------------------|--|
| 3.1 | Sprengstoffe (der Handelsname wird angegeben und beim Kürzel als Index geführt) | | | |
| | TNT, Nitropenda | - | TNT | betriebl. Angaben |
| | gelatinöse Sprengstoffe | - | GE | betriebl. Angaben |
| | Emulsionssprengstoffe | - | EM | betriebl. Angaben |
| | Heavy ANFO | - | HA | betriebl. Angaben |
| | ANFO | - | AN | betriebl. Angaben |
| 3.2 | Gesamtladmenge | kg | W_s | betriebl. Angaben |
| 3.3 | Lademenge pro Bohrloch | kg | W_{Bi} | betriebl. Angaben |
| 3.4 | maximale Lademenge pro Bohrloch | kg | W_B | betriebl. Angaben |
| 3.5 | Lademenge pro Zündzeitstufe | $kg/Zst.$ | L_Z | betriebl. Angaben |
| 3.6 | maximale Lademenge pro Zündzeitstufe | $kg/Zst.$ | L_{Zmax} | betriebl. Angaben |
| 3.7 | Fußladung (untere Ladung) | kg | W_F | betriebl. Angaben |
| 3.8 | Haupt-/Schaft-/Kopfladung (obere Ladung) | kg | W_H | betriebl. Angaben |
| 3.9 | Volumen Gesamtladmenge | m^3 | V_{SG} | rechnerisch |
| 3.10 | Volumen Sprengstoff im Bohrloch | m^3 | V_{SB} | rechnerisch |
| 3.11 | Volumen Sprengstoffmenge pro Einheitsvolumen | m^3 | V_{SO} | rechnerisch |
| 3.12 | spezifischer Sprengstoffverbrauch | $\frac{kg}{m^3}$ | q | rechnerisch |
| 3.13 | Sprengstoffdichte einzelner Sprengstoffe für TN, GE, EM, HA, AN | $\frac{kg}{m^3}$ | $\rho_{S(TN)},$ $\rho_{S(GE)}...$ | betriebl. Angaben, Hersteller, Lieferant |
| 3.14 | durchschnittliche Sprengstoffdichte der eingesetzten Sprengstoffe der Sprenganlage | $\frac{kg}{m^3}$ | ρ_{sd} | rechnerisch |
| 3.15 | Detonationsgeschwindigkeit einzelner Sprengstoffe für TN, GE, EM, HA, AN | $\frac{m}{s}$ | $C_d(TN), d(GE),$ $d(EM) \dots$ | betriebl. Angaben, Hersteller, eigene Messungen (C_d') |
| 3.16 | durchschnittliche Detonationsgeschwindigkeit der eingesetzten Sprengstoffe der Sprenganlage | $\frac{m}{s}$ | C_{dd} | rechnerisch |
| 3.17 | durchschnittliches Schwadenvolumen mal Sprengstoffmasse der eingesetzten Sprengstoffe der Sprenganlage | m^3 | V_{SW} | rechnerisch, nach vorhandenen Herstellerangaben |
| 3.18 | Ladedichte | $\frac{kg}{m^3}$ | ρ_L | rechnerisch |
| 3.19 | Füllungsgrad | - | ξ | rechnerisch |
| 3.20 | Sprengschnur 12 g/m \varnothing 12 | kg | L_{S12} | nach betrieblichen Angaben |
| | Sprengschnur 20 g/m \varnothing 20 | kg | L_{S20} | nach betrieblichen Angaben |
| | Sprengschnur 40 g/m \varnothing 40 | kg | L_{S40} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.21 | Sprengschnur, gesamt in der Sprenganlage | kg | L_{SG} | nach betrieblichen Angaben |

Tabelle 3.4: (Fortsetzung) Spreng- und zündtechnische Parameter/Merkmale vor den Sprengungen (Komplex 3)

| lfd. Nr. (3) | Zündtechnische Parameter | Dimension | Kürzel | Bestimmung |
|--------------|--|---------------|--------------------|----------------------------|
| 3.22 | Zündverfahren, elektrisch | - | I_{el} | nach betrieblichen Angaben |
| | Zündverfahren, nichtelektrisch | - | I_{ne} | nach betrieblichen Angaben |
| | Zündverfahren, elektronisch | - | I_{eo} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.23 | Anzahl der Zündzeitstufen elektrisch | - | n_{zel} | nach betrieblichen Angaben |
| | Anzahl der Zündzeitstufen, nichtelektrisch | - | n_{zne} | nach betrieblichen Angaben |
| | Anzahl der Zündzeitstufen, elektronisch | - | n_{zeo} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.24 | Anzahl der Bohrlöcher je Zeitstufe | - | n_{BZ} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.25 | Verzögerungsintervall | ms | Δ_{tz} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.26 | Verzögerungszeit einer Ladung im Zündschema | ms | t_{zz} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.27 | Oberflächenverzögerungszeit | ms | t_{OF} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.28 | Verzögerungszeit zwischen redundanten Zündern eines Bohrloches | ms | t_{Red} | nach betrieblichen Angaben |
| 3.29 | letzte Verzögerungszeit (-zeitstufe) eines Zündschemas | ms | t_E | nach betrieblichen Angaben |
| 3.30 | Zeitstufe 1, 2 ... i | - | $Z_{1, 2 \dots i}$ | nach betrieblichen Angaben |
| 3.31 | Zündgeschwindigkeit einer Sprenganlage | $\frac{m}{s}$ | C_{zges} | rechnerisch |
| 3.32 | Ausbruchrichtung (\equiv Einfallrichtung der Ausbruchflächen) | °) | Γ_{AU} | rechnerisch |

Tabelle 3.5: Größen, Kennwerte des Sprengergebnisses und berechnete Eingangswerte für weitere Untersuchungen nach den Sprengungen (Komplex 4)

| lfd. Nr. (4) | Größen/Eingangswerte | Dimension | Kürzel | Bestimmung |
|--------------|--|---------------------------|-------------|-------------|
| | Parameter des Ausbruches und Sprengwirkung | | | |
| 4.1 | durchschnittliche Ausbruchgeschwindigkeit des Haufwerkes | $\frac{m}{s}$ | c_A | Radarsensor |
| 4.2 | maximale Ausbruchgeschwindigkeit des Haufwerkes | $\frac{m}{s}$ | c_{Amax} | Radarsensor |
| 4.3 | durchschnittliche Reflektivität | - | R_A | Radarsensor |
| 4.4 | maximale Reflektivität | - | R_{Amax} | Radarsensor |
| 4.5 | Ausbruchzeit der Sprengung | ms | t_A | Radarsensor |
| 4.6 | kinetische Energie der ausbrechenden Masse (Haufwerk) | $\frac{kg\ m^2}{s^2} = J$ | E_{kinM} | rechnerisch |
| 4.7 | potentielle Energie der ausbrechenden Masse (Haufwerk) | $\frac{kg\ m^2}{s^2} = J$ | E_{potM} | rechnerisch |
| 4.8 | Detonationsdruck des Sprengstoffes nach [CO 96) | $\frac{kg}{ms^2} = Pa$ | P_o | rechnerisch |
| 4.9 | Detonationsdruck der Zertrümmerungswirkung in einer Sprenganlage | $\frac{kg}{ms^2} = Pa$ | P_{ZM} | rechnerisch |
| 4.10 | wirksamer Detonationsdruck je Einheitsvolumen | $\frac{kg}{ms^2} = Pa$ | P_{ZO} | rechnerisch |
| 4.11 | dynamische Energie der gesamten Sprengladung | $\frac{kg\ m^2}{s^2} = J$ | E_S | rechnerisch |
| 4.12 | dynamische Energie der Bohrlochladung | $\frac{kg\ m^2}{s^2} = J$ | E_B | rechnerisch |
| 4.13 | dynamische Energie einer Sprengung | $\frac{kg\ m^2}{s^2} = J$ | E_{dyn} | rechnerisch |
| 4.14 | quasistatische Energie einer Sprengung | $\frac{kg\ m^2}{s^2} = J$ | E_{qstat} | rechnerisch |

Tabelle 3.5: (Fortsetzung) Größen, Kennwerte des Sprengergebnisses und berechnete Eingangswerte für weitere Untersuchungen nach den Sprengungen (Komplex 4)

| lfd. Nr. (4) | Größen/Eingangswerte | Dimension | Kürzel | Bestimmung |
|--------------|---|-------------------|-------------------------|--------------------------------|
| | Parameter des Haufwerkes | | | |
| 4.15 | durchschnittliche Korngröße bei 63,2 % Durchgang im RRSB-Netz | mm | $d_{63,2}$ | Haufwerks- analyse |
| | Haufwerksoberfläche | mm | $d_{63,20}$ | Haufwerks- analyse |
| | Haufwerksanschnitt | mm | $d_{63,2A}$ | Haufwerks- analyse |
| 4.16 | Haufwerkskennziffer | - | HKZ | Haufwerks- analyse |
| 4.17 | Richtungsfaktor (Anstieg der Summenkurve) | - | α_K | Haufwerks- analyse |
| 4.18 | Durchschnittliche Masse der Korngröße $d_{63,2}$ | kg | $AGSM$ | rechnerisch |
| 4.19 | spezifische Oberfläche einer Korngrößenzusammensetzung vom Haufwerk/Festgebirge | $\frac{m^2}{m^3}$ | O_K | rechnerisch |
| 4.20 | Haufwerkshöhe | m | h_M | Laserscanner |
| 4.21 | Grabentiefe (vom Haufwerk) | m | h_g | Laserscanner |
| 4.22 | Grabenbreite (vom Haufwerk) | m | a_g | Laserscanner |
| 4.23 | (Abstand Böschung-Hochlage-Haufwerk) | | | |
| 4.24 | Haufwerkswurfweite (Abstand Böschung- maximale Wurfweite) | m | a_M | Laserscanner |
| 4.25 | Haufwerksvolumen (nach betrieblichen Angaben) | m ³ | $V_M (V'_M)$ | Laserscanner |
| | Auflockerung des Haufwerkes | % | A | rechnerisch |
| | Erschütterungsmesswerte | | | |
| 4.26 | Entfernung Sprengort - Messpunkt bei Erschütterungsmessungen | m | r | Laserentfernungs- messgerät |
| 4.27 | maximale dynamische Dehnung | $\frac{mm}{m}$ | ε_{dyn} | Dehnungssensor |
| 4.28 | Vorzugsfrequenz der Dehnungs- Stauchungskurve | Hz | f_ε | Dehnungssensor |
| 4.29 | Verformung zwischen den Aufklebepunkten des Sensors | $\frac{mm}{m}$ | Δ_ε | Dehnungssensor |
| 4.30 | maximale Schwinggeschwindigkeit | $\frac{mm}{s}$ | ppv_{max} | Geophon |
| 4.31 | Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente | $\frac{mm}{s}$ | ppv_x | Geophon |
| 4.32 | Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente | $\frac{mm}{s}$ | ppv_y | Geophon |
| 4.33 | Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | $\frac{mm}{s}$ | ppv_z | Geophon |
| 4.34 | Frequenz der maximalen Schwinggeschwindigkeit | Hz | f_{max} | Geophon |
| 4.35 | Frequenz der x-Komponente | Hz | f_x | Geophon |
| 4.36 | Frequenz der y-Komponente | Hz | f_y | Geophon |
| 4.37 | Frequenz der z-Komponente | Hz | f_z | Geophon |
| 4.38 | Radius der Zone mit der nachgewiesenen Verformung Δ_ε | m | $r_{\Delta\varepsilon}$ | Dehnungssensor |

Aus diesen tabellarischen Zusammenstellungen ist ableitbar, dass für jede Sprengung mindestens 119 Einzelwerte, Merkmale und Beschreibungen zu ermitteln oder beschaffen waren. Es ist allerdings anzumerken, dass es bei einzelnen Sprengungen zu Messausfällen kam, die ihrerseits die verschiedensten Ursachen hatten. Auf diese Weise sind Lücken in der Datenerfassung vorhanden, die insbesondere die Messungen mit dem Radarsensor und die Haufwerksstückigkeit vom Anschnittsbereich betreffen. Die Detonationsgeschwindigkeit wurde bei allen Sprengungen ab April 2008 gemessen. Davon fielen drei Sprengungen im Tagebau Winterberg aus und andere schlugen zündtechnisch durch Versager im Bohrloch tiefsten fehl.

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Objektive Beurteilung der Sprengbarkeit eines Festgebirges

Bereits in früheren Arbeiten konnte durch Forschungsarbeiten nachgewiesen werden, dass die Sprengbarkeit bzw. Gewinnungsfestigkeit von Festgebirgen überwiegend von folgenden Eigenschaften abhängt [HE 93, MÜ 74, MÜ 79, MÜ 88, MÜ 90, MÜ 98b, MÜ 99, MÜ 06b, MÜ 08b]:

- Trennflächenabstände der Kluftscharen durchschnittlicher Kluftkörper des Festgebirges (Haupteinflussfaktor)
- akustische Impedanz des Festgesteines.

Das Bild 4.1 vermittelt den statistisch gesicherten Zusammenhang vom spezifischen Sprengstoffverbrauch zur durchschnittlichen Kluftkörpergröße bei vergleichbaren Sprengzielen. Als Sprengstoffe kamen ausschließlich gelatinöse Sprengstoffgemische mit ähnlichen Eigenschaften zum Einsatz, so dass eine statistische Bewertung möglich ist. Die durchschnittlichen Kluftkörper der Versuchsbetriebe sind in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

Die akustischen Impedanzen der Gesteine sind in Bild 4.2 zwecks Verdeutlichung der Streuung der Einzelwerte dargestellt. Die größten Unterschiede sind im Tagebau Leukersdorf (vergleiche Kapitel 5.4) anzutreffen, weil zwei verschiedene Gesteine das Festgebirge aufbauen. Aus diesem Grunde sind in Tabelle 4.1 für jeden Festgesteinskomplex des Tagebaues Leukersdorf die durchschnittlichen Kluftkörper getrennt angegeben worden.

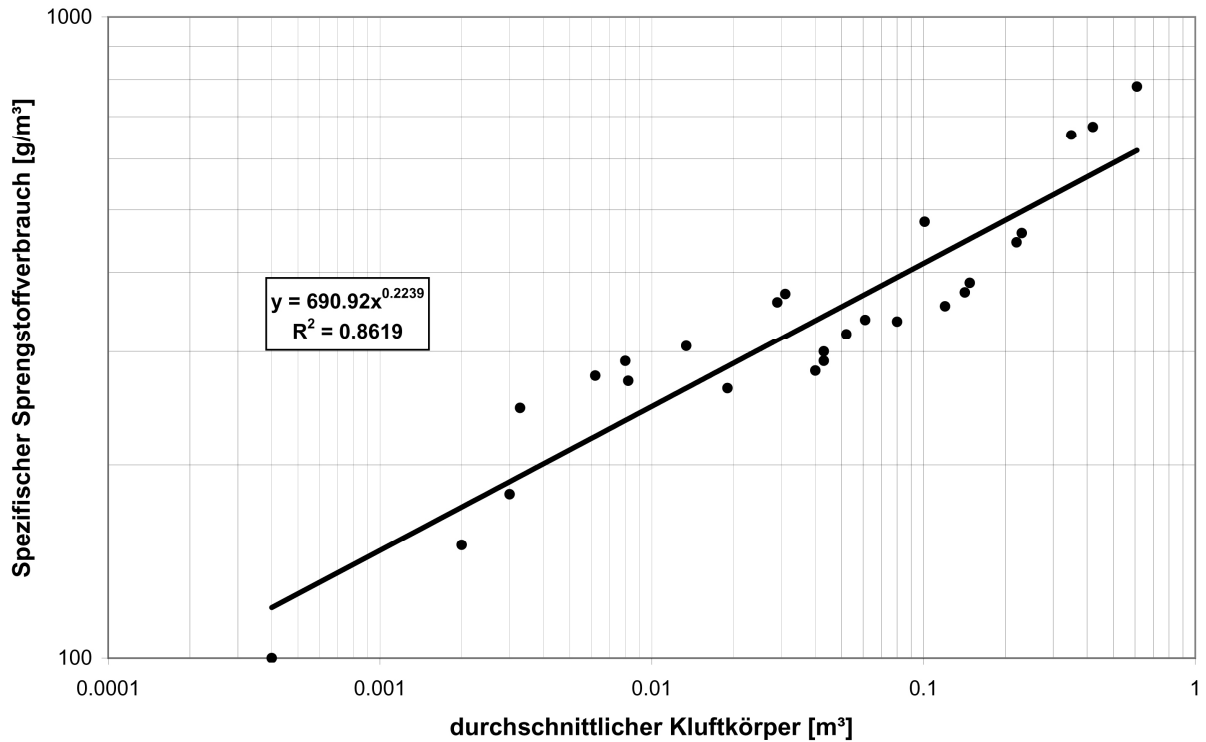


Bild 4.1: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Kluftkörpergröße und dem spezifischen Sprengstoffverbrauch vergleichbarer Sprengziele bei verwendetem gelatinösen Sprengstoff [MÜ 74, KL 74, Archiv]

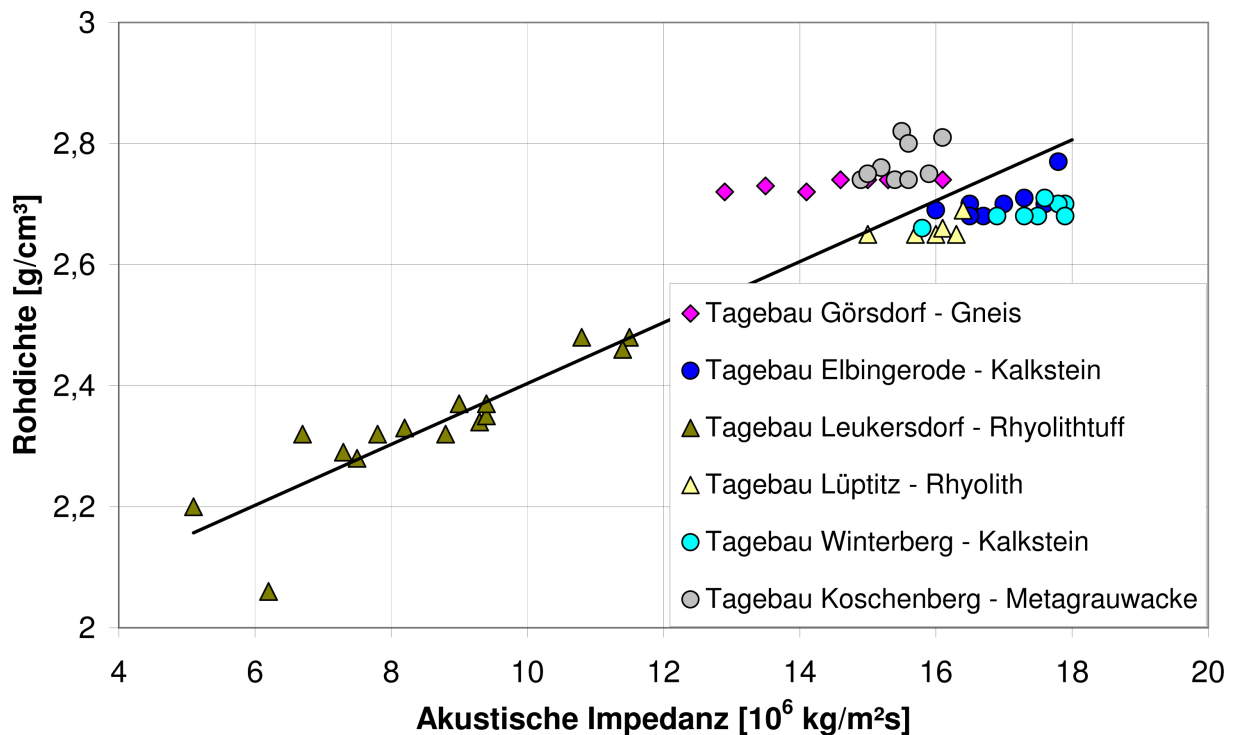


Bild 4.2: Die akustischen Impedanzen der untersuchten Festgesteine in Abhängigkeit zur Rohdichte zwecks Darstellung der Streuung der Einzelwerte

Tabelle 4.1: Durchschnittliche Kluffkörper der Festgebirge in den jeweiligen Tagebauen

| Tagebau | Gestein | durchschnittliche Kluffkörper (m³) | mittlerer Kluftabstand (m) |
|---------------|----------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 1 Elbingerode | Kalkstein | 0,5197 | 0,804 |
| 2 Görsdorf | Gneis | 0,047 | 0,360 |
| 3 Koschenberg | Meta-Grauwacke | 0,0130 | 0,235 |
| 4 Leukersdorf | Rhyolith-Pyroklastit | 0,051 | 0,371 |
| | Rhyolith | 0,026 | 0,296 |
| 5 Lüptitz | Rhyolith | 0,068 | 0,408 |
| 6 Winterberg | Kalkstein | 0,325 | 0,687 |

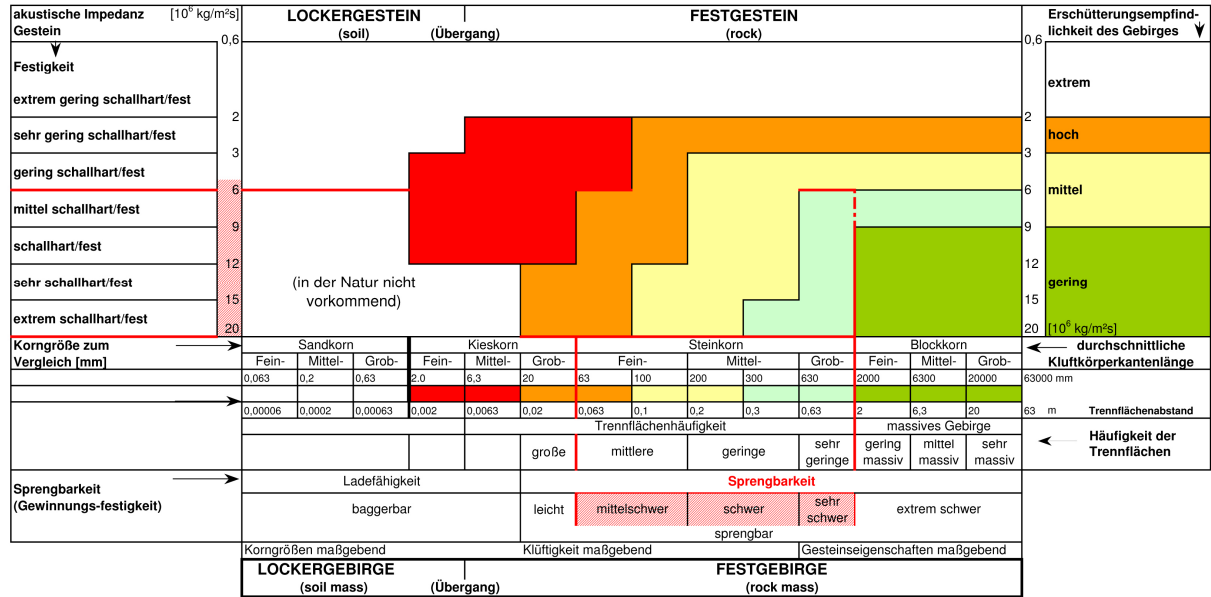


Bild 4.3: Klassifikation der Festgesteine und Festgebirge hinsichtlich der Sprengbarkeit/Gewinnungsfestigkeit auf der Grundlage der akustischen Impedanz, des Kluftabstandes bzw. der Kluffkörperkantenlänge (rote Bereiche entsprechen den Versuchsbetrieben) [MÜ 07a]

Die eigentlichen Klassifikationen der Festgesteine und Festgebirge hinsichtlich der Sprengbarkeit bzw. Gewinnungsfestigkeit wurde nach Bild 4.3 vorgenommen [MÜ 79, MÜ 88, MÜ 98b, MÜ 06b, MÜ 07a, MÜ 08b]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden dazu die Eingangsparameter nach dem neuesten Stand der Technik umfassend und objektiv bestimmt (Bild 3.2).

Die Zuordnung der Sprengbarkeit nach Bild 4.3 gestattet es, eine fundierte wissenschaftliche Bewertung und einen sachlichen Vergleich der einzelnen Gewinnungsbetriebe vorzunehmen. Die Einteilung gestattet zudem eine Einschätzung der erwarteten Erschütterungsempfindlichkeit des Festgebirges (Bild 4.3). Die Beschaffenheit des Trennflächengefüges ist der bedeutendste Einflussfaktor des Festgebirges für den erforderlichen bohr- und sprengtechnischen Aufwand (Bild 4.1) [MÜ 74, HE 93]. Ohne Berücksichtigung des Trennflächengefüges insbesondere des Trennflächenabstandes sind sprengtechnische Wirkungen nicht ergründbar. Aus diesem Grunde wurden die

Sprengversuche ausschließlich unter realistischen Bedingungen in den Tagebauen durchgeführt. Zum Nachweis dieser Feststellungen dient das Bild 4.4, welches die Summenkurven von Kluftkörperzusammensetzungen der Festgebirge in den Tagebauen Koschenberg, Lüptitz und Elbingerode zeigt.

Nach Bild 4.3 und den gemessenen Eingangswerten werden die Sprengbarkeiten der Tagebaue wie folgt bewertet:

- 1) Elbingerode sehr schwer sprengbar
- 2) Görzdorf schwer sprengbar
- 3) Koschenberg mittelschwer bis schwer sprengbar
- 4) Leukersdorf schwer sprengbar; teilweise mittelschwer sprengbar
- 5) Lüptitz schwer sprengbar; teilweise sehr schwer sprengbar
- 6) Winterberg sehr schwer sprengbar.

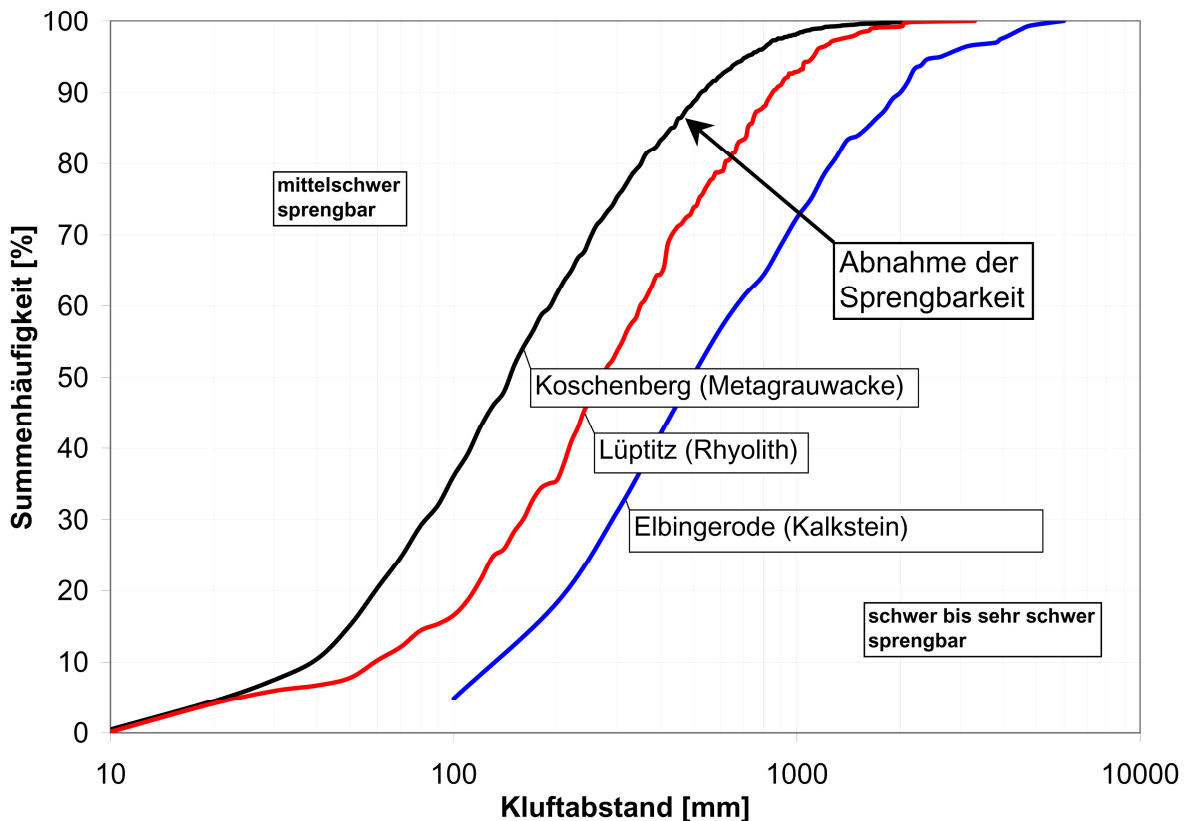


Bild 4.4: Vergleich der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzungen von den Tagebauen Elbingerode, Lüptitz und Koschenberg

4.2 Anwendung der Prinzipien der Impulstheorie

Als vereinfachte Modellvorstellung wird die Impulstheorie zur detonativen Sprengstoffumsetzung mit ihren Grundprinzipien der theoretischen Bewertung der Forschungsansätze zu Grunde gelegt [MÜ 88, MÜ 01a, MÜ 01b, RO 01; MÜ 02a, MÜ 03a, MÜ 03b]. In Erweiterung und Verbesserung des theoretischen Ansatzes wird eine energetische Bewertung des Sprengvorganges und eine verbesserte bis volle Ausnutzung der verfügbaren Sprengenergie angestrebt [MÜ 01a]. In das stehenbleibende Festgebirge hinter der abhebenden Sprengmasse wird durch den Detonationsdruck ein Kraftstoß

$$\Delta I_{RM} = F \cdot \Delta t \quad (\text{Kraft} \cdot \text{Zeit}) \quad [Ns] \quad (6)$$

eingetragen, der phänomenologisch mit dem Rückstoß beim Schusswaffengebrauch vergleichbar ist. Die entstehenden Erschütterungsimmissionen hinter der Sprengstelle werden deshalb als Impuls- oder Energie-Abstandsbeziehungen verstanden und in eine neuartige Erschütterungsprognose überführt (Kapitel 7). Das aus dem Verband des Festgebirges als Sprengmasse gelöste Haufwerk wird mit der gemessenen Ausbruchgeschwindigkeit abgeworfen, wobei ein Impulsmoment von

$$I_M = m_M \cdot c_M \quad \left[\frac{kgm}{s} \right] \quad (7)$$

bzw. eine kinetische Energie von

$$E_{kin_M} = \frac{m_M \cdot c_M^2}{2} \quad \left[\frac{kgm^2}{s^2} \right] \quad (8)$$

für den gesamten Haufwerkskörper ermittelt werden kann. Es ist bei der quantitativen Bewertung und physikalischen Durchdringung dieser Vorgänge von besonderem Interesse in welcher Größenordnung sich die Sprengstoffenergie der Lademengen, deren Verteilung und Zündfolge auf das umgebende Medium, die Zertrümmerung, den Abwurf und die Erschütterungen auswirkt. Nur mit der Kenntnis der energetischen Umsetzung kann eine optimale Ladungsbemessung, -verteilung und zündtechnische Abfolge entwickelt werden. Zur Untersuchung dieser Wirkungsweisen müssen folgende Grundsätze beim Sprengen nach den Vorstellungen der Impulstheorie eingehalten werden [MÜ 01, MÜ 04b]:

- Jede Sprengung ist unter Beachtung des Sprengzieles grundsätzlich nach den Trennflächenabständen und der Raumstellung der Trennflächen zu bemessen [HE 93].
- Die Sprenganlagen werden vorzugsweise als Mehrreihensprengung ausgelegt.
- Die Mehrreihensprengungen sollten möglichst gleichmäßige Bedingungen der Bohrlochtiefe, -abstände, -neigung, Vorgaben und Reihenabstände haben, die eine Grundvoraussetzung für die optimale Umsetzung darstellen.
- Die Zündung soll mit einheitlicher progressiver Zündfolge und weitestgehend gleichmäßig gestaffelter Verzögerungszeit erfolgen (Bild 4.5).
- Bei der Verknüpfung mehrerer Bohrlöcher zu einer Zeitstufe ist ein stumpfer Ausbruchwinkel zur freien Fläche anzustreben (Bild 4.5).
- Im Einbruchbereich oder bei verspannten Ausbruchverhältnissen können zusätzliche Hilfslöcher entsprechend des Ausbruchwinkels vorgesehen werden, damit sich die Sprengung in gleichmäßigen Platten aus dem Gebirge löst.
- Zur Vermeidung der Stoßwellenüberlagerung aus unterschiedlichen Winkeln ist der Einbruch entweder nur von einer Seite oder mittig rechts und links zeitlich versetzt vom verspannten Bereich zur freien Fläche zu führen.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten sollte vorzugsweise nachgewiesen werden, inwieweit durch das gemeinsame Zünden benachbarter Ladungen eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Sprengstoffenergie erreicht werden kann. Wenn sich die Stoßwellen der einzelnen Ladungen gemäß Bild 4.6 wirkungsvoll überlagern, sollte gleichermaßen der gerichtete Abwurf möglich und die Erschütterungsemission beeinflussbar sein.

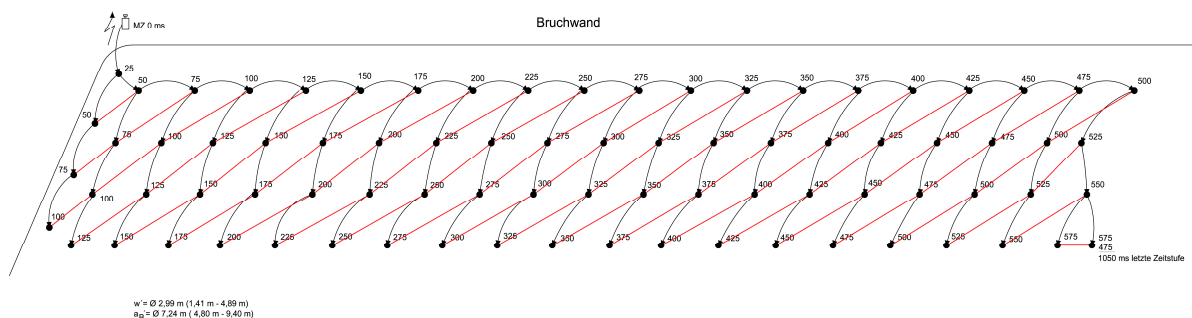


Bild 4.5: Zündfolge der Großbohrlochsprengung vom 06. 05. 2008 im Tagebau Elbingerode nach den Prinzipien der Impulstheorie (Beispiel)

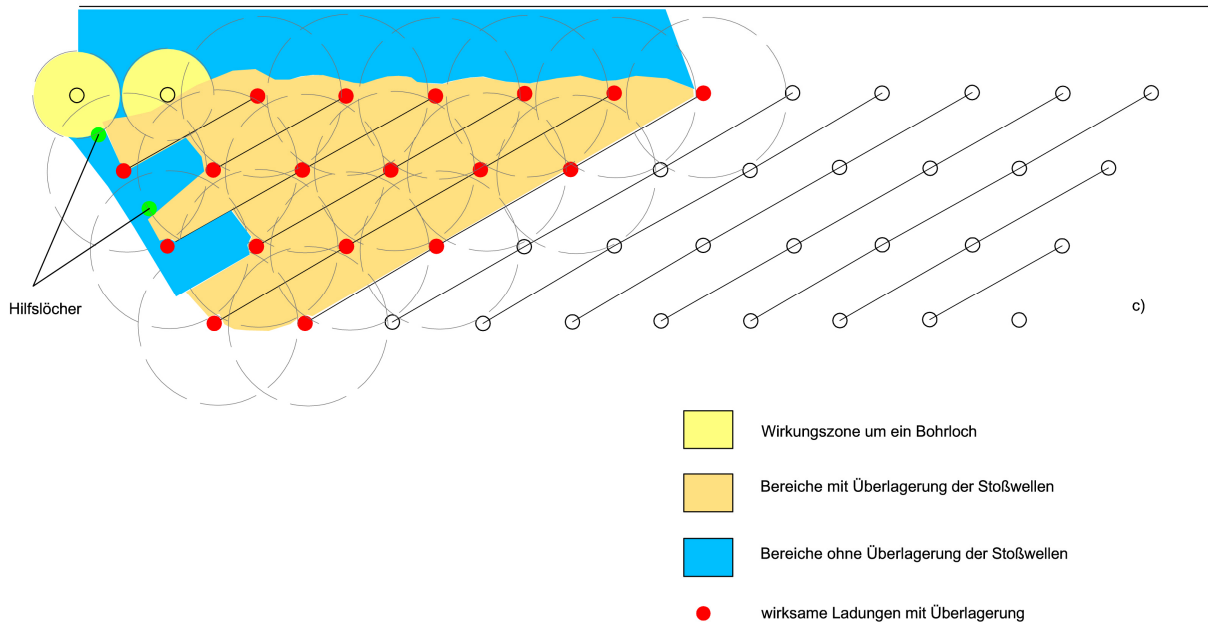


Bild 4.6: Prinzip der Überlagerung von Stoßwellen bei gleichzeitiger (simultaner) Zündung von Ladungen nach der Impulstheorie

4.3 Physikalisches Modell der Wirkungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung

Im Ergebnis der Auswertung der Einzeldaten der Sprengungen mit dem theoretischen Ansatz der Impulstheorie und deren Zusammenhänge entstand das in Bild 4.7 vereinfacht dargestellte Modell. Bei der Entwicklung des Modells wurde besonderer Wert auf physikalisch belegbare Eingangsgrößen gelegt und insbesondere eine energetische Betrachtung der Vorgänge angestrebt. Die bei detonierenden Ladungen stets entstehenden Erschütterungen werden in dem Modell wie folgt definiert (Bild 4.7):

$$ppv_{\max} = k \left(W_B \cdot c_d \cdot r^{-n} \right)^m \quad \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (9)$$

oder

$$\varepsilon_{\max} = k' \left(W_B \cdot c_d \cdot r^{-n'} \right)^{m'} \quad \left[\frac{mm}{m} \right] \quad (10)$$

Gültigkeit der Beziehungen:

- W_B , c_d und $r \pm 20\%$ entsprechend der gemessenen Eingangsgrößen
- Zündfolge nach den Prinzipien der Impulstheorie oder Einzellochzündung

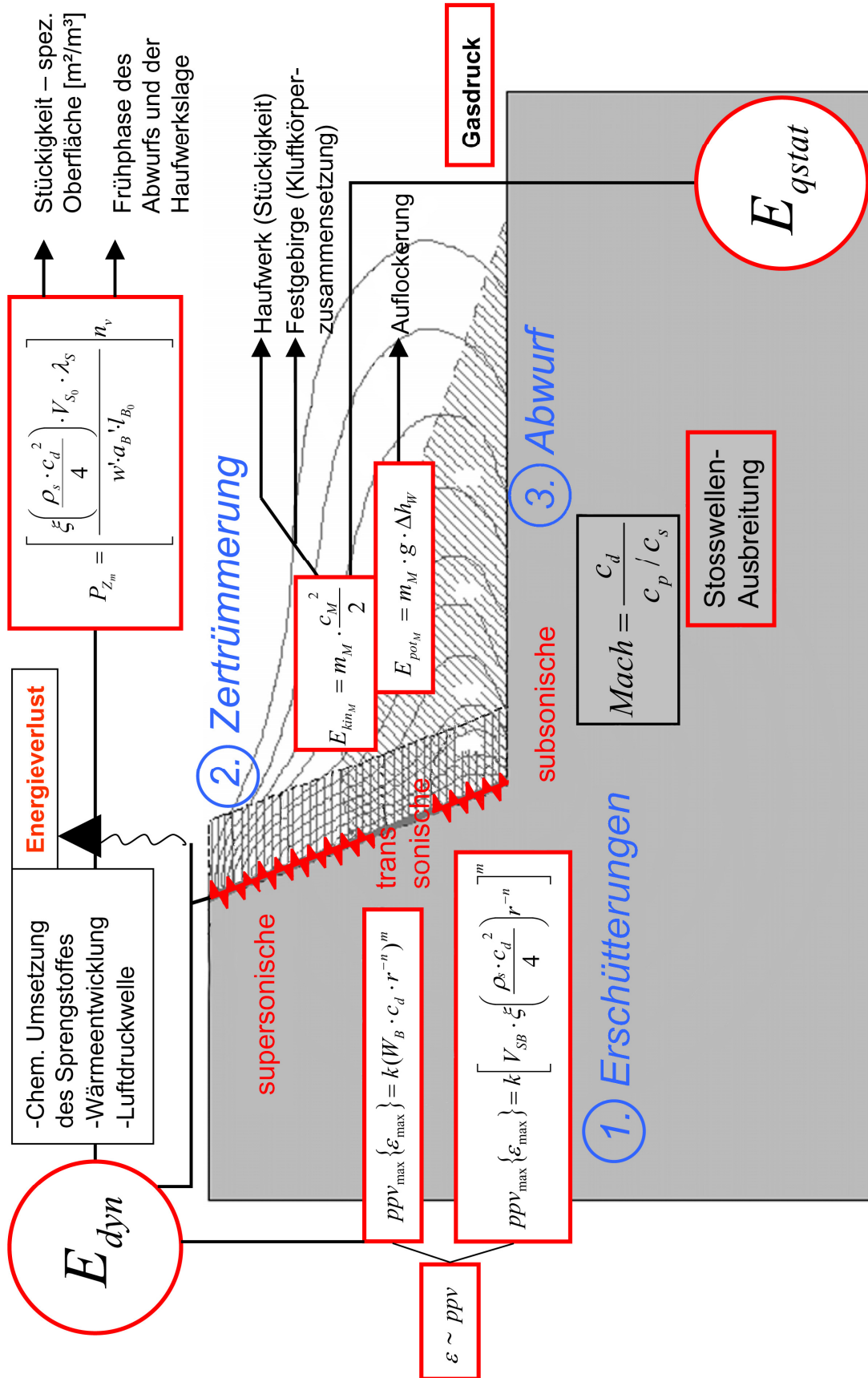


Bild 4.7: Neues physikalisches Modell der Wirkungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung

Diese Impuls-Abstandsbeziehungen (4) und (5) haben sich seit 2003 in der Praxis mehrfach bewährt [FI 06, MA 05, MÜ 03b, MÜ 03c, MÜ 03d, MÜ 04a, MÜ 05/06, MÜ 07a, MÜ 07c]. Nach den Ergebnissen im Rahmen der Untersuchungen wäre anstatt des Produktes ($W_B \cdot c_d$) die Energie der Bohrlochladung zu setzen

$$E_B = V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \quad \left[\frac{kgm^2}{s^2} \right] \quad (11)$$

Die Berechnung der Größe des Detonationsdruckes von Sprengstoffen wurde nach übereinstimmenden Angaben von [CO 96] übernommen [vergleiche CU 04, ES 06, HU 99, LE 99]. Setzt man den Ausdruck E_B (11) in die Beziehung (9) und (10) statt ($W_B \cdot c_d$) ein, erhält man die Energie-Abstandsbeziehung für die Schwinggeschwindigkeit (12) bzw. die dyn. Dehnung (13):

$$ppv_{\max} = k \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) r^{-n} \right]^m \quad \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\max} = k' \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) r^{-n'} \right]^{m'} \quad \left[\frac{mm}{m} \right] \quad (13)$$

Der sich im Bohrloch aufbauende Detonationsdruck des Sprengstoffes wird durch den Füllungsgrad auf- oder abgewertet und mit dem Sprengstoffvolumen eines Bohrloches multipliziert. Daraus ermittelt man den im Bohrloch entstehenden Detonationsdruck, der zwangsläufig auch im Bereich zur Vorgabe bzw. freien Fläche wirken muss (vergleiche Beziehung (18)). Durch die nachgewiesene Proportionalität der dynamischen Dehnung ε und der Schwinggeschwindigkeit ppv ist in den Beziehungen (9) und (12) die Dehnung statt ppv einsetzbar (vergleiche Kapitel 7). Nach eingehender Literaturlauswertung und den Messergebnissen der Sprengungen in den Tagebauen können die Sprengstoffdichte und Detonationsgeschwindigkeit als Haupteinflussfaktoren der Sprengstoffe auf die dynamische Energie (E_{dyn}) der 1. Sprengphase herausgestellt werden [CO 96, HA 06, HE 93, HU 99, PE 94, RO 01]. Der Detonationsdruck von Sprengstoffen berechnet sich nach [CO 96] wie folgt:

$$P_o = \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \quad \left[\frac{kg}{ms^2} \right] \quad (14)$$

Aus dem Druck P_O darf mit dem Volumen des gesamten Sprengstoffes V_S einer Sprenganlage die mögliche dynamische Energie E_S ermittelt werden:

$$E_S = \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \cdot V_S \quad \left[\frac{kgm^2}{s^2} \right] \quad (15)$$

Die Lademenge eines Bohrloches W_B erreicht eine Energie von

$$E_B = \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \cdot V_{SB} \quad \left[\frac{kgm^2}{s^2} \right] \quad (16)$$

Zur besseren Bewertung der Wirkungsweise des Sprengstoffes wird das kleinste, gezündete Volumen als Einheitsvolumen V_O eingeführt und wie folgt definiert:

$$V_O = a_B' \cdot w' \cdot l_{Bo} \quad [m^3] \quad (17)$$

Die Summe aller Einheitsvolumen ergibt das Festkörpervolumen der gesamten Sprenganlage. Für das Einheitsvolumen wird über den eingesetzten spezifischen Sprengstoffverbrauch q (kg/m^3) die eingesetzte Sprengstoffmasse und daraus das Sprengstoffvolumen V_{SO} berechnet.

Die einzelnen Werte für w' und a_B' sind aus den genauen Dokumentationen der Spreng- und Zündpläne je Sprengung zu entnehmen (z. B. Bild 4.5). Aus den durchgeführten Versuchen und früheren Arbeiten ist bekannt, dass ein hoher Füllungsgrad ξ und ein großes Seitenverhältnis λ_s die Sprengwirkung verbessert [FI 06, HE 93, JE 81, HO 99, KL 74, MOS 76, MÜ 79, MÜ 88, MÜ 91a, TH 78]. Daraus abgeleitet, kann der aufgebaute, wirksame Detonationsdruck je Einheitsvolumen P_{Zo} wie folgt berechnet werden (Bild 4.7):

$$P_{Zo} = \frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) V_{So} \cdot \lambda_s}{w' \cdot a_B' \cdot l_{Bo}} \quad \left[\frac{kg}{ms^2} \right] \quad (18)$$

Der gesamte wirksame Detonationsdruck einer Sprenganlage P_{ZM} ergibt sich rechnerisch aus:

$$P_{ZM} = \left(\frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \cdot V_{So} \cdot \lambda_s}{w' \cdot a_B' \cdot l_{Bo}} \right) \cdot n_v = P_{Zo} \cdot n_v \quad \left[\frac{kg}{ms^2} \right] \quad (19)$$

Dieser Druck kann mit den Beziehungen (7) und 21) und den bekannten Werten von ρ_G und c_P in die Größe des Impulses umgerechnet werden.

Aus den vorgestellten, neu erarbeiteten Beziehungen (11), (12), (13), (14), (15), (16) und (18) geht hervor, dass die Sprengstoffparameter Dichte sowie Detonationsgeschwindigkeit eine große praktische Bedeutung haben. Zur Realisierung der genauen Modellrechnung und gesicherten Erschütterungsprognosen nach der Impulstheorie war es unerlässlich, diese Eigenschaften zu bestimmen und aus den zahlreichen Angaben der Literatur zu analysieren [BE 90, CO 96, DO 00, HE 93, HOP 98, HU 99, LA 63, LO 03, MOS 76, OR 02, PE 94, RO 88a, RO 99, SA 02a, SH 98, TH 78, TH 92]. Das Ergebnis der Literaturrecherche und eigenen Messungen vermittelt Bild 4.8. Damit können alle Sprengstoffgemische ohne Beachtung ihrer chemischen Zusammensetzung oder Umsetzung mit den beiden grundlegenden Eigenschaften in Verbindung gebracht werden.

Mit der statistisch gesicherten Regressionsbeziehung nach Bild 4.8 ist es möglich, bei Kenntnis der Sprengstoffdichte die Detonationsgeschwindigkeit oder umgekehrt mittels der Detonationsgeschwindigkeit die Dichte abzuschätzen.

Die verbrauchten Energieanteile für die Erschütterungen, Zertrümmerung und der Frühphase des Abwurfes werden im Modell (Bild 4.7) als dynamische Energie der Detonationsphase der Sprengstoffumsetzung angesehen, ohne dabei die Anteile der Energieverluste durch chemische Vorgänge, Wärmebildung und die Luftdruckwelle erfassen zu können. In den Kapitel 6 und 7 wird behandelt, wie die dynamischen Energieanteile beeinflusst werden und welche Zusammenhänge daraus abgeleitet werden können.

Beim Abwurf des Haufwerkes werden infolge der chemischen Umsetzung der Sprengstoffgemische erhebliche Mengen von Schwaden frei, die einen quasistatischen Gasdruck erzeugen. Dieser soll nach allgemein bekannter Auffassung den Auswurf der Sprengmasse weitestgehend bewirken. Aus der genauen Ermittlung des Sprengvolumens, dessen Dichte und Ausbruchgeschwindigkeit kann die kinetische Energie des abgeworfenen Haufwerkes E_{kinM} nach (8) abgeschätzt werden. Zur vollständigen Energiebilanz des Abwurfes gehört die potentielle Energie des erzeugten schiefen Wurfes, ohne dass diese Größe eine wesentliche sprengtechnische Bedeutung hat:

$$E_{potM} = m_M \cdot g \cdot \Delta h_w \quad \left[\frac{kgm^2}{s^2} \right] \quad (20)$$

Die Energieanteile (8) und (20) kann man als quasistatischen Energieanteil E_{qstat} des Abwurfes auffassen (Bild 4.7).

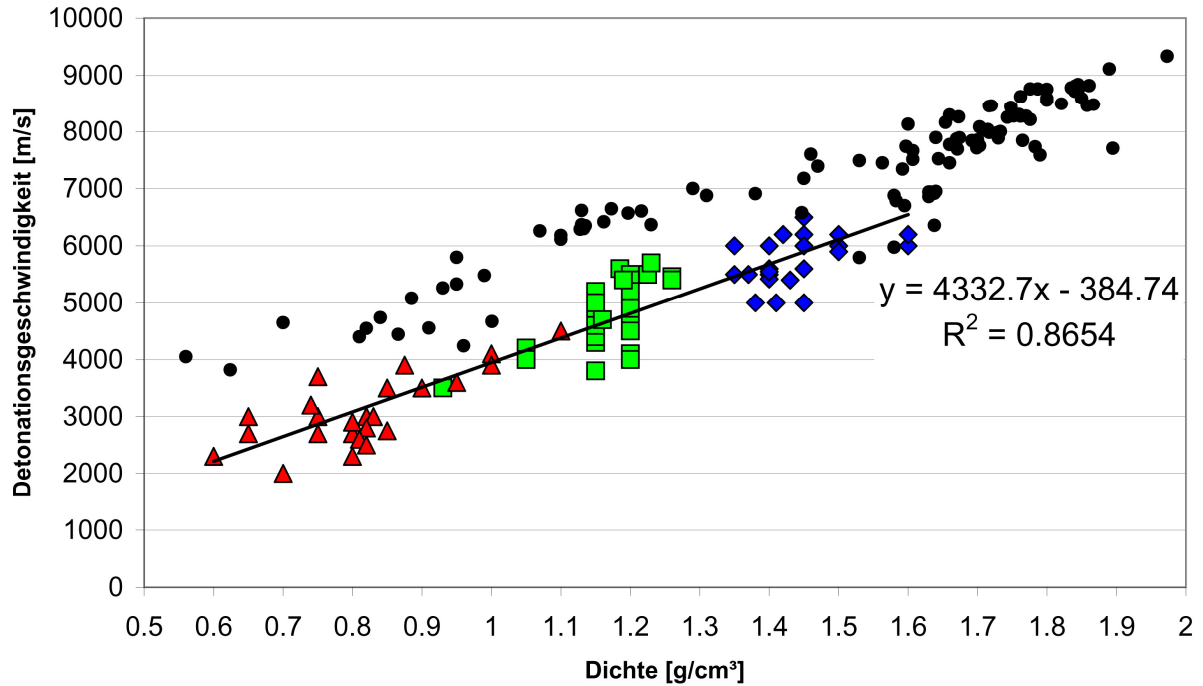


Bild 4.8: Zusammenhang zwischen Sprengstoffdichte und Detonationsgeschwindigkeit gewerblicher Sprengstoffe [CO 96; Rest eigene Erfassung]

5 Felsmechanische Gegebenheiten und Sprengbarkeit in den Versuchsbetrieben

5.1 Tagebau Elbingerode

5.1.1 Geologische Verhältnisse

Die Massenkalksteine des Tagebaus Elbingerode sind Teil des Elbingeröder Komplexes, der eine generell NE - SW streichende, etwa 18 km und 4,5 km breite regionalgeologische Einheit im Mittelharz darstellt. Der Komplex liegt im zentralen bis westlichen Teil der Blankenburger Zone, einer tektonisch klar konturierten Antiklinalstruktur (Bild 5.1). Der Elbingeröder Komplex wird aus den Gesteinsserien der Elbingerode - Gruppe aufgebaut. Deren mittleres Teilglied, die sog. Elbingerode-Riffkalk-Formation, wird in mehreren Tagebauen im Gebiet abgebaut. Sie besteht aus einem ca. 600 m mächtigen, faziell stark gegliederten atollartigen Stromatoporen-Korallenriff. Dieses entwickelte sich auf dem vulkanischem Sockel - der Elbingerode-Schalstein-Formation. Traditionell werden die Gesteine auf der Grundlage der Fossilführung in zwei Einheiten unterteilt. Im Liegenden wird der Stringocephalen-Kalkstein (Givetium - Mitteldevon) und im Hangenden der Iberg-Kalkstein (Frasnium - Oberdevon) unterschieden. Neuere Untersuchungen [BAC 08, FRAU 09] gliedern nach lithologischen Kriterien in unterschiedliche Entwicklungsstadien aus: Die Vorphase der Riffbildung setzt mit der letzten Ruhephase des Basalt-Keratophyr-Vulkanismus im frühen Givetium ein. Es entstehen knollige Stromatoporenriffe mit Crinoiden-Schuttkalksteine, sowie in tieferen Bereichen Cephalopoden-Kalksteine. Die Kalksteine werden teilweise vererzt. Nach Abklingen des Vulkanismus setzt die Hauptphase des Riffwachstums ein. Ausgehend von einer initialen Atollbildung im Givetium entstehen mächtigen Kalksteine in unterschiedlichen Riffbereichen (Außenriff-, Riffkern-, Lagunen- und Rückriffkalksteine) und somit in einem breiten faziellen Spektrum. Die Gesteine erreichen bis 600 m Mächtigkeit. In der Lagune entstehen homogene, gebankte Lagunenkalksteine. Die Rückriffkalksteine sind Aufarbeitungsprodukte der Riffkerne und liegen als Brekzien vor. Im Vorriff treten meist rötlich gefärbte Kalksteine mit Hämatiteinlagerung auf. Die liegenden Vulkane sind von ausgedehnten und maximal 200 m mächtigen Riffschuttfächern umgeben. Im unteren bis mittleren Frasnium dominieren Riffschuttkalksteine mit Einschaltung typischer Mud Mounds (Kalkschlamm Akkumulationen). Der Ablagerungsraum verlagert sich in dieser Zeit von Elbingerode in Richtung Rübeland-Hüttenrode. Dieser Abschnitt wird als Kappenstadium bezeichnet. Das Riffwachstum endet im höchsten Frasnium. Dieses finale Demergenzstadium zeigt sich in der Ablagerung von Riffschuttbildungen und Alveolitella-Kalksteinen. Der Meeresspiegel sinkt in dieser Zeit durch Anhebung des Untergrundes. An der Grenze Frasnium-Framenium endet die Riffbildungsphase endgültig.

Die Gesteine treten überwiegend als graue, feinkörnig - dichte, massig - organogene, weniger braungraue und rötliche Kalksteine sowie gelegentlich brekziöse, schlierige Riffschuttsedimente auf. Seltener werden klastische und tuffitische Einschaltungen im Schichtprofil beobachtet [MÜ 80].

Die Kalksteine unterliegen in der Kreidezeit bis ins Alttertiär einer intensiven chemischen Verwitterung unter tropischen bis subtropischen Bedingungen. Die Gesteine verkarsten entlang des vorhandenen Kluft- und Störungssystems. Es entstehen die typischen Karstformen wie Schlotten, Schratzen, Karren und die Höhlen von Rübeland. Karsthohlräume werden teilweise wiederum durch Versturz gefüllt. Als Versturzmaterial treten Rot- und Braunlehme auf, die oberflächennah ebenfalls infolge der tropischen Verwitterung entstanden sind. In den Brekzien kommt es zur Mobilisierung und Umlagerung von Kieselsäure. Es treten infolge dessen silifizierte, verkieselte Lagen auf.

Im Jungtertiär bzw. Pleistozän werden weitere geringmächtige Lockergesteine abgelagert. Sie reichen von Ton, Schluff, Sand, organisch durchsetztem Sand, geringmächtigen Braunkohleflözen bis Löß. Diese Lockergesteine sind nur in den dolinenartigen Einbruchtrichtern erhalten.

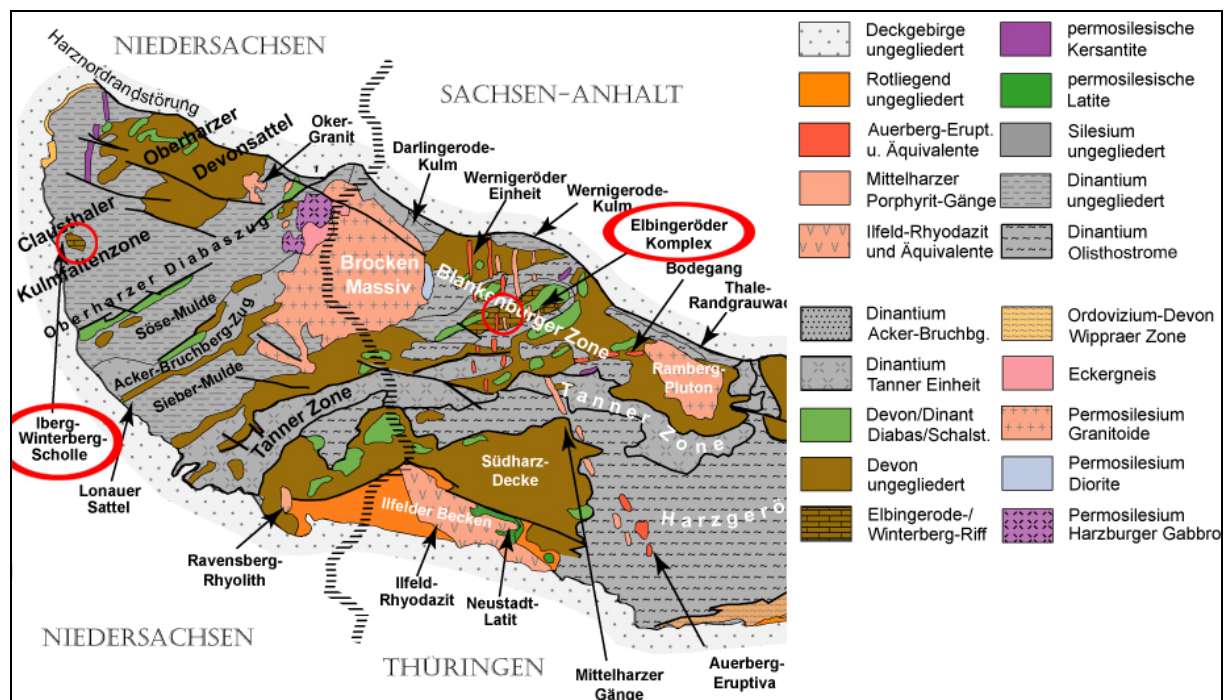


Bild 5.1: Regionaleinheiten des Harzes in [FRA 09, HIN 98, MO 93, MR 01, SCH 08]
 rot = Tagebaue Elbingerode und Winterberg

5.1.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit

Die anstehenden Kalksteine sind infolge ihrer Entstehung chemisch sehr reine Karbonatgesteine und werden seit Jahrzehnten in mehreren Tagebauen für die Kalk-, Kalkhydrat-, Baukalk-, Zuckersteinproduktion und weiterer hochwertiger Erzeugnisse abgebaut. Dazu ist es erforderlich, ein Haufwerk zu sprengen, welches möglichst aus Korngrößen ≥ 30 mm besteht. Das darunter liegende Feinkorn ist nicht in der Kalkverarbeitung zu verwenden. Aus diesem Grunde ist die Bohr- und Sprengtechnik so auszulegen, dass wenig Unterkorn entsteht.

Die gesteintechnischen Untersuchungen wurden in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Im Tagebauriss Elbingerode des Bildes 5.2 ist die Lage der untersuchten Sprengungen und die generalisierte Raumstellung des Trennflächengefüges dargestellt.

Tabelle 5.1: Gesteinstechnisch-dynamische Kennwerte des Kalksteines vom Tagebau Elbingerode

| Parameter | Symbol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | σ |
|--|------------|---|--------|--------|---------|--------|----------|
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,680 | 2,742 | 0,001 | 0,028 | 2,704 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 5,964 | 5,891 | 0,045 | 0,212 | 6,280 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_s | km/s | 2,946 | 3,521 | 0,042 | 0,206 | 3,238 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 2,754 | 3,223 | 0,034 | 0,183 | 3,006 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,257 | 0,248 | 0,001 | 0,032 | 0,312 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 63,061 | 82,916 | 62,906 | 7,931 | 74,489 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 23,321 | 31,865 | 12,349 | 3,514 | 28,357 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 16,033 | 16,133 | 0,368 | 0,606 | 16,933 |
| Einaxiale Druckfestigkeit am 1 : 2 Zylinder (cal.) | σ_D | N/mm ² | 80 | 123,5 | - | - | 115 |

Das Trennflächengefüge des Kalksteines ist deutlich ausgeprägt und wechselt seine Einfallwinkel entsprechend der flachwelligen Faltung um WNW - ESE - Achsen. Nach entsprechenden Vereinfachungen sind folgende drei Trennflächenscharen zu unterscheiden:

K₁-Trennflächenschar (ac-Klüftung)

um N - S streichend und bis NE - SW streuend, steiles östliches bzw. westliches bis nordwestliches steiles Einfallen; glatt, eben, weit durchsetzende Trennflächen, deshalb häufige Verkarstung entlang der Flächen

K₂-Trennflächenschar (bc-Klüftung)

um NW - SE streichend und bis E - W streuend; je nach Orientierung der Schichtung nach SW - SSW bzw. NE - NNE steil bis mittelsteil einfallend; durch tektonische

Überprägung während und nach der Faltung scherkluftartig überspielt (K_2'); häufigste Hauptkluftchar, deutlich verkarstungsgefährdet und nicht selten Verlehmung im oberflächennahen Bereich

K₃-Trennflächenschar (ab- oder Schichtklüftung)

Trennflächen parallel der Schichtung infolge Riffbildung weniger deutlich ausgeprägt, selten durch Sedimentationswechsel durchsetzende Flächen, meist wenig durchgreifende Brüche, streichen um E - W bis NW - SE streuend, mit flachem bis mittelsteile Einfallwinkel (im Untersuchungsbereich meist nach S bis SSW); auf Schichtflächen wurden keine Verkarstungen beobachtet.

Auf allen Hauptkluftscharen sind Störungen und Bewegungsflächen zu beobachten. Infolge der wiederholt aufgetretenen Standsicherheits- und Verkarstungsprobleme im karbonatischen Festgebirge wurde vor Jahren empfohlen, die Abbauführung vornehmlich an N - S - Abbauböschungen mit ostwärts fortschreitenden Abbau vorzunehmen. Die meisten Versuchssprengungen folgten diesen optimalen Ausbruchbedingungen (Bild 5.2).

Die Kennzeichnung des Festgebirges lautet zusammengefasst:

- Gebirgsrohddichte 2,6 - 2,73 g/cm³ Ø 2,70 g/cm³ (2. Sohle)
- Klufkörperform prismatisch - großblockig, durch fehlende K_3 -Flächen teilweise ständerartig
- Ø Trennflächenabstand 0,804 m
- Ø Klufkörper 0,5197 m³
- Bergwasser unregelmäßig in der 2. Sohle vorhanden
- Sprengbarkeit sehr schwer sprengbar
- Sprengziel gleichmäßige Stückigkeit ≥ 30 mm (Ofensteine), möglichst wenig Unterkorn

5.2 Tagebau Görzdorf

5.2.1 Geologische Verhältnisse

Die Gneise des Tagebaus Görzdorf sind Teil des Erzgebirgs-Antiklinoriums. Diese variszische Struktur streicht SW - NE und taucht nach Südwesten ab. Sie ist Teil der Fichtelgebirgisch-Erzgebirgischen Antiklinalzone, welche sich vom Eibenstock-Nejdek-Granitmassiv im Südwesten bis zur Elbezone im Nordosten erstreckt (Bild 5.3). Der Tagebau Görzdorf befindet sich im zentralen Teil innerhalb der Subeinheit des Mittelerzgebirgischen Antiklinalbereichs. Die Struktur des Erzgebirges wird nach neueren Untersuchungen als

komplizierter Deckenstapel interpretiert. Es werden fünf Deckenkomplexe ausgeschieden, die sich durch charakteristische Metamorphose- und Deformationsbedingungen unterscheiden. Das früher übliche Standardprofil fußt auf der Annahme einer weitgehend ungestörten stratigrafischen Schichtabfolge und richtet sich allein anhand der Lithologie aus. Diese Einteilung ist aufgrund der neuen tektonischen Interpretation nicht mehr möglich. Im Tagebau Görzdorf ist die Rusová-Formation aufgeschlossen. Dabei handelt es sich um hochmetamorphe Gesteine des Ediacariums (Neoproterozoikum). Die metamorphe Gesteinsabfolge wird vorwiegend aus Zweiglimmergneisen (sogenannten Graugneisen) sowie teilweise von Zweiglimmerschiefern aufgebaut. Es kommen schlierige Einlagerungen von Metarhyolithoiden, Metabasiten, Quarziten, Metagrauwacken und Marmoren vor. Die Mächtigkeit der Natschung-Subformation, dem untersten Teilglied der Rusová-Formation, beträgt etwa 300 - 400 m. Der Tagebau wird durch ein NW - SE streichendes, steil stehendes Störungssystem gequert.

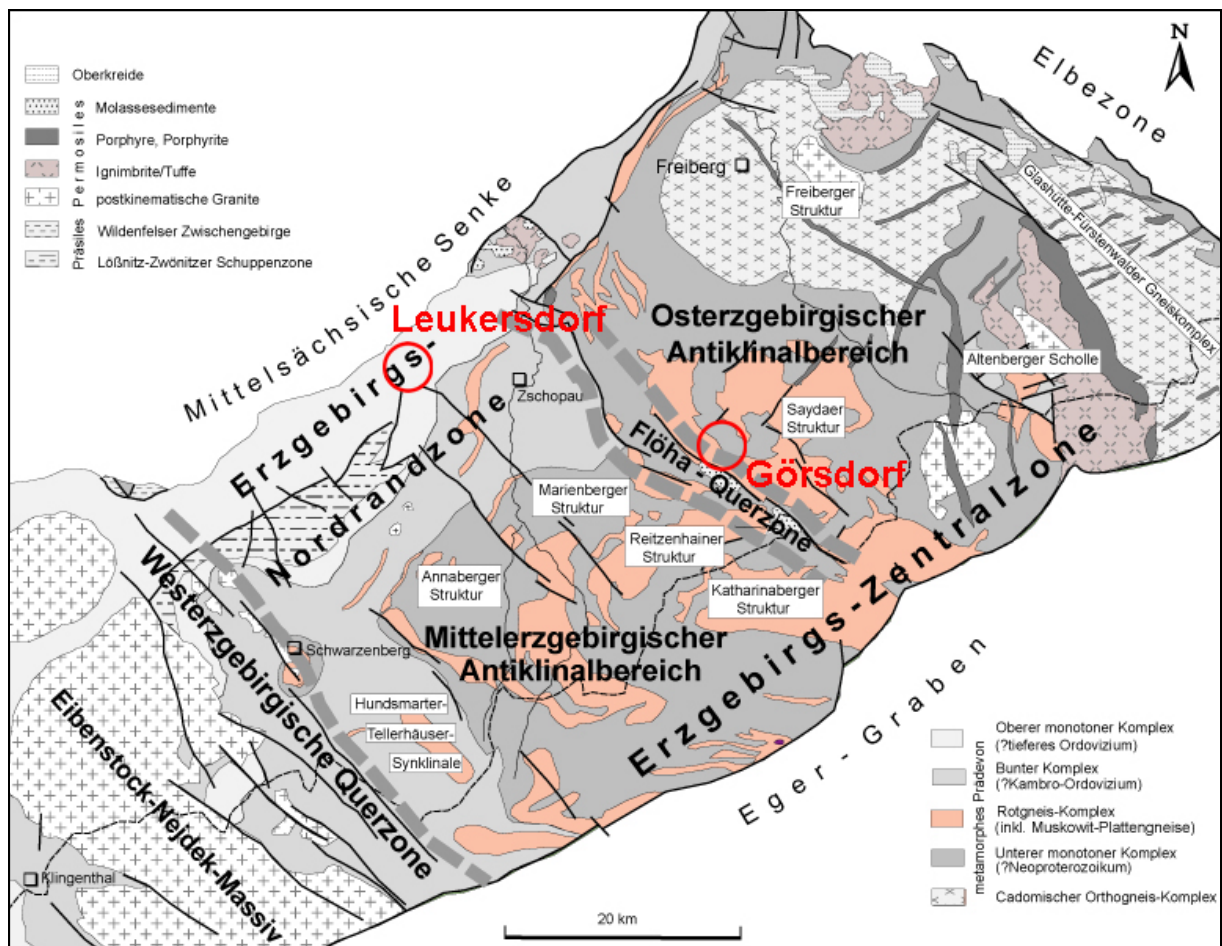


Bild 5.3: Gliederung des Erzgebirgs-Antiklinoriums nach [FRA 09, LEO 95, TI 02]

Die regionalmetamorphe Gesteinsserie im Gebiet von Görzdorf wird durch die intensive Kristallisationsschieferung geprägt, die ihrerseits eine Kleinfaltung aufweisen kann und in

Zonen größerer metamorpher Beeinflussung die Aufschmelzungserscheinungen des Flammgneises erfuhr.

5.2.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit

Das Hauptgestein vom Tagebau Görsdorf wird vereinfacht als Graugneis bezeichnet. Das nicht verwitterte Gestein ist hellgrau und feinkristallin bis mittelkörnig und zeigt deutlich durch die Kristallisationsschieferung ausgerichtete Minerale. Bänderartige quarzitisches Schlieren im cm-Bereich sind charakteristisch. Der Graugneis ist aus klastischen Sedimenten mit indrudierten Zonen von sauren Magmatiten hervorgegangen. Letztere Anteile wurden ebenso umgewandelt und sind als Metarhyolithoide rötlicher Färbung ausgebildet. Im südlichen Teil des Tagebaus sind sie stark vertreten. In diesem Bereich wird das Gestein aufgrund seiner Färbung als Flammgneis bezeichnet. Im nördlichen Abschnitt dominieren die Zweiglimmergneise mit wechselhaftem Anteil von Flammgneis-Schlieren. Sie können als plattige bis flaserige, feinkörnige Paragneise angesprochen werden. Hauptminerale sind Quarz, Plagioklas; Nebengemengteile Biotit und Muskowit. Typische Akzessorien sind Granate. Im oberflächennahen Bereich der 1. und 2. Sohle, die im wesentlichen während des Versuchszeitraumes abgebaut worden sind (Bild 5.4) sind als Folge von Verwitterungsvorgängen unregelmäßig tief eingreifende Verwitterungs- bis Zersetzerscheinungen anzutreffen. In der Tabelle 5.2 sind die ermittelten gesteintechnisch-dynamischen Eigenschaften des Graugneises zusammengestellt.

Tabelle 5.2: Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte des Graugneises vom Tagebau Görsdorf

| Parameter | Sym bol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | Ø |
|---|------------|---|--------|--------|---------|--------|--|
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,716 | 2,742 | 0,0001 | 0,009 | 2,732 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 4,722 | 5,891 | 0,161 | 0,401 | 5,314 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_s | km/s | 2,835 | 3,521 | 0,059 | 0,243 | 3,156 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 2,594 | 3,223 | 0,048 | 0,220 | 2,891 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,176 | 0,248 | 0,001 | 0,025 | 0,226 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 53,377 | 82,916 | 102,110 | 10,105 | 67,052 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 21,924 | 31,865 | 13,765 | 3,710 | 27,063 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 12,867 | 16,133 | 1,260 | 1,122 | 14,510 |
| Einaxiale Druckfestigkeit am 1 : 2 Zylinder (cal.) ¹⁾ nach [GÖ 76] | σ_D | N/mm ² | - | - | - | - | ()K3 144,91 ¹⁾ (⊥) K ³ 105,42 ¹⁾ |

Das Trennflächengefüge wird von der Kristallisationsschieferung und deren Veränderungen durch die Kleinfaltung beherrscht (Bild 5.4). Nach den erfassten Bedingungen kann das Flächengefüge wie folgt beschrieben werden (vergleiche Bild 5.4):

K₁-Trennflächenschar (ac-Klüftung)

WSW - ENE streichend und bis SW - NE streuende Flächen mit überwiegend steilem Einfallen nach NNW, teilweise nach SE; auch mittelsteil, Großklüfte weit durchsetzend, oft absetzend, rau und stufig, teilweise bogig, Bewegungsflächen

K₂-Trennflächenschar (bc-Klüftung)

N - S bis NW - SE, sehr breit streuendes Streichen, scherkluftartig aufgehend, unregelmäßig wechselhaftes steiles mit mittelsteiles Einfallen nach E ... W bis SW ... NE, absetzige Flächen, weniger deutliche und häufige Schar

K₃-Trennflächenschar (ab- oder Schichtklüftung)

N - S bis NNW ... SSE ... NW - SE Streichen und steilem bis oft mittelsteilem, in Faltenbereichen auch flachem Einfallwinkel nach W ... WSW ... SW breit streuend, bestimmende Trennflächen, unregelmäßige Oberflächen, teilweise aushaltend.

Die Kennzeichnung der Gebirgsverhältnisse kann wie folgt gekennzeichnet werden:

- Gebirgsrohndichte 2,60 g/cm³
- Klüftkörperform unregelmäßig blockig, meist plattig, polyedrisch
- Ø Trennflächenabstand 0,360 m
- Ø Klüftkörper 0,047 m³
- Bergwasser wechselhaft, lokal
- Sprengbarkeit schwer sprengbar
- Sprengziel ± gleichmäßiges, bagger- und brechergerechtes
Haufwerk zur Herstellung gebrochener Zuschlagstoffe

5.3 Tagebau Koschenberg

5.3.1 Geologische Verhältnisse

Die Lagerstätte Koschenberg besteht aus gefalteten Metagrauwacken und Tonschiefern des oberen Proterozoikums. Sie tritt gegenüber der flachen Morphologie der tertiären sowie pleistozänen Deckschichten tektonisch bedingt als deutlicher Bergrücken hervor. Dieser bleibt auch nach der intensiven, sialitischen Verwitterung im Alttertiär infolge der hohen Verwitterungsbeständigkeit erhalten. Regionalgeologisch gehört das Untersuchungsgebiet zum Niederlausitzer Antiklinalbereich, einem Teilbereich der Lausitzer Antiklinalzone (Bild 5.5). Im Süden und Westen wird die Einheit von der Lausitzer Störungszone, der Westlausitzer Störung, im Norden von der Synklinalzone Torgau - Doberlug - Kirchhain - Göllnitz und im Nordosten vom Lausitzer Hauptbruch begrenzt. Im Südosten geht es in das Lausitzer Granit-Granodiorit Massiv über (Bild 5.5).

Die anstehenden Gesteine sind Teil der Lausitzer Hauptgruppe. Diese präkambrischen klastischen Sedimente werden aus einer Wechsellagerung von Grauwacken, Schluffsteinen und Argilliten gebildet. Sie entstehen aus feinhrythmischen Turbiditen bzw. Trübeströmen. Der Ablagerungsraum wird nach neueren Untersuchungen als Back-Arc-Basin eines dem Superkontinents Gondwana vorgelagerten Inselbogens gedeutet [TIE 09]. In der Regel sind diese Gesteine regionalmetamorph, bereichsweise kontaktmetamorph überprägt. Das Gebiet wurde mehrfach tektonisch beansprucht. Die Hauptphase mit resultierenden W-E-gerichteten Faltenachsen ist cadomisch - assyntischen Alters. Daneben treten infolge weit jüngerer tektonischer Beanspruchungen - wie im Varistikum - Schollenverstellungen auf, die N-S-gerichtete Faltenachsen zeigen. Anhand von mikrobotanischen, sedimentologischen und geochemischen Untersuchungen können die Gesteine als Flachwassersedimente angesprochen werden. Charakteristisch ist eine Wechsellagerung von meist fein- bis mittelkörnigen Grauwacken, Schluffsteinen und Argilliten mit rhythmischer Bänderung im dm- bis cm-Bereich. Daneben treten gelegentlich geröllführende Lagen und Schwarzschiefer auf.

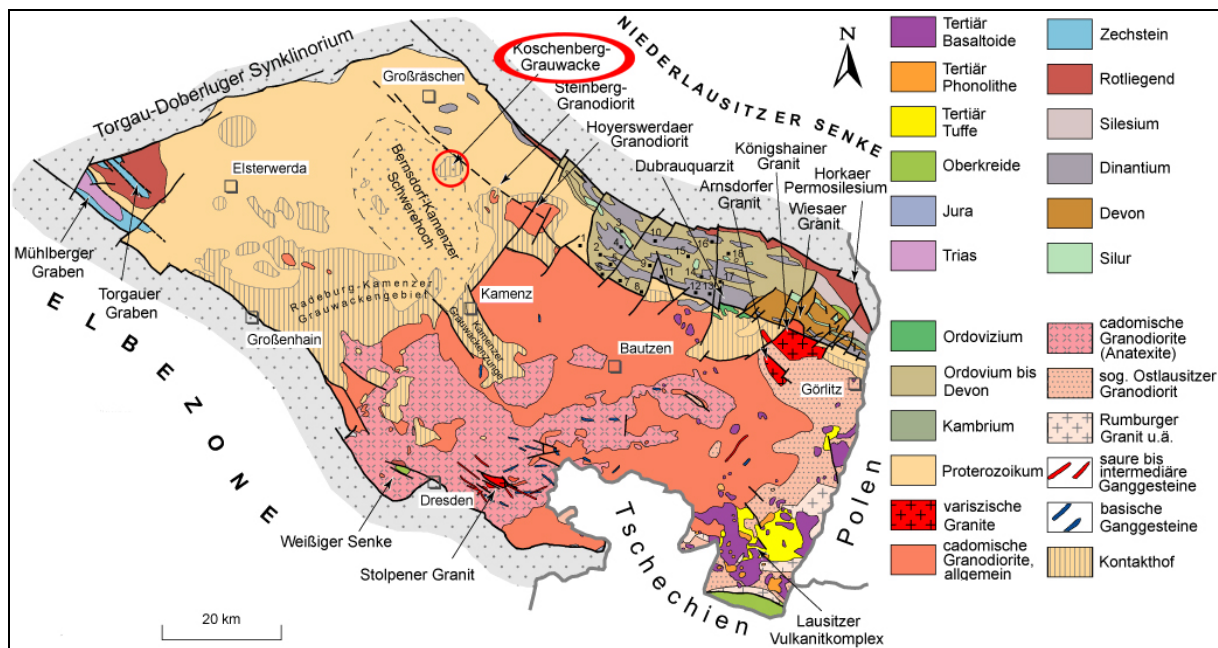


Bild 5.5: Regionale Teilelemente im Bereich des Lausitzer Antiklinoriums, Darstellung ohne Sedimente des Känozoikums nach [FRA 09, MO 64, HIR 69, LEO 95, KR 00]

Zusammengesetzt werden die Grauwacken aus Abtragungsschutt älterer Sedimentserien, teilweise basischer Vulkanite oder von Ganggesteinen, Kieselpeliten und rhyolithischen Gesteinen. Den Hauptanteil von > 50 % stellen jedoch ältere Granite. Die Gesteine werden in der relativ kurzen Zeitspanne des Vendiums abgelagert. Der Zeitabschnitt zwischen 635 bis 542 Mio a wird ebenfalls als Ediacarium bezeichnet. Die Lausitzer Hauptgruppe gehört somit in den Übergang Jungproterozoikum zum Kambrium. Die Gesteinsschichten wurden bisher noch nicht vollständig durchteuft. Man geht davon aus, dass die Gesamtmächtigkeit

über 2000 m; vermutlich sogar über 4000 m beträgt. In die monotonen Serien indrudieren während der geologischen Entwicklung in mehreren Phasen Ganggesteine, Plutone und Vulkanite, welche eine kontaktmetamorphe Überprägung bewirkten. Aufgrund der regionalmetamorphen Beanspruchung der Klastitserie sind die Gesteine am Koschenberg petrografisch als Metagrauwacke zu bezeichnen. Im Tagebau Koschenberg treten im Nordosten mehrere NE...S streichende Ganggesteine auf. Dabei handelt es sich um verschiedene Varietäten von Mikro-Granodiorit und -gabbro. Letzterer bildete ein abbauwürdiges Vorkommen, welches bereits im letzten Jahrhundert zur Werksteingewinnung fast vollständig abgebaut wurde. Überdeckt wird das Grundgebirge vom Lockergesteinsstockwerk, welches in seiner Mächtigkeit in Richtung Niederlausitz zunimmt. Während des Tertiärs werden die oberflächennah ausstreichenden Grundgebirgsanteile durch den Einfluss des subtropisch-tropischen Klimas tiefgründig verwittert. Darüber hinaus werden geringmächtige Braunkohleflöze, bindiges und rolliges Material abgelagert. Das Gebiet ist eiszeitlich stark überprägt. Dabei werden die Verwitterungszone und die tertiären Schichten durch die sie überfahrende Eisdecke teilweise abgetragen und bis auf das unverwitterte Gestein abgeschliffen.

5.3.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit

Im Tagebau Koschenberg ist eine monotone Wechsellagerung aus Metagrauwacke aufgeschlossen. Die anstehenden Gesteine zeigen eine deutliche Schichtung mit Schichtabständen von wenigen mm bis über 2 m. Die Gesteine sind weitspannig gefaltet, teilweise überkippt und intensiv geklüftet. Die Faltenachsen streichen \pm NNE ... NE - SSW ... SW. Vorherrschend sind Scherfalten mit Faltenhöhen und Breiten im Bereich 50 - 100 m und mehr. Im Bild 5.6 werden die Trennflächenscharen und Faltenachsen schematisiert kenntlich gemacht. Das Trennflächengefüge kann wie folgt beschrieben werden:

K₁-Trennflächenschar (ac-Klüftung)

um N-S bis NNW-SSE streichend und mit überwiegend steilem Einfallwinkel nach E bis ENE bzw. W bis WSW; glatte, häufig an K₂-Flächen absetzende Trennflächen, typische Zugbrüche des Gebirges; in weitständigen Bereichen trifft man unter Umständen eine gegenläufig einfallende Scherklüftung mit gleicher Streichrichtung an; auf den Trennflächen häufig Pyrit/Markasitbelag vorhanden, der nicht selten rostbraun verwittert ist; auf ac-Richtung intrudierte der Mikro-Granodiorit; nicht selten quarzitisches Gangmineralisation; mechanisch wirksam infolge des hohen Durchtrennungsgrades

K₂-Trennflächenschar (bc-Klüftung)

oder Schieferungsklüftung bzw. schieferungsartige Trennflächen um NE - SW bis ENE - WSW wie die Schichtklüftung (K₃-Flächen) streichend; mittelsteil bis steil nach SE bis SSE einfallend; Trennflächen häufig durch petrografischen Wechsel an der Schichtung absetzig und daher unregelmäßig ausgebildet, glatte bis hakige, stufige Flächen; Durchtrennungsgrad wechselhaft durch inkompetentes erhalten des Schichtkomplexes; teilweise latentes Auftreten

K₃-Trennflächenschar (ab- oder Schichtklüftung)

oder Schichtklüftung um NE - SW streichend bzw. bis ENE - WSW streuend; meist mittelsteil bis steil nach NW einfallend, je nach Anschnitt der Faltenschenkel; dominierende Flächen des Trennflächengefüges mit hohem Durchtrennungsgrad; Flächen glatt, meist durchsetzend; Kluftabstände kleiner 0,2 m mit geringerem Durchtrennungsgrad

Die ermittelten gesteintechnisch-dynamischen Kennwerte der Metagrauwacke Koschenberg in der Tabelle 5.3 zusammengestellt.

Tabelle 5.3: Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte der Metagrauwacke vom Tagebau Koschenberg

| Parameter | Sym bol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | Ø |
|--|------------|---|--------|--------|---------|--------|---------------------------------|
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,742 | 2,824 | 0,010 | 0,032 | 2,768 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 5,427 | 5,791 | 0,015 | 0,124 | 5,594 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_s | km/s | 2,892 | 3,202 | 0,012 | 0,111 | 3,104 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 2,687 | 2,963 | 0,010 | 0,101 | 2,873 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,260 | 0,309 | 0,0002 | 0,015 | 0,275 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 60,456 | 72,480 | 19,475 | 4,413 | 68,295 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 23,092 | 28,401 | 3,839 | 1,959 | 26,788 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 14,900 | 16,067 | 0,142 | 0,377 | 15,470 |
| Einaxiale Druckfestigkeit am 1 : 2 Zylinder (cal.) | σ_D | N/mm ² | 208 | 274 | - | - | 265,87 ¹⁾ [GÖ 76] |

Zusammenfassend kann das Festgebirge im Tagebau Koschenberg durch nachstehende Merkmale beschrieben werden:

- Gebirgsrohddichte 2,72 g/cm³
- Kluffkörperform prismatisch, scharfkantig blockig bis schiefbrig, kantig, polyedrisch
- Ø Trennflächenabstand 0,235 m
- Ø Kluffkörper 0,0130 m³
- Bergwasser obere Sohle gelegentlich; 2. Sohle meist vorhanden
- Sprengbarkeit mittelschwer bis schwer sprengbar
- Sprengziel ± gleichmäßiges, ladegerechtes Haufwerk mit der Besonderheit im Nahbereich vor der Sprengung eine Bandanlage mit dem Lokotrak (fahrbarer Vorbrecher) schützen zu müssen (im Nahbereich ist kein Steinflug zugelassen)

5.4 Tagebau Leukersdorf

5.4.1 Geologische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet gehört regionalgeologisch zur Vorerzgebirgs-Senke (syn. Erzgebirgisches Becken), welche sich in nordöstlicher Fortsetzung des Vogtländischen Synklinoriums zwischen Erzgebirge und Granulitgebirge erstreckt. Es ist eine besonders schmale und kompliziert gebaute Synkinalzone des Grundgebirges, die auf die tiefenbruchartige Struktur des Zentralsächsischen Lineaments zurückzuführen ist. Diese tektonisch aktive Zone zeichnet sich durch wiederholte Absenkung und damit verbundene Ablagerungen von Trümmersedimenten vom späten Unterkarbon bis gegen Ende des Rotliegenden in der Vorerzgebirgs-Senke aus (Bild 5.7).

Konglomerate, Sandsteine und untergeordnet Tonsteine des jüngsten Unterkarbons, mittleren Oberkarbons und Rotliegenden verhüllen das Grundgebirge weitgehend. Die Rotliegend-Sedimente füllen ein weit spannendes, das Landschaftsbild bestimmendes Becken aus, das sich von Werdau-Crimmitschau bis Hainichen erstreckt. In die oberkarbonischen und jüngeren Sedimentgesteine sind durch den subsequenten Vulkanismus im Zusammenhang mit den Bewegungen saure und basische Laven mit dazugehörigen Pyroklastiten eingeschaltet. Ein solcher rhyolithischer Pyroklastit ist Gegenstand des Abbaues im untersuchten Tagebau Leukersdorf (Bild 5.7).

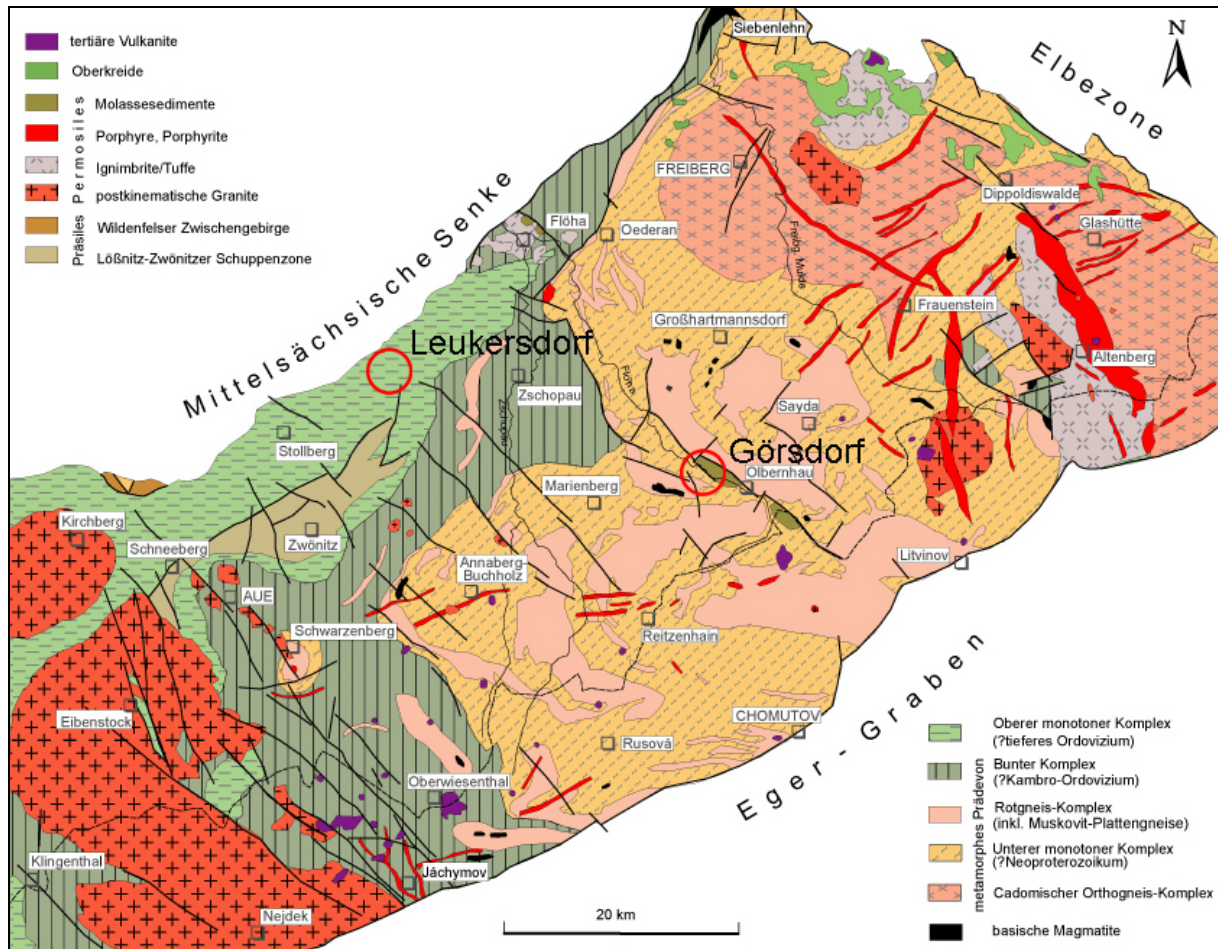


Bild 5.7: Geologie des Erzgebirgs-Antiklinoriums nach [FRA 09, LEO 95, TI 02]

Das Liegende des rhyolithischen Pyroklastites von Leukersdorf bilden etwa 200 m mächtige Trümmersedimente aus Schluff-, Ton- und Arkosesandsteinen mit konglomeratischen Einschaltungen der Härtensdorf Formation. Diese überdeckt diskordant den Phyllit der Erzgebirgs-Antiklinalzone. Im Hangenden der Sedimentfolge lagert der Pyroklastit-Komplex des Tagebaus Leukersdorf. Dieser bildete sich im Zusammenhang mit einem ignimbrischen Ausbruch. Er zeigt im Liegenden einen felsitischen bis glasigen Rhyolith mit deutlicher Fließtextur und darüber eine Wechselfolge von Kristall-, Aschen-, Brekzien- und Bombentuff. Der früher als „Leukersdorfer Quarzporphyrtuff“ bezeichnete rhyolithische Pyroklastit gehört zur Stufe der unteren vulkanischen Tuffe und Ergüsse des Unterrotliegenden [PI 62]. Er ist im Tagebau durchweg geschichtet und erscheint nur bereichsweise als ungeschichteter massiger Kristall- oder Brekzientuff. Nach neuerer Stratigrafie wird er als Neukirchen-Ignimbricit (alt. syn. Leukersdorf Ignimbricit) bezeichnet und ist Teil der oberen Planitz-Formation [PÄ 08]. Je weiter man sich vom vermutlich nordöstlich gelegenen Ausbruchszentrum entfernt, umso feinkörniger wird die Pyroklastitfolge und geht in einen ± gleichmäßigen Aschentuff über. Durch Verwitterungsvorgänge erhielt der Pyroklastit eine rote, braunrote bis braunviolette Farbgebung, die ihm die Bezeichnung „Leukersdorfer

Kattunporphyr“ einbrachte. Das Gestein ist von unterschiedlicher Korngröße, hat bereichsweise den Charakter eines Kristalltuffes und weist erwartungsgemäß eine vergleichsweise höhere, natürliche Porosität auf.

5.4.2 Felsmechanische Gegebenheiten und Sprengbarkeit

Nach der geologischen Beschreibung sind zwei verschiedene Festgesteine Gegenstand des Abbaues:

- Rhyolith mit dichtem, felsitischem, glasigen, porphyrischen Korngefüge, deutlichen Fließtexturen; hellgrüngraue bis dunkelbraungrau - braunrote Farbgebung; mit weißen Kaolinitinterpunktionen, Anteil während der Untersuchungsphase bis 20 %
- Rhyolith-Pyroklastit, Kristall-, Aschen-, Brekzien- und Bombentuff, hellgraurot, ziegelrot, braunrot, geschichtet bis chaotisch, verschweißt, porös bis dicht, wechselhaftes Korngefüge, im Liegenden mit rhyolithischen Anteilen.

Tabelle 5.4: Gesteinstechnisch-dynamische Kennwerte der Festgesteine vom Tagebau Leukersdorf

| Rhyolith-Pyroklastit | | | | | | | |
|---|------------|---|--------|--------|---------|--------|--------------------|
| Parameter | Sym bol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | Ø |
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,332 | 2,371 | 0,0003 | 0,016 | 2,352 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 3,514 | 3,985 | 0,043 | 0,207 | 3,884 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_s | km/s | 1,920 | 2,390 | 0,038 | 0,194 | 2,154 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 0,1780 | 2,187 | 0,028 | 0,167 | 1,989 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,219 | 0,331 | 0,002 | 0,042 | 0,275 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 22,144 | 33,042 | 19,223 | 4,384 | 27,922 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 8,603 | 13,553 | 4,125 | 2,013 | 10,992 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 8,200 | 9,400 | 0,271 | 0,521 | 9,127 |
| Einaxiale Druckfestigkeit am 1 : 2 Zylinder (cal.) | σ_D | N/mm ² | 45 | 122 | - | - | 102 [PES 77] |
| Rhyolit | | | | | | | |
| Parameter | Sym bol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | Ø |
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,404 | 2,480 | 0,002 | 0,040 | 2,448 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 4,371 | 4,652 | 0,023 | 0,152 | 4,546 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_s | km/s | 1,991 | 2,667 | 0,133 | 0,365 | 2,409 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 1,868 | 2,451 | 0,101 | 0,317 | 2,232 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,249 | 0,369 | 0,004 | 0,062 | 0,299 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 26,981 | 44,069 | 85,259 | 9,234 | 37,546 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 9,854 | 17,643 | 17,185 | 4,146 | 14,569 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 10,833 | 11,467 | 0,121 | 0,348 | 11,233 |

Der Rhyolith bildet das Liegende des Ausbruches und geht allmählich infolge der ignimbrischen Entstehung in Pyroklastit über. Aus diesen Gegebenheiten abgeleitet, wurden

beide Gesteinsvarietäten gesteintechnisch-dynamisch gesondert untersucht. In der Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Die Lagerungsverhältnisse der Pyroklastit-Folge sind unkompliziert. Die Schichten streichen im Tagebau N - S bis meist NW - SE und fallen mit 5 bis 25° flach nach Westen bis Südwesten ein. Im Südwesten außerhalb des Tagebaues schwenkt das Einfallen in einer Muldenlage nach Nordosten ein. Das Trennflächengefüge des Komplexes wird von einem gut geregeltem Bruchbild gekennzeichnet (Bild 5.8). Der Rhyolith ist mit unregelmäßiger Mächtigkeit im Liegenden verbreitet. Entlang von NE - SW streichenden Störungen wurde der Rhyolith bereichsweise horstartig aus dem Liegenden gehoben, so dass er auf der nächsthöheren Sohle aufgefahren worden ist (Bild 5.8). Die Beschreibung des Trennflächengefüges erfolgt nachstehend:

K₁-Trennflächenschar (ac-Klüftung)

um NE - SW streichend, meist steil (70 - 90°) nach SE, teilweise nach NW einfallend, markante Haupttrennflächenschar mit deutlicher Durchtrennung und Neigung zu Großklüften, glatt, absetzig, zugbruchartige Oberflächen; teilweise als Bewegungs- und Störungsflächen benutzt

K₂-Trennflächenschar (bc-Klüftung)

NW - SE streichend und breit bis WNW - ESE streuend, meist 70 - 90° nach Nordosten und selten nach Südwesten einfallend; teilweise scherkluftartig aufspaltend, großkluftbildend, an Schichtung teilweise absetzend, hoher Durchtrennungsgrad

K₃-Trennflächenschar (ab- oder Schichtklüftung)

N - S bis NW - SE streichend und flach bis 25° nach Westen bis Südwesten einfallend, sowohl großkluftbildend als auch nicht durchsetzend infolge chaotischer Ablagerungsbedingungen, teilweise auf kurzer Distanz aushaltend, aber deutlich das Flächengefüge mitbestimmend, bei weniger ausgebildeter Schichtklüftung ständerartige bis säulige Absonderung, Durchtrennungsgrad gegenüber den K₁ und K₂-Flächen zurücktretend.

Die Ausbildung des Festgebirges im Tagebau Leukersdorf kann mit den folgenden Merkmalen gekennzeichnet werden:

- Gebirgsrohddichte \varnothing 2,25 g/cm³
- Kluffkörperform prismatisch, blockig, säulenartig (Pyroklastit),
kleinblockig, plattig (Rhyolith)
- \varnothing Trennflächenabstand Rhyolith-Pyroklastit 0,371 m
Rhyolith 0,296 m
- \varnothing Kluffkörper Rhyolith-Pyroklastit 0,051 m³
Rhyolith 0,026 m³
- Bergwasser nur auf der unteren Sohle von bergmännischer
Bedeutung
- Sprengbarkeit teilweise mittelschwer (Rhyolith), meist schwer sprengbar
- Sprengziel bagger- und brechergerechtes Haufwerk für kleinere,
semimobile Aufbereitungsanlagen, Herstellung von
gebrochenen Zuschlagstoffen

Die Tagebauverhältnisse in Leukersdorf sind beengt. Es sind mehrere semimobile Aufbereitungsanlagen auf verschiedenen Sohlen aufgestellt.

5.5 Tagebau Lüptitz

5.5.1 Geologische Verhältnisse

Der Tagebau Lüptitz bei Wurzen liegt in der regionalgeologischen Einheit des Nordwestsächsischen Eruptivkomplex' (syn. Nordwestsächsischer Vulkanitkomplex, Nordwestsächsische Senke). Durch mehrere saure Vulkanitergüsse im Rotliegenden bildete sich eine zusammenhängende Fläche von mehr als 2.000 km² in einem über 1.000 m mächtigen Stapel von meist Rhyolithen und Pyroklastiten (Bild 5.9). Die genaue Mächtigkeit ist bisher unbekannt, da das gesamte Gesteinspaket bisher nicht durchteuft wurde. Lüptitz befindet sich im nördlichen Teilabschnitt - der Wurzener Senke, welche durch aufragendes Grundgebirge von der südlichen Colditzer Senke getrennt ist. Der Komplex ist durch SW - NE sowie SE - NW streichende Störungen in Teilschollen zerlegt. Vermutlich an deren Kreuzungspunkten drangen in mehreren Phasen saure Magmatite auf [PÄ 08]. Die Gesteine des Tagebaus Lüptitz werden in die Wurzen-Formation eingeordnet. Es handelt sich um pyroxenreiche Rhyolithe. Die frühere Bezeichnung „Pyroxen-Quarzporphyr“ ist nach neuer geologischer Klassifikation nicht mehr möglich, kann aber als Handelsname bestehen

bleiben. Die Gesteine sind reich an Fremdgesteinseinschlüssen oder Xenolithen. Diese sind teilweise rhyolithisch, als auch andesitisch.

Einhergehend mit den Hebungsprozessen modellierte die intensive chemische Verwitterung im Alttertiär das Relief den tektonischen Strukturen folgend aus. Im Tagebau zeigt eine querende Störung Tiefenverwitterung bis zur unteren Sohle. Der Abraum wird aus verwittertem, zersetzten Rhyolith sowie tertiären und pleistozänen Lockersedimenten aufgebaut.

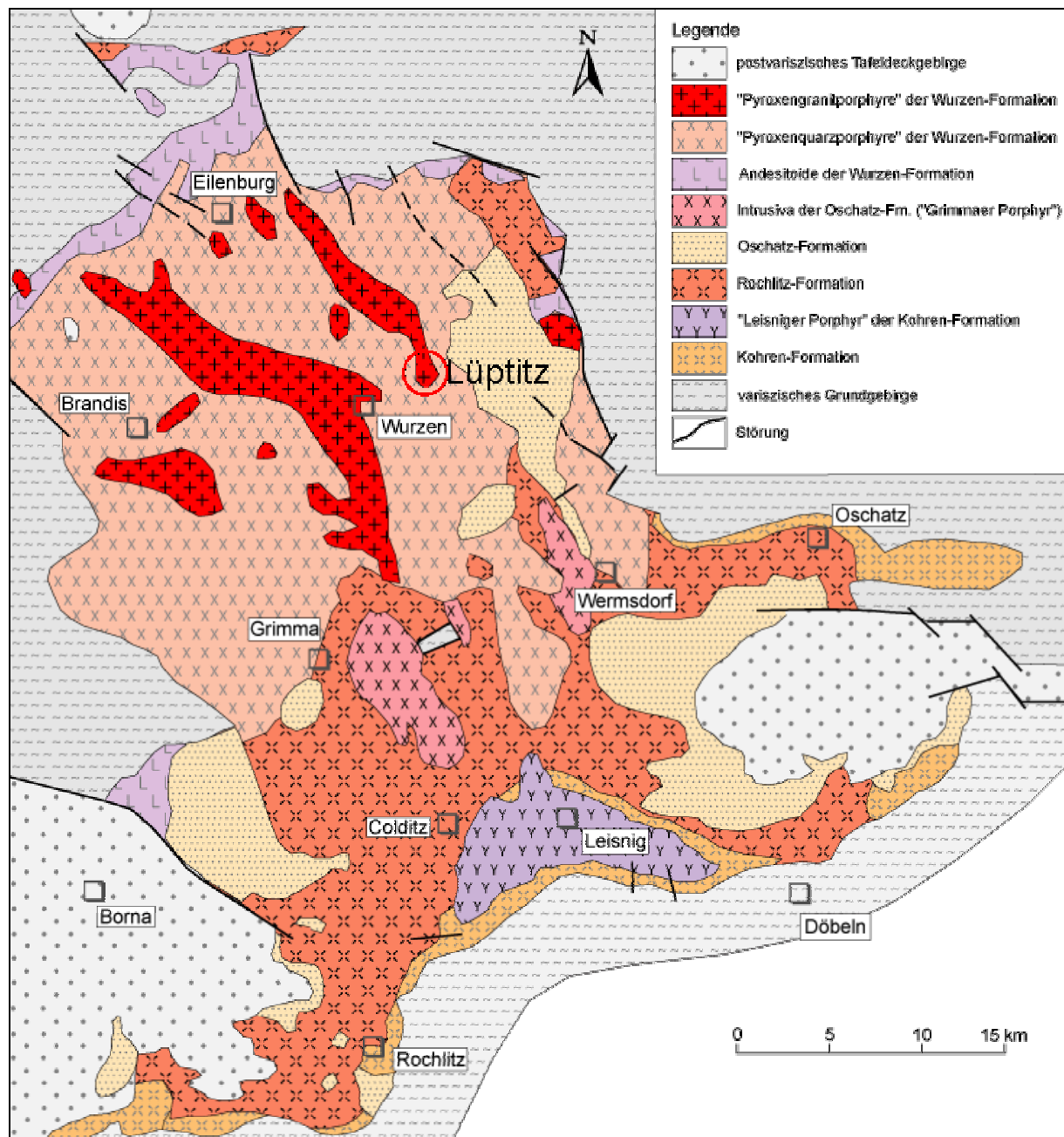


Bild 5.9: Geologie des Nordwestsächsischen Eruptivkomplexes, Darstellung ohne känozoische Bildungen nach [FRA 09, WA 06]

5.5.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit

Der subvulkanische Rhyolith setzt sich aus den Hauptgemengteilen Quarz, Plagioklas, Orthoklas, den Nebengemengteilen Pyroxen, Biotit, Chlorit, Serizit sowie den Akzessorien Apatit, Zirkon, Magnetit, Titaneisen, Pyrit, Orthit, Kalzit, Hämatit und Epidot zusammen. In der auftretenden „hellen“ Varietät sind die Pyroxene in ein Gemenge von Quarz und Chlorit umgewandelt und liegen nun als Pseudomorphosen vor. An deren Rändern tritt Biotit auf. Das Gestein zeigt ein teilweise deutlich ausgeprägtes porphyrisches Fließgefüge. Die Grundmasse (Matrix) setzt sich überwiegend aus Korngrößen im Bereich 0,005 bis 0,05 mm zusammen und wird aus reichlich Quarz und Plagioklas mit geringem Anteil von Biotit gebildet. Die Einsprenglinge haben Korngrößen im Bereich 0,1 bis 3 mm. Darüber hinaus werden im Gestein verschiedene Xenolithe und Rückstände von älteren Vulkaniten beobachtet. Diese treten in Form von Schlieren verschiedener Größe meist durch ihre unterschiedliche Färbung, der Änderung des Gefüges sowie der Zusammensetzung deutlich hervor. Der in der Grundmasse fein verteilte, hohe und verschweißende Quarzanteil ist eine der Ursachen des vergleichsweise hohen Verschleißes im Bereich des Vorbrechers der Aufbereitungsanlage. Der nicht verwitterte Rhyolith ist ein graurotes bis violettgraurotes und dunkelgraues Gestein mit gelegentlich deutlichem Fließgefüge. Die ermittelten Eigenschaften sind in Tabelle 5.5 zusammengestellt.

Der Rhyolith ist innerhalb einer mächtigen subvulkanischen Decke grobsäulig abgesondert, so dass die Säulenklüfte das Trennflächengefüge bestimmen. Dazu kommen durch jüngere, bruchtektonische Beanspruchungen weitere scherbruchartige Klüfte und Störungszonen. Das Trennflächengefüge kann auf der Grundlage der Messung der Raumstellung wie folgt beschrieben werden (Bild 5.10):

Tabelle 5.5: Gesteinstechnisch-dynamische Kennwerte des Rhyolithes vom Tagebau Lüptitz

| Parameter | Sym bol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | Ø |
|---|------------|---|--------|--------|---------|--------|----------------------|
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,648 | 2,686 | 0,0002 | 0,015 | 2,658 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 5,682 | 6,147 | 0,028 | 0,085 | 5,987 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_s | km/s | 3,387 | 3,448 | 0,001 | 0,026 | 3,421 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 3,126 | 3,183 | 0,0005 | 0,025 | 3,151 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,214 | 0,270 | 0,001 | 0,011 | 0,256 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 75,600 | 80,117 | 3,014 | 1,345 | 78,155 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 30,359 | 31,531 | 0,215 | 0,518 | 31,108 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 15,033 | 16,367 | 0,241 | 0,265 | 15,911 |
| Einaxiale Druckfestigkeit am 1 : 2 Zylinder (cal.) | σ_D | N/mm ² | - | - | - | - | 198,5 [PES 77] |

K₁-Trennflächenschar (ac-Klüftung, dominierende Säulenflächen)

NNW - SSE streichend, breit streuend, steil bis mittelsteil meist nach ENE einfallend und teilweise nach WSW geneigt; vorherrschende, großkluftbildende Trennflächen, oft weit durchsetzt, hohe Durchtrennung

K₂-Trennflächenschar (bc-Klüftung)

weitere Säulenflächen mit breiter Streuung und wechselhaftem, steilem Einfallwinkel nach N, S bis SE bzw. SSW; glatte Flächen, teilweise bogig, scherkluftartig auftretend; Trennflächen in polyedrische Richtung drehend; hoher Durchtrennungsgrad

K₃-Trennflächenschar (ab- Klüftung)

Trennflächen \pm senkrecht zur Säulenachse und parallel zum Fließgefüge, teilweise überprägt durch oberflächennahe Beeinflussung; E - W bis NE - SW streichend, flach bis mittelsteil nach Norden bis Nordwesten einfallend, teilweise glatt, durchsetzend, an steilen Säulenklüften oft absetzig, bogig und unregelmäßig, teilweise gleitflächenbildend; folgt oft dem Fließgefüge.

Für die sprengtechnische Bewertung des Festgebirges ergeben sich die Merkmale:

- Gebirgsrohddichte 2,62 g/cm³
- Klufkörperform großsäulig, polyedrisch, prismatisch, lokal plattig in der K₃-Fläche, großblockig wechselhaft
- \varnothing Trennflächenabstand 0,408 m
- \varnothing Klufkörper 0,068 m³
- Bergwasser unregelmäßig in der gesamten unteren Sohle
- Sprengbarkeit schwer sprengbar, bereichsweise sehr schwer sprengbar
- Sprengziel \pm gleichmäßig lade-, bagger- und brechergerechtes Haufwerk mit deutlicher Verbesserung der Stückigkeit des hohen Verschleißes im Bereich des Vorbrechers

5.6 Tagebau Winterberg

5.6.1 Geologische Verhältnisse

Die Kalksteine im Tagebau Winterberg gehören stratigrafisch zu den Iberg-Kalken (Frasnium - Oberdevon), dem oberen Teil der Elbingerode-Riffkalk-Formation. Ähnlich den im Kapitel 5.1 für den Tagebau Elbingerode beschriebenen Massenkalken tritt auch hier ein

devonisches Riff auf, welches eine große Bandbreite unterschiedlicher Fazies zeigt (Bild 5.1). Das Riff entwickelt sich innerhalb des Westharz-Beckens vermutlich auf einem vulkanischen Sockel weitab vom Festland. Es stellt daher ein isoliertes Vorkommen dar. Die genaue Mächtigkeit ist aufgrund der Lagerungsverhältnisse noch nicht exakt bestimmt. Bisher wurden 370 m Kalkstein erkundet. Es ist möglich, dass sich die Riffentwicklung auch im Givetium und Eifelium vollzogen hat. Dies würde eine Gesamtmächtigkeit von 500 bis 600 m vergleichbar dem Raum Elbingerode ergeben. Bisher ist bekannt, dass das Riffwachstum im Givetium einsetzte und im Frasnium ein plötzliches Ende fand. Dies korreliert mit der Faziesentwicklung im Raum Elbingerode. Das lokal begrenzte Iberg-Winterberg-Riff kann in zwei Hauptfaziesbereiche - das Vorriff (fore reef) und das Rückriff (back reef) - getrennt werden. Im Vorriff treten überwiegend hellgraue, seltener dunkelgraue und gelegentlich schwach bräunlich gefärbte Massenkalksteine mit unterschiedlicher Fossilführung und Matrix auf. Diese Biomikrite sind vorwiegend im westlichen und südwestlichen Tagebaubereich anzutreffen. Die Gesteine des Rückriffs sind im Allgemeinen sehr ähnlich ausgebildet, jedoch feinkörniger und auch dunkler in der Farbe. Der Fossil- und Kalkgehalt ist ebenfalls geringer als in der Vorriff-Fazies. Die Rückriff-Kalksteine bilden den Kern des radialsymmetrisch aufgebauten, inselartigen Riffs und sind fast vollständig von der Vorriff-Fazies überwachsen. Der Iberg-Kalkstein wird diskordant von klastischen Sedimenten des Karbon überdeckt. Dabei handelt es sich um Grauwacken und Tonschiefer des Kulm (Karbon). Diese Serien füllen vorhandene Spalten im Riff auf, die auf postsedimentäre Verkarstung bzw. Schlottenbildung im Devon zurückgehen. Die Verwitterung beginnt, nachdem der Meeresspiegel infolge eustatischer Hebungprozesse des Untergrundes sank und das Riff der oberflächennahen Erosion ausgesetzt ist. Teilweise erreichen die zahlreich verbreiteten Schlottenfüllungen bis 20 m an Mächtigkeit. Die Kulm-Füllungen weichen jedoch in ihrer Ausbildung von den äußeren das Riff umgebenden, altergleichen Serien faziell stark ab. Sie sind vorwiegend als Brekzien ausgebildet. Diese enthalten sowohl aufgearbeitete Komponenten des Vor- und Rückriffs, als auch jüngeres siliziklastisches Material sowie Karbonate des Kulm. Die Korngrößen streuen dabei sehr stark von Zentimetern bis Blockgröße von mehreren Metern. In den entstandenen Brekzien treten silifizierte Lagen (Verkieselung) auf.

Die Gesteine im Tagebau Winterberg sind tektonisch stark überprägt worden. Neben der Faltung der Grauwacken im Rahmen der variszischen Gebirgsbildung folgte eine zweite Beanspruchung während der Heraushebung des Harzes im Zuge der alpidischen Gebirgsbildungsphase. Die Lagerstätte wird allseitig von Störungen abgeschnitten. Im Osten tritt eine Hauptstörungszone auf, an der das Kalkvorkommen aufgeschoben wurde. Diese Hippelwegstörung zeigt mittelsteiles bis steiles Einfallen, ist aber in Ihrem Verlauf außerhalb des Tagebaugesbietes noch nicht gänzlich bekannt. Die tektonisch entstandenen Großklüfte

sind sekundär mineralisiert. Es finden sich zahlreiche Gangbildungen wie Baryt, Hämatit, Limonit, Malachit, Calcit u.a. an diesen Störungsbahnen. Eine Besonderheit im Tagebau Winterberg ist das Vorkommen von Impsonit, einem natürlichen Asphalt-Bitumes, dessen genaue Entstehung jedoch noch Gegenstand der Diskussion ist.

Ähnlich dem Tagebau Elbingerode werden die Karbonate gegen Ende des Tertiärs, nach Erosion der Hangendschichten, einer zweiten Verkarstung unterworfen. Die vielen Tropfsteinhöhlen, z.B. die Iberger Tropfsteinhöhle, in der Umgebung geben Hinweise auf die Intensität der Verwitterung. Die entstandenen Hohlformen werden später teilweise von Lockergesteinen lehmiger Zusammensetzung verfüllt.

Der Tagebau Winterberg zeigt infolge der geologischen Entwicklung einen stark inhomogenen Aufbau. Der Abbau der qualitativ hochwertigen Kalksteine wird durch die zahlreichen verfüllten Schloten sowie Gangminerale, welche bei Vermischung die Qualität sehr stark mindern, erschwert.

5.6.2 Felsmechanische Eigenschaften und Sprengbarkeit

Der deutlich fossilreiche, organogene Kalkstein von hellgrau-weißer, oft graubrauner Färbung hat die in Tabelle 5.6 zusammengestellten Eigenschaften und ist mit dem von Elbingerode vergleichbar (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.6: Gesteintechnisch-dynamische Kennwerte des Kalksteines vom Tagebau Winterberg

| Parameter | Sym bol | Einheit | Min. | Max. | Varianz | Stabw. | Ø |
|-------------------------|------------|---|--------|--------|---------|--------|--------|
| Rohdichte | ρ_G | g/cm ³ | 2,661 | 2,712 | 0,0003 | 0,017 | 2,686 |
| P-Wellengeschwindigkeit | c_p | km/s | 5,951 | 6,613 | 0,049 | 0,221 | 6,439 |
| S-Wellengeschwindigkeit | c_S | km/s | 3,260 | 3,341 | 0,001 | 0,031 | 3,304 |
| R-Wellengeschwindigkeit | c_R | km/s | 3,039 | 3,107 | 0,001 | 0,026 | 3,072 |
| Poisson - Zahl | ν | - | 0,278 | 0,339 | 0,0004 | 0,019 | 0,320 |
| Dyn. Elastizitätsmodul | E_{dyn} | kN/mm ² | 74,032 | 79,670 | 3,082 | 1,755 | 77,316 |
| Schubmodul | G | kN/mm ² | 28,818 | 30,058 | 0,205 | 0,453 | 29,272 |
| Akustische Impedanz | Z_G | 10 ⁻⁶ kg/m ² s | 15,800 | 17,900 | 0,494 | 0,703 | 17,325 |

Durch die NW ... WNW bis SE ... ESE streichende Schichtung wird das Trennflächengefüge bestimmt (Bild 5.11). Der zentrale Teil in Richtung der K₁-Schar ist durch sekundäre Bildungen, Beanspruchungen und Mineralisationen gestört. Das Trennflächengefüge erscheint durch die recht eigenwillige Abbauweise im Tagebau unregelmäßig und wechselhaft. Tatsächlich lassen sich im Festgebirge folgende Haupttrennflächenscharen feststellen, die eine Regelung erkennen lassen (Bild 5.11):

K₁-Trennflächenschar (ac-Klüftung)

ENE ... SE bis WSW ... NW breit streuend streichend, steil einfallend (70 - 90°) in beide mögliche Einfallrichtungen, oft als Großklüfte mit Verkarstungserscheinungen, scherkluftartig streuend, bereichsweise mineralisiert, durch Wasserwegsamkeit mit Mineralumbildungen durchsetzend, glatt bis wellig, rau, bestimmende Hauptklufthchar.

K₂-Trennflächenschar (bc-Klüftung)

N ... NE bis S ... SW streichend, dichtkluftartig auftretend, unregelmäßig, breit streuend, steil bis mittelsteil nach SSW ... SW einfallend, großkluftbildend, scherkluftartig streuend, auch absetzig, wellige, unebene Oberflächen, mit Verkarstungserscheinungen und Mineralisationen.

K₃-Trennflächenschar (ab- oder Schichtklüftung)

um NE - SW bis N - S bis E - W drehend, variabel streichend und mit 30 - 35° meist nach NW bis W, selten nach N ... W einfallend, durch flache Falten auch nach SE einfallend; die Schichtflächen sind ablagerungsbedingt wenig durchsetzend, unregelmäßig, wellig, wulstig ausgebildet und meist undeutlich erkennbar; das Gebirge wird von massenhaft vorkommenden Korallenresten durchsetzt, die wenig Schichtflächen ausbilden und damit eine massive Struktur bewirken; das Schichtkluftgefüge ist schwach ausgebildet, an einigen Stellen sind weit durchsetzende, gleitgefährdete Flächen zu beobachten, lokal sind Verkarstungserscheinungen vorhanden.

Daraus ergibt sich zusammenfassend folgende Beurteilung:

- Gebirgsrohndichte 2,67 g/cm³
- Klufthkörperform ständerartig, prismatisch, polyedrisch massiv, gestörte Struktur durch Mineralisationen, blockig, groß-blockig
- Ø Trennflächenabstand 0,687 m
- Ø Klufthkörper 0,325 m³
- Sprengbarkeit sehr schwer sprengbar
- Sprengziel gleichmäßige Stückigkeit ≥ 30 mm (Ofensteine), möglichst wenig Unterkorn

6 Steuerung der Zertrümmerung und des Abwurfes von Gewinnungssprengungen

6.1 Zusammenhänge und deren sprengtechnisch-energetische Interpretation

6.1.1 Trennflächenabstände als Haupteinfluss auf die Stückigkeit

Die Beschreibung und Quantifizierung der Festgebirge in den Versuchsbetrieben zeigt, dass die Sprengmedien durch geregelte Trennflächensysteme mit unterschiedlicher Intensität gekennzeichnet sind. Im Bild 4.1 wurde aufgezeigt, dass bei vergleichbaren Sprengungen der spezifische Sprengstoffverbrauch von der durchschnittlichen Kluffkörperzusammensetzung bzw. den Kluffabständen abhängt. Aus diesem Grunde ist es außerordentlich schwierig, den Einfluss weiterer spreng- oder zündtechnischer Parameter auf die Zertrümmerung des Haufwerkes nachzuweisen. Ordnet man den spezifischen Sprengstoffverbrauch der Versuchsbetriebe in das erweiterte Bild 6.1 (nach Bild 4.1) ein, kann wegen zu geringer Wertebereiche kein Zusammenhang gefunden werden. Erst die Einbeziehung des verwendeten Füllungsgrades und des gewünschten Sprengzieles kann die Streuung der Eingangswerte erklären.

Mit zunehmendem Füllungsgrad und dem durchschnittlichen Kluffabstand bzw. der Kluffkörpergröße steigt der erforderliche spezifische Sprengstoffaufwand bei gleichem Sprengziel an (Bild 6.1).

In den Kalksteintagebauen Elbingerode und Winterberg ist man darauf bedacht, wenig Unterkorn ≤ 30 mm zu erzeugen. Trotz der vergleichsweise deutlich geringeren Trennflächenhäufigkeit ist der spezifische Sprengstoffverbrauch drastisch niedriger und für das gewünschte Sprengziel unter bestimmten, noch zu erläuternden Randbedingungen ausreichend. Im Ergebnis der Untersuchung kann unter Einbeziehung bisher bekannter Zusammenhänge festgestellt werden, dass man mit der Differenzierung des Bildes 6.1 durch weitere Daten in der Lage ist, die...

...wichtige, fundamentale Größe des spezifischen Sprengstoffverbrauches q für die bekannten Festgebirgsverhältnisse praxisgerecht abzuschätzen.

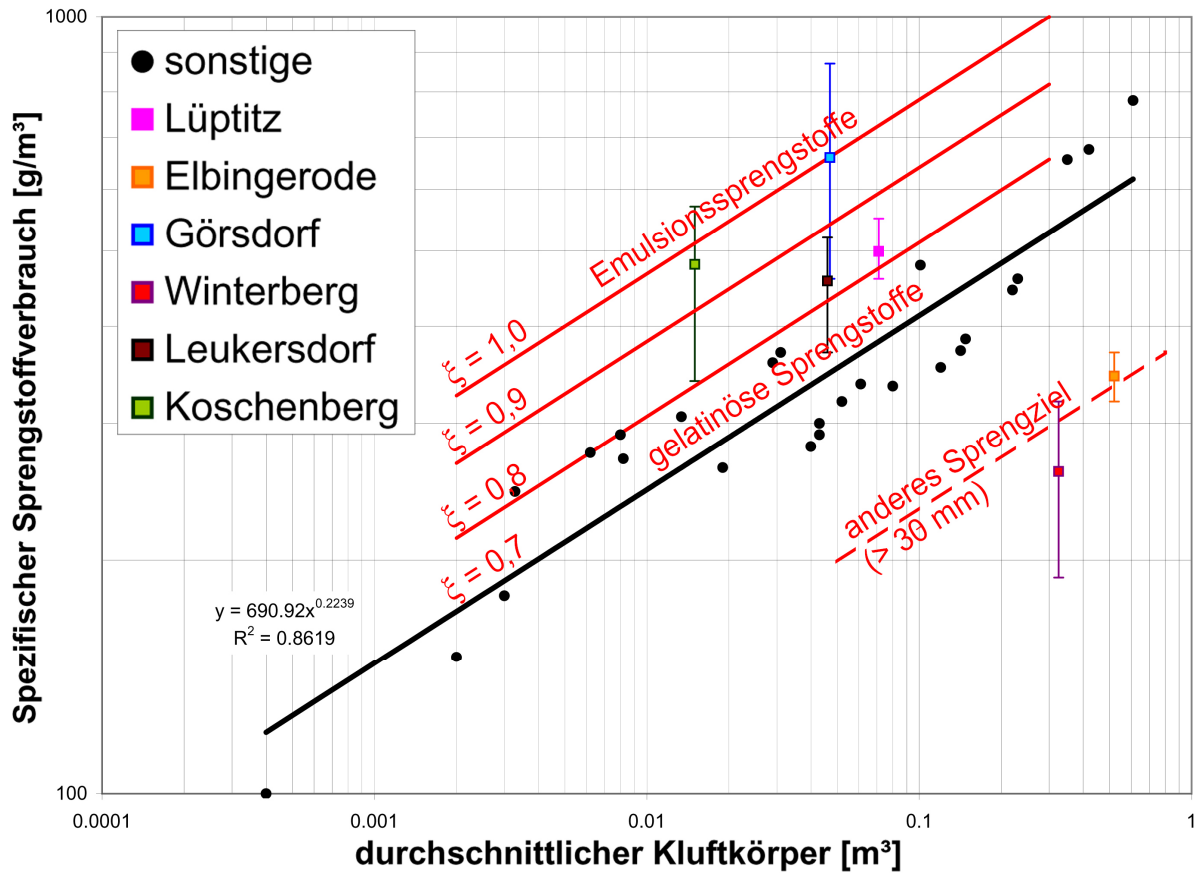


Bild 6.1: Zusammenhang zwischen durchschnittlichen Klüftkörpern, dem spezifischen Sprengstoffverbrauch und Füllungsgrad

Mit den Bilder 6.2 bis 6.4 wird die Zertrümmerung des Festgebirges durch die Gewinnungssprengung als Differenz der durchschnittlichen Klüftkörperzusammensetzung und der Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser der Tagebaue Koschenberg, Lüptitz und Elbingerode gezeigt. Der colorierte Flächenanteil der Bilder 6.2 bis 6.4 stellt die Größenordnung der Zertrümmerungswirkung dar.

Es ist zu erkennen, dass die energetische Wirkung und Umsetzung des eingesetzten Sprengstoffes in weniger klüftigen erheblich größer als in stark klüftigen Festgebirgen ist. Größere Klüftkörper werden eher und intensiver zerstört als kleinere [MÜ 71, 74 und 79].

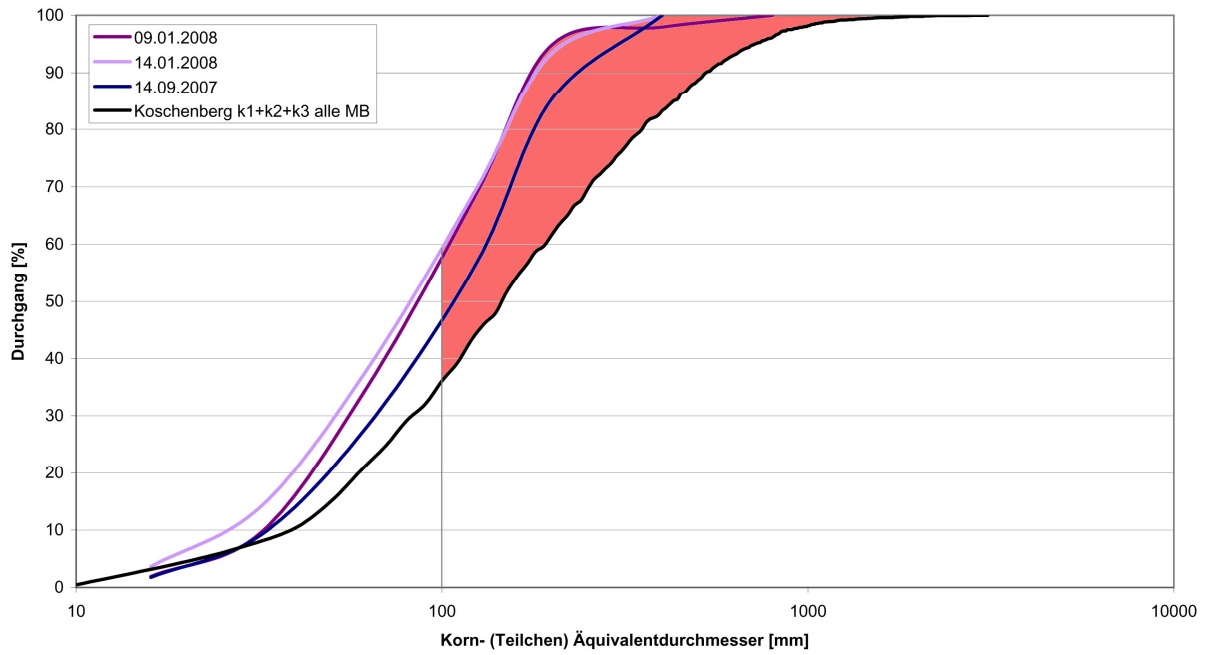


Bild 6.2: Zertrümmerung als Differenz der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzung und Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser im Tagebau Koschenberg

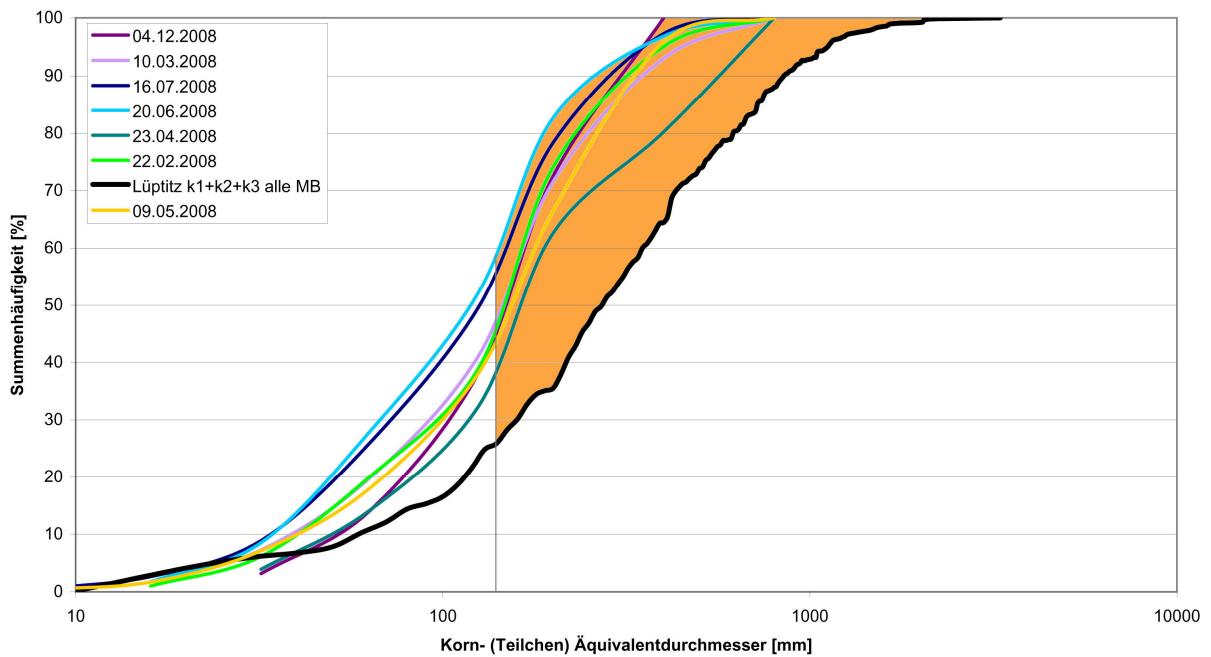


Bild 6.3: Zertrümmerung als Differenz der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzung und Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser im Tagebau Lüptitz

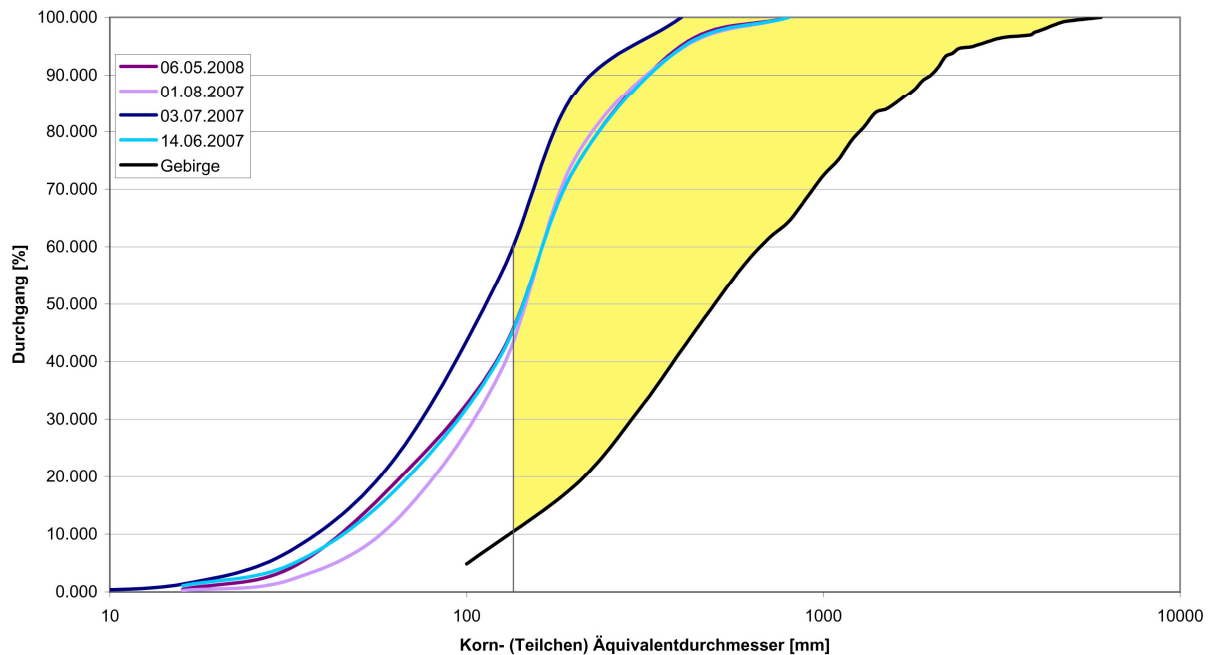


Bild 6.4: Zertrümmerung als Differenz der durchschnittlichen Kluftkörperzusammensetzung und Korngrößenverteilung der gesprengten Haufwerke ≥ 100 mm Äquivalentdurchmesser im Tagebau Elbingerode

6.1.2 Die Bedeutung gesteinsdynamischer Eigenschaften

Die zur Beurteilung der Sprengbarkeit für die Festgesteine gewählte Größe der akustischen Impedanz ist ein Kennwert, der praktisch den Widerstand des Gesteines gegen eine durchgehende elastische Welle wie die P-, S- oder Oberflächenwellen angibt. Je größer die akustische Impedanz, um so besser werden diese Wellen in dem Medium übertragen. In Gesteinen mit geringen akustischen Impedanzen oder Schallhärten werden die Wellen schlecht übertragen, so dass die energetische Ausnutzung derselben deutlich zurückgeht. Diese Aussage gilt gleichermaßen für die durch Sprengungen erregten Stoßwellen. Schallharte Festgesteine zeigen zunehmendes Spröbruchverhalten und eignen sich besser zur Umsetzung eingebrachter Wellenenergien. Festgesteine mit hohen akustischen Impedanzen sind somit besser für eine Zertrümmerung geeignet als schallweiche Materialien. Nach Bild 4.3 nehmen die Wellenübertragung durch den Sprengvorgang die Gesteine der Versuchsbetriebe in folgender Reihenfolge ab:

- Winterberg
- Elbingerode
- Lüptitz
- Koschenberg
- Görsdorf
- Leukersdorf (deutlich am ungünstigsten).

Durch numerische Simulation von im Bohrlochtiefsten gezündeten Ladungen an Plexiglasmodellen fanden [RO 98a] heraus, dass je nach Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes, der P- und S-Wellengeschwindigkeit der Festgesteine einer Sprenganlage folgende grundlegende Fälle der Wellenausbreitung unterschieden werden müssen (vgl. Bild 4.7):

Supersonischer Fall

Die Detonationsgeschwindigkeit c_d ist größer als die P-Wellengeschwindigkeit des Festgesteines. Es werden zwei Wellen mit Mach-Fronten für die P-Welle und die Scherwelle generiert. An der freien Oberfläche überlagert sich die einfallende Scher-Konuswelle mit der reflektierten PP-Welle und der mode-konvertierten PS-Welle. Diese Superposition bewirkt eine Spannungsüberhöhung und deutliche Zertrümmerungen um das Bohrloch.

Transsonischer Fall

Die Detonationsgeschwindigkeit liegt zwischen der P- und S-Wellengeschwindigkeit; danach entsteht nur eine S-Mach-Front, die an der Oberfläche wenig bewirkt, jedoch für eine zertrümmernde Wirkung geeignet ist.

Subsonischer Fall

Die Detonationsgeschwindigkeit ist niedriger als die P- und S-Wellengeschwindigkeit des Mediums/Gesteins. Es fehlen beide Mach-Wellen-Fronten. Es tritt dafür eine starke inhomogene parabolspitzförmige Scherwelle auf, die an der freien Oberfläche reflektierte Scherwellen und zwei gebeugte Rayleigh-Wellen verursacht. Diese Oberflächenwellen können im Nahfeld ungünstige Auswirkungen auf Erschütterungen verursachen [RO 98a].

Ein Mach (Ma) wird definiert als das Verhältnis zwischen dem Quotienten Detonationsgeschwindigkeit durch die P- oder S-Wellengeschwindigkeit des Gesteins. Ist der Wert ≥ 1 , entsteht eine zerstörende Mach-Front.

Durch die Messung der P-, S- und R-Wellengeschwindigkeiten der einzelnen Festgesteine war es möglich, für jeden Tagebau die möglichen Fälle der Wellenausbreitung bei der Sprengstoffumsetzung zu bestimmen. Die Darstellung im Bild 6.5 belegt, dass folgende Fälle auftreten können:

| | |
|---------------------------------------|---|
| transsonisch | Tagebau Lüptitz, Elbingerode, Koschenberg |
| Grenzfall transsonisch - supersonisch | Tagebau Görzdorf |
| subsonisch | Tagebau Winterberg (bei Einsatz von pulverförmigen ANFO Sprengstoffen) |
| transsonisch | Tagebau Winterberg (bei Einsatz von Emulsionssprengstoffen) |
| supersonisch | Tagebau Winterberg (bei ausschließlich gelatinösen Sprengstoffen) Tagebau Leukersdorf |

Aus dieser Gegenüberstellung ist ableitbar, dass Sprengstoffgemische mit deutlich unterschiedlichen Detonationsgeschwindigkeiten wie im Tagebau Winterberg bei der Zertrümmerung des Festgebirges recht ungünstig wirken. Sie zeigen hohe Energieverluste der verfügbaren Sprengenergie mit entsprechenden Erschütterungen.

Für den Ablauf der Sprengung und die wirkungsvolle Umsetzung des Sprengstoffes ist es daher von entscheidender Bedeutung, dass die eingesetzten Sprengstoffgemische eine \pm einheitliche oder ähnliche Detonationsgeschwindigkeit besitzen, die möglichst zwischen oder über dem P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Festgesteine bzw. des Sprengmediums liegen.

Auf diese Weise wird die Empfehlung bei der Anwendung des Prinzips der Impulstheorie bestätigt, dass die Ausladung der Bohrlöcher möglichst mit einem oder überwiegend einheitlichen Sprengstoff erfolgen sollte. Je mehr Mach-Fronten entstehen, um so günstiger ist die zertrümmernde Wirkung. Diese wird durch die gemeinsame Zündung der Ladungen verstärkt.

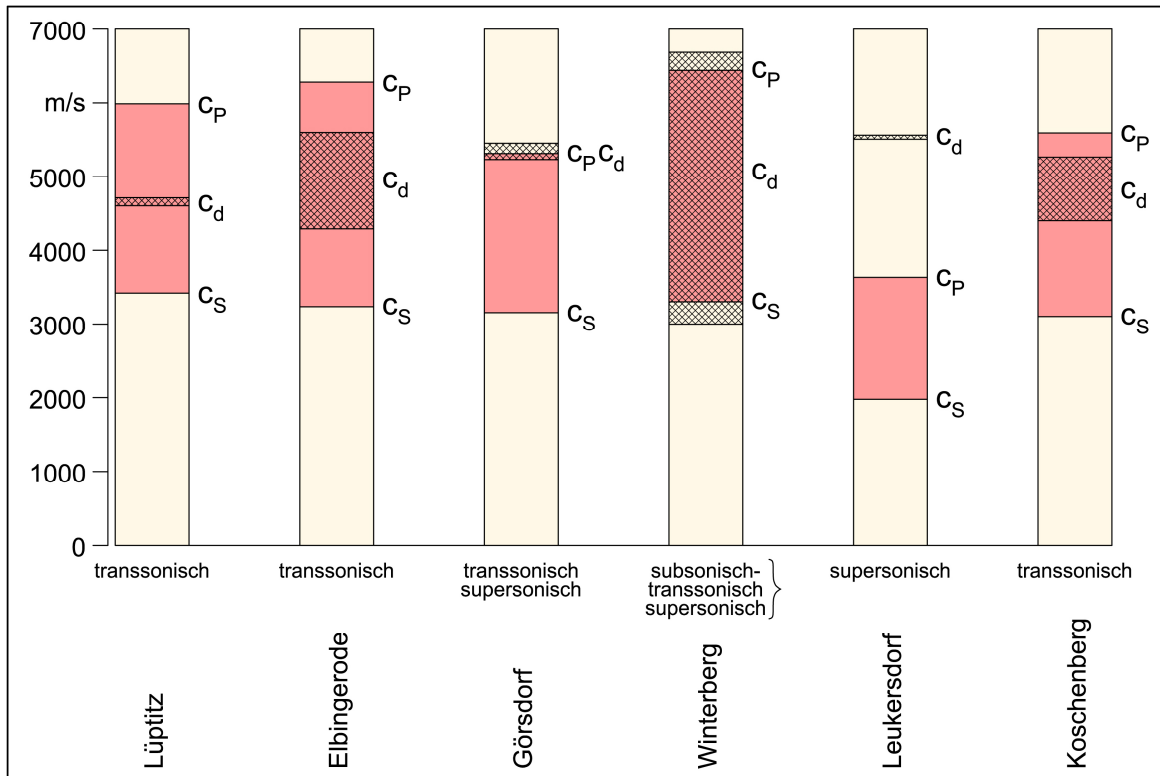


Bild 6.5: Vergleich der Detonationsgeschwindigkeit der eingesetzten Sprengstoffe mit der P- und S-Wellengeschwindigkeit zwecks Ermittlung der grundlegenden Fälle der Wellenausbreitung nach [RO 98a]

6.1.3 Steuerung der Zertrümmerung

Nachdem aufgezeigt werden konnte, dass die natürlichen Brüche, Risse und Fehlstellen des Festgebirges innerhalb einer Sprenganlage einen wesentlichen Einfluss auf den Zertrümmerungseffekt innerhalb des Haufwerkes haben, galt es, die wirksamen Detonationsdrücke P_{z0} nach der Beziehung (18) mit der erzielten Haufwerksstückigkeit statistisch zu untersuchen. In den Bildern 6.6 bis 6.8 sind drei Beispiele aus den Tagebauen Elbingerode, Winterberg und Görzdorf dargestellt, die den Zusammenhang zwischen der verbesserten Stückigkeit definiert durch die Masse der durchschnittlichen Haufwerkskorngröße (average grain size mass = *AGSM*) und dem wirksamen Detonationsdruck P_{z0} aufzeigen. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei 68,96 ... 73,65 ... 83,36 % vergleichsweise auf einem hohen Niveau und belegen, dass mit der steigenden Größe des Detonationsdruckes die Zertrümmerung signifikant ansteigt bzw. der *AGSM*-Wert fällt.

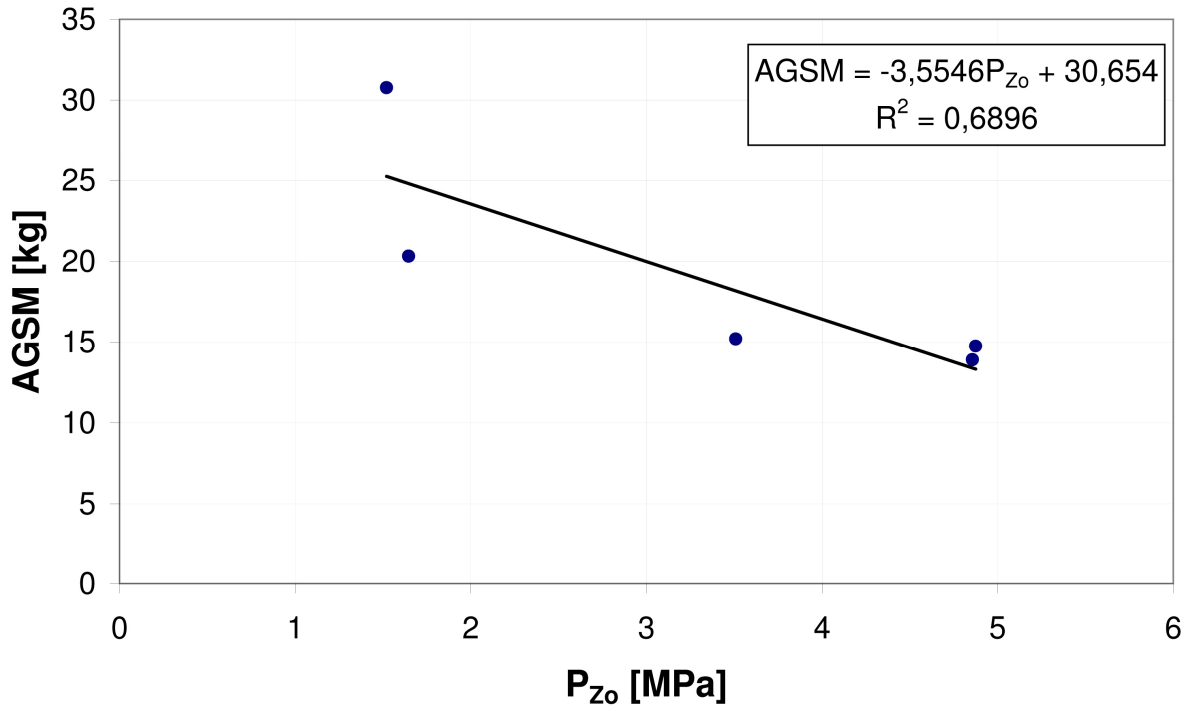


Bild 6.6: Zusammenhang zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Z_0} zur erzielten Masse der durchschnittlichen HaufwerkskorngroÙe (AGSM) im Tagebau Elbingerode

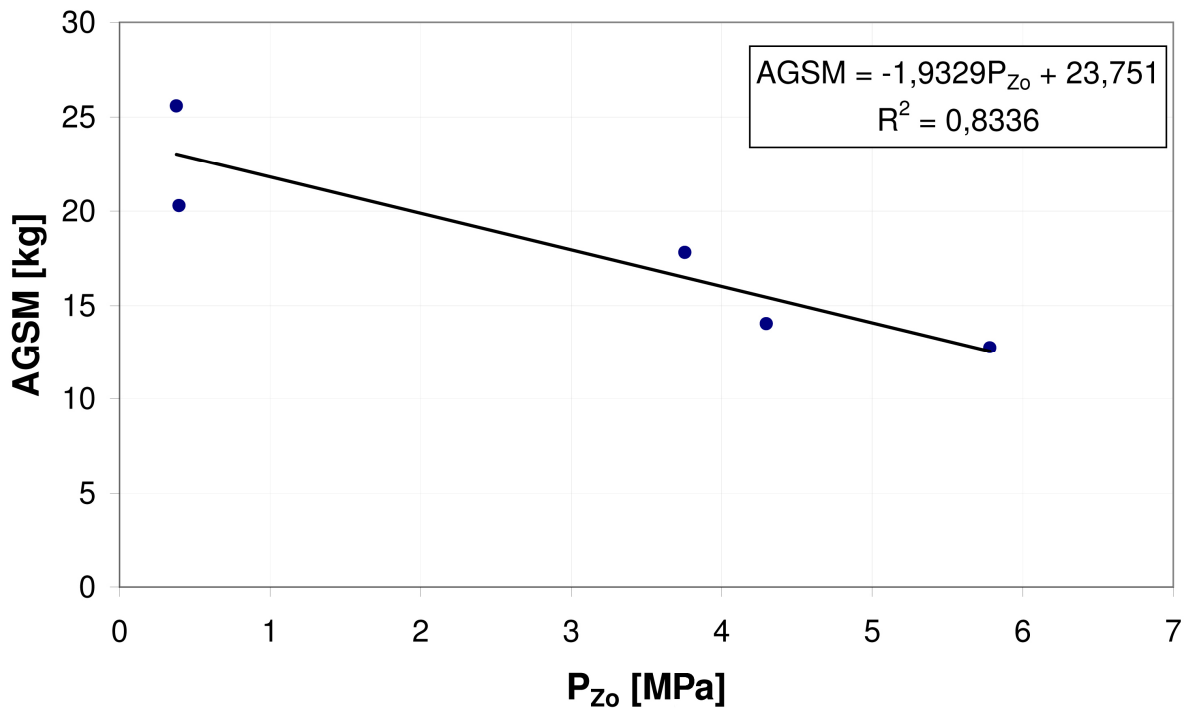


Bild 6.7: Zusammenhang zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Z_0} zur erzielten Masse der durchschnittlichen HaufwerkskorngroÙe (AGSM) im Tagebau Winterberg

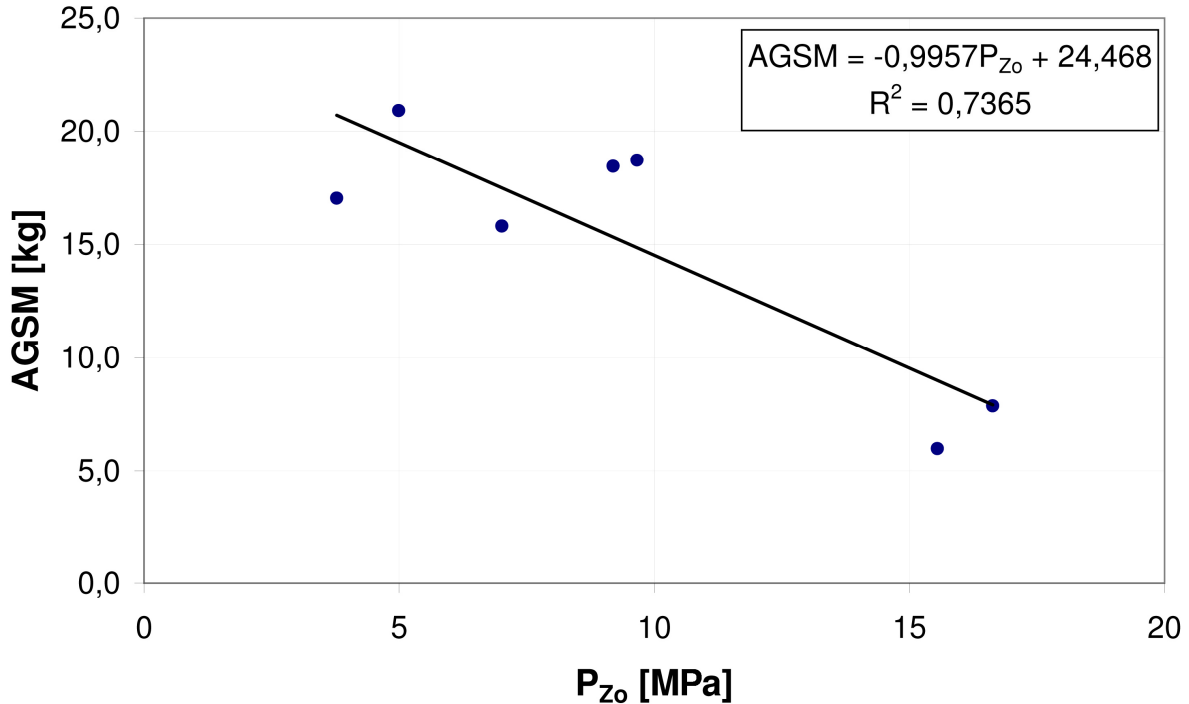


Bild 6.8: Zusammenhang zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{Z_0} zur erzielten Masse der durchschnittlichen Haufwerkskorngröße (AGSM) im Tagebau Görsdorf

Das bemerkenswerte an den drei Beispielen des nachgewiesenen Zusammenhanges ist, dass das Einheitsvolumen V_0 und das gezündete Seitenverhältnis λ_s in der Beziehung (18) nur durch Variation der Zündfolge verändert wurde. Der spezifische Sprengstoffeinsatz und der Füllungsgrad sind gleich geblieben. Im Tagebau Winterberg wurde dagegen erstmals Emulsionssprengstoff statt ANFO eingesetzt, so dass sich mehr Eingangswerte für die Berechnung des Detonationsdruckes geändert haben. Bei den anderen Betrieben ist im Wesentlichen nahezu ausschließlich, sich umweltfreundlich umsetzender Emulsionssprengstoff geladen worden. Das bedeutet, die entstehenden Schwaden enthalten keine oder nur geringe Anteile von toxischen Gasen.

Mit der Beschränkung auf die Änderung der Zündfolge konnte eine energetisch besser Ausnutzung des eingesetzten Sprengstoffs wurde. Die Zündung mehrerer Bohrlöcher nach der Impulstheorie nebeneinander und in einem einheitlichen Ausbruchwinkel führt durch Überlagerung der freigesetzten Mach-Wellenfronten zur besseren Zertrümmerung des Haufwerks. Diese Aussage wird durch die Darstellung von verschiedenen gezündeten Sprengungen im Bild 6.9 mit dem Vergleich zur Klufkörperzusammensetzung weiter verstärkt. Es ist aus Bild 6.9 die bereits bekannte Erscheinung ableitbar, dass die größeren Festgebirgsanteile resp. Klufkörper intensiver zertrümmert werden als die feineren.

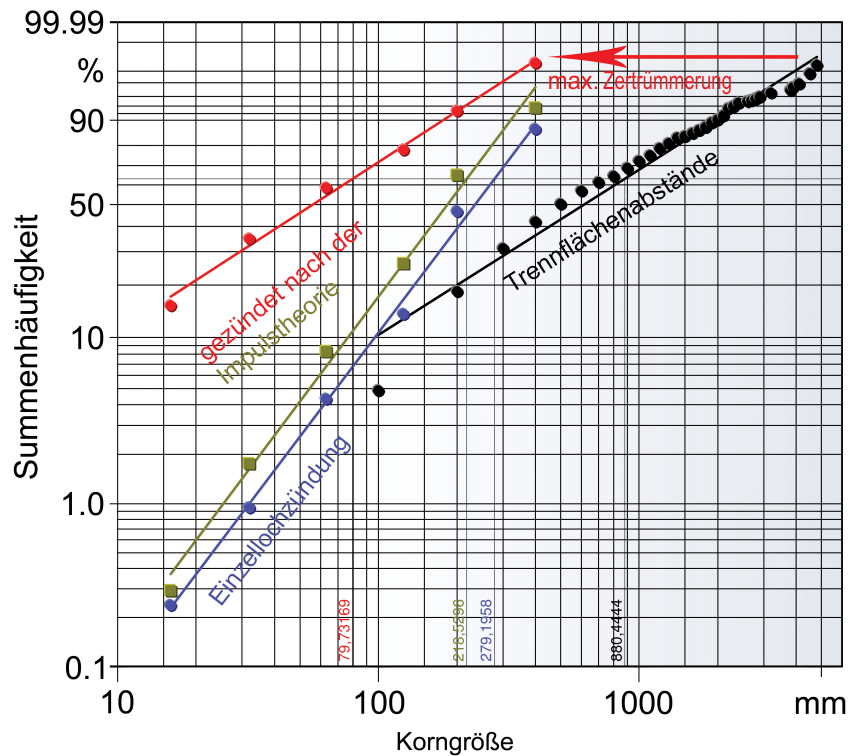


Bild 6.9: Vergleich der Korngrößenverteilung Festgebirge - Haufwerk; Sprengung mit Einzelllochzündung und zwei Sprengungen mit der Zündfolge nach der Impulstheorie im ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET-Diagramm

Desweiteren ist im linken unteren Bereich des Bildes 6.9 die oft beobachtbare Tatsache dokumentiert, dass die Stückigkeit im feineren Kornbereich nicht selten gröber als sie gemessene Klufkörperzusammensetzung ist. Die hohe innere spezifische Oberfläche des Gebirges kann von der Sprengwirkung nicht durchgängig erreicht und zertrennt werden. Auf diese Weise ist erklärbar, dass das Unterkorn nicht im gleichen Maße ansteigt wie die Zertrümmerung der massiveren Gebirgsanteile.

Zum weiteren Nachweis der besseren energetischen Umsetzung des Sprengstoffes für die Zertrümmerung des Festgebirges wurden ferner die spezifischen Oberflächen des Haufwerkes mit denen der Klufkörperzusammensetzung gegenübergestellt. Als Datengrundlage für diese Untersuchungen dienten die aufwendig erstellten Haufwerkszusammensetzungen im ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET-Diagramm wie Bild 6.10 und 6.11 vermittelt. Die gegenübergestellten Bilder 6.10 und 6.11 lassen erkennen, dass die Sprengwirkung im intensiver geklüfteten Festgebirge vom Koschenberg die Gesteinsmassen weniger durchgreifend zerstört, als in den sehr gering geklüfteten Massiv von Elbingerode. Die Sprengstoffenergie geht insbesondere im Tagebau Koschenberg durch die hohe spezifische Oberfläche weitestgehend verloren bzw. kann in dem bereits stark zerbrochenen Gebirge weniger ausrichten. Je weiter die Geraden der Kornverteilung nach links zur Ordinate wandern, um so günstiger ist die erzielte Haufwerkszusammensetzung.

Auf diese Weise ist es objektiv möglich, die umgesetzten Bohr-, Spreng- und Zündparameter hinsichtlich ihrer Auswirkungen zu analysieren. Diese Bewertung wurde auf der Grundlage der erarbeiteten Unterlagen der Ladungsverteilungen, Bohrlochtiefen, Zündfolge, Verzögerungszeiten und der genauen Vermessung der Sprenganlage mit dem Laserscanner vorgenommen. Das Bild 6.12 ist eine beispielhafte Darstellung eines 3-D-Laserscanner-Bildes mit Eintragung des Bohrschemas der größten Sprengung im Tagebau Elbingerode.

Zusammenfassend ist festzustellen:

Die Größe des wirksamen Detonationsdruckes P_{Z0} kann ohne Veränderung der anderen Parameter durch die Variation der Zündfolge so verändert werden, dass eine energetisch bessere Ausnutzung der eingesetzten Sprengstoffe erfolgt.

Die Zertrümmerung kann zielgerecht, systematisch gesteigert werden wenn

- der wirksame Detonationsdruck erhöht wird
- der spezifische Sprengstoffverbrauch gesteigert wird und
- der eingesetzte Sprengstoff eine hohe Detonationsgeschwindigkeit (zwischen c_p ... c_s Gestein) und Dichte hat
- für eine optimale Wellenausbreitung \pm einheitliche Sprengstoffgemische eingesetzt werden.

Dazu wurden beispielsweise im Tagebau Lüptitz, Koschenberg, Winterberg und Elbingerode systematische Änderungen der Sprengstoffgemische von Emulsionssprengstoffen eingeführt und umgesetzt.

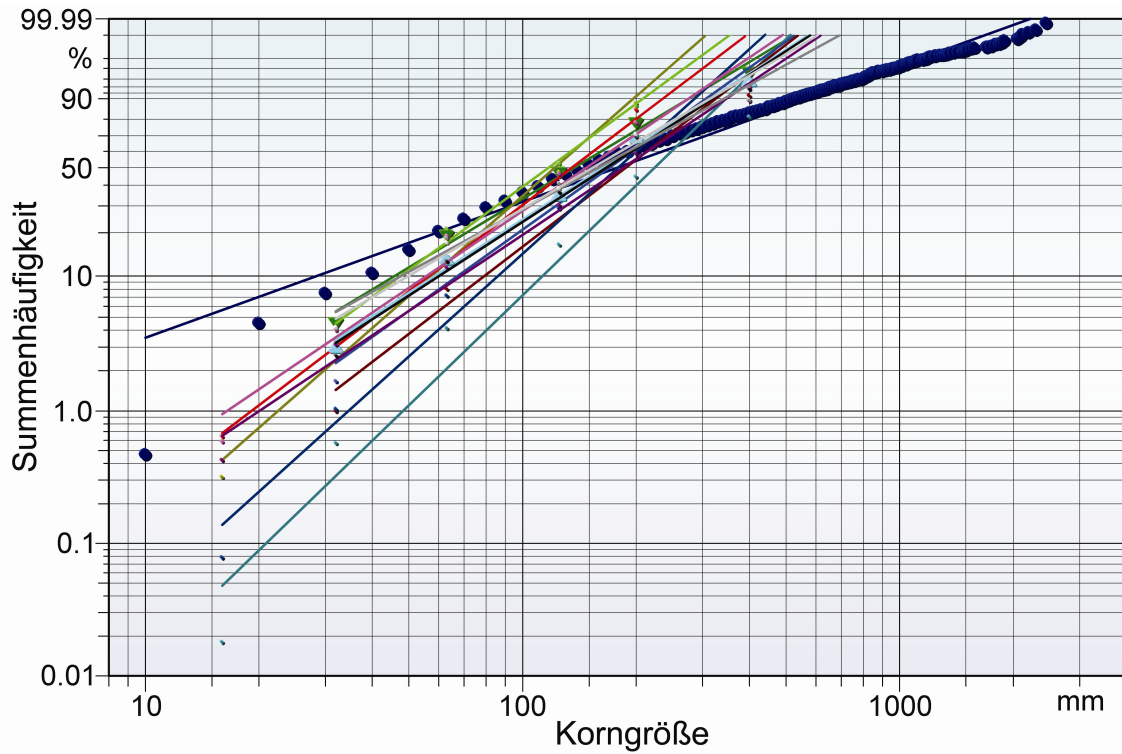


Bild 6.10: Auswertung der Haufwerkszusammensetzung der Sprengungen im Vergleich mit der Klufkörperzusammensetzung des Festgebirges im Tagebau Koschenberg

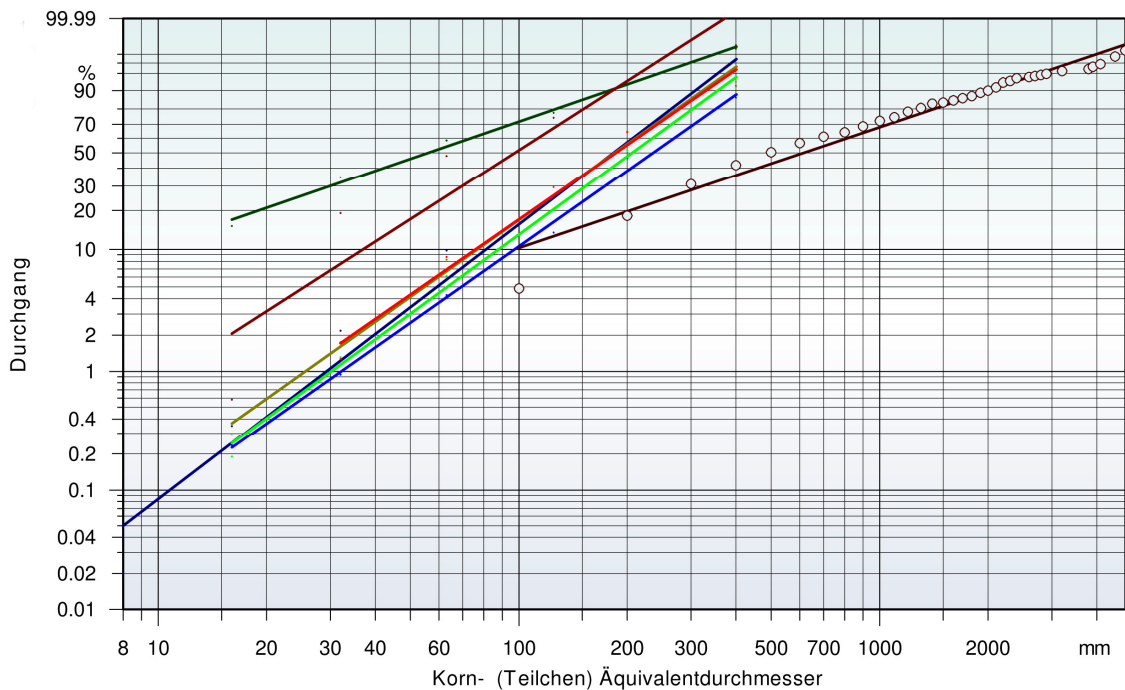


Bild 6.11: Auswertung der Haufwerkszusammensetzungen der Sprengungen im Vergleich mit der Klufkörperzusammensetzung des Festgebirges im Tagebau Elbingerode

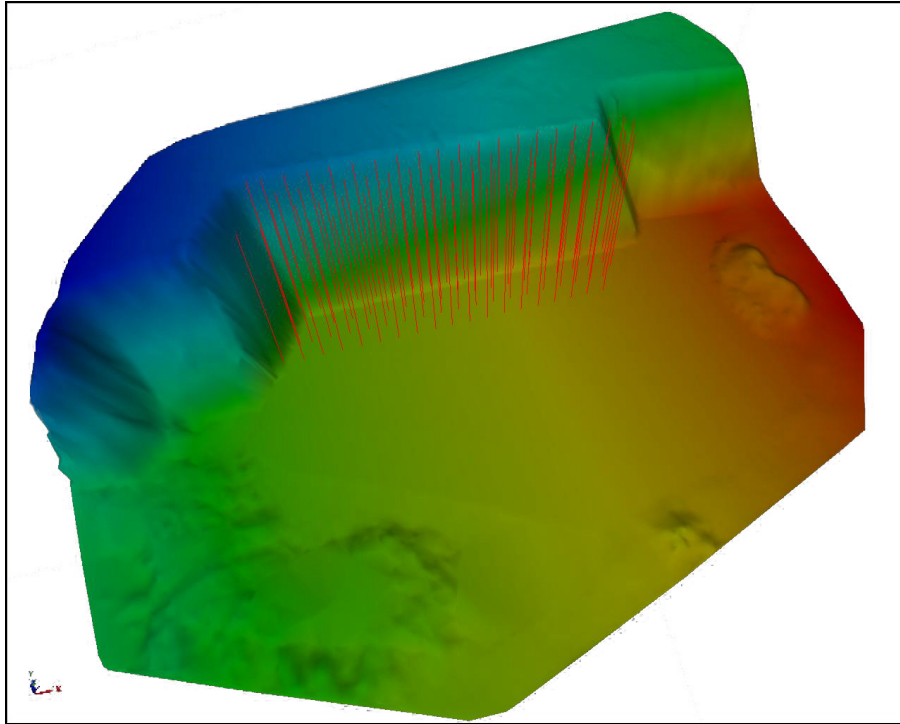


Bild 6.12: Beispielhafte Darstellung eines 3-D-Laserscanner-Bildes mit den Bohrlöchern der Sprengung vom 06.05.2008 im Tagebau Elbingerode

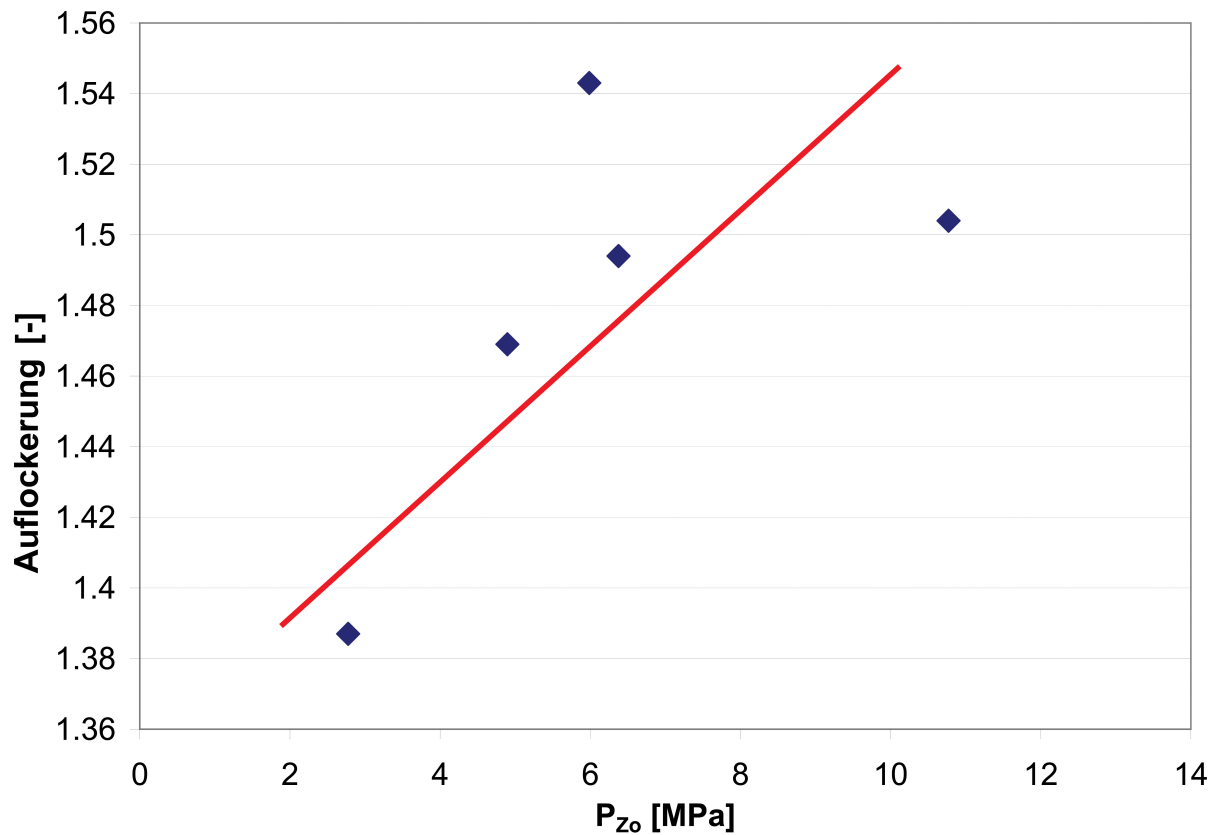


Bild 6.13: Beeinflussung der Auflockerung des Haufwerkes durch die Größe des wirksamen Detonationsdruckes pro Einheitsvolumen im Tagebau Lüptitz

6.1.4 Beeinflussung des Abwurfs

Die Auswertung der Videos aller messtechnisch begleiteten Sprengungen und die Messungen der Ausbruchgeschwindigkeit mit dem Radarsensor zeigten, dass die Sprengmasse sich bereits nach wenigen Millisekunden aus dem stehenbleibenden Gebirge löst und die Bewegungen des Haufwerkes eingeleitet werden. Es war daher zu prüfen, inwieweit der wirksame Detonationsdruck das Ausbruchverhalten der Sprengmasse aus dem Verband beeinflusst oder ob entsprechend der bisherigen Ansicht ausschließlich der sich aufbauende Gasdruck verantwortlich ist. Im Bild 6.13 wird beispielhaft die trendartige Beeinflussung der Auflockerung durch die Größe des wirksamen Detonationsdruckes aufgezeigt. Je größer der wirksame Detonationsdruck pro Ladung ist, um so mehr steigt die Auflockerung des Haufwerkes an.

Es wurde schon in anderen Arbeiten vermutet, dass die dynamische Umsetzung der Ladungen einen Einfluss auf den Abwurf haben muss [BE 90, BU 80, CO 96, HE 93, HOP 98, HU 99, LA 63, PE 94, TH 78]. Physikalisch ist die Wirkung eines größeren Detonationsdruckes auf die Bohrlochwandung ableitbar und mit dem zur Anwendung gebrachten Modell überprüfbar [RO 98a, RO 98b, RO 99, RO 01]. Der Zusammenhang erklärt die beobachtete und mit dem Laserscanner gemessene Tatsache, dass man mit der nach der Impulstheorie ausgelegten Zündfolge die Auswurfrichtung senkrecht zur gemeinsam gezündeten Bohrlochreihe weglenken kann (Bild 6.14).

Damit ist festzustellen, dass man den Abwurf des Haufwerkes durch die Zündfolge einerseits in eine gewünschte Richtung lenken und andererseits das Ausbruchverhalten durch Erhöhung des wirksamen Detonationsdruckes deutlich verstärken kann.

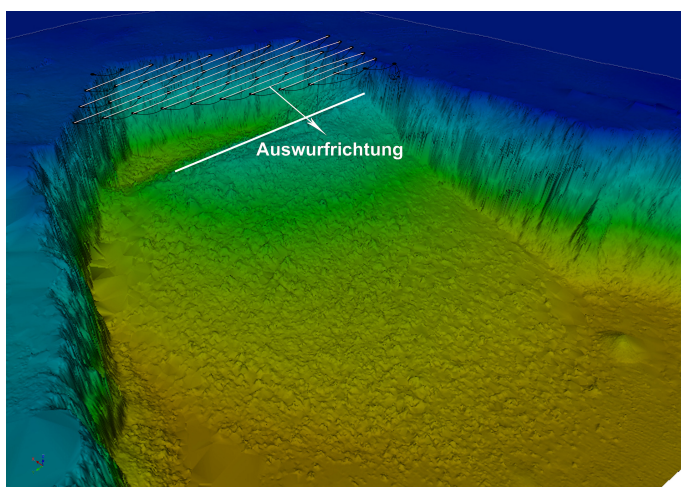


Bild 6.14: Beispiel eines gelenkten Ausbruches einer 4-Reihensprengung durch die Zündfolge nach der Impulstheorie (Tagebau Lüptitz)

6.1.5 Sonstige Einflüsse auf den Abwurf und die Auflockerung

Die Auflockerung und der Auswurf werden wie zu erwarten nicht zuletzt vom eingebrachten Schwadenvolumen der Sprengstoffe bedingt und zwangsläufig durch die entstandene Stückigkeit beeinflusst. Dazu wurde die gemessene und berechnete kinetische Energie des Haufwerkes mit dem aus der Gesamtladmenge errechnetem Schwadenvolumen in Beziehung gebracht (Bild 6.15). Dem Bild 6.15 ist ein vergleichsweise großer, aber statistisch nicht gesicherter Einfluss des Schwadenvolumens auf die kinetische Energie zu entnehmen. Die größten Auswirkungen auf einen geordneten, aufgelockerten Abwurf des Haufwerkes haben die Korngrößenzusammensetzung bzw. die primär vorhandenen Trennflächenabstände im gesprengten Medium (Bild 6.16).

Mit steigender Korngröße wird das Haufwerk stärker aufgelockert und die kinetische Energie nimmt zu (Bild 6.16).

Nach diesen Ergebnissen ist die Erkenntnis zu belegen, dass die Kluftkörperzusammensetzung sowohl die Stückigkeit als auch den Abwurf des Haufwerkes in erheblichem Maße beeinflusst [MÜ 74, HE 93].

Die Ausbruchgeschwindigkeit und Haufwerksstückigkeit zeigen einen beachtlichen Zusammenhang. Für den Abwurf ist somit gemäß des entwickelten Modells des Bildes 4.7 verantwortlich:

- der wirksame Detonationsdruck in der Frühphase des Abwurfes als dynamischer Energieanteil
- das Schwadenvolumen des entstehenden Gasdruckes und der quasistatische, nicht messbare Gasdruck als statischer Energieanteil
- die vorhandenen Kluftkörper- und entstehende Korngrößenzusammensetzung des Haufwerkes
- die Art und Weise der Stoßwellenausbreitung (super-, trans- oder subsonisch)

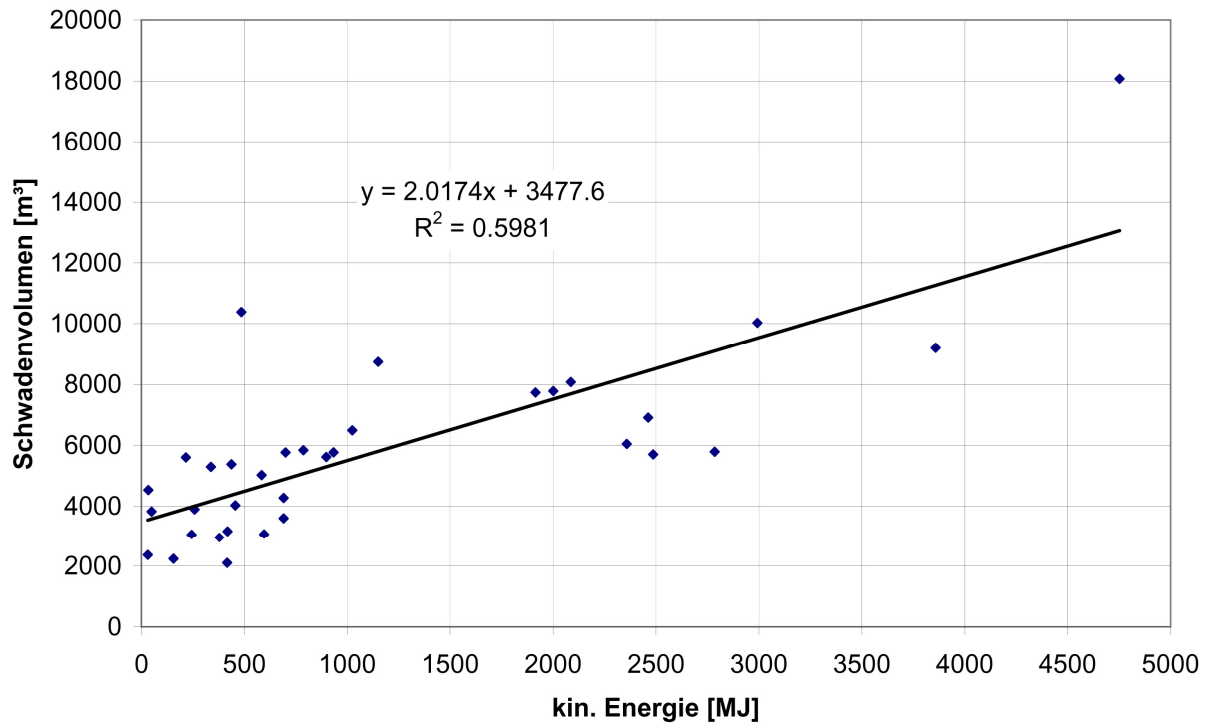


Bild 6.15: Beziehung zwischen der gemessenen kinetischen Energie des Haufwerkes und dem durch die Gesamtladung eingebrachten Schwadenvolumen

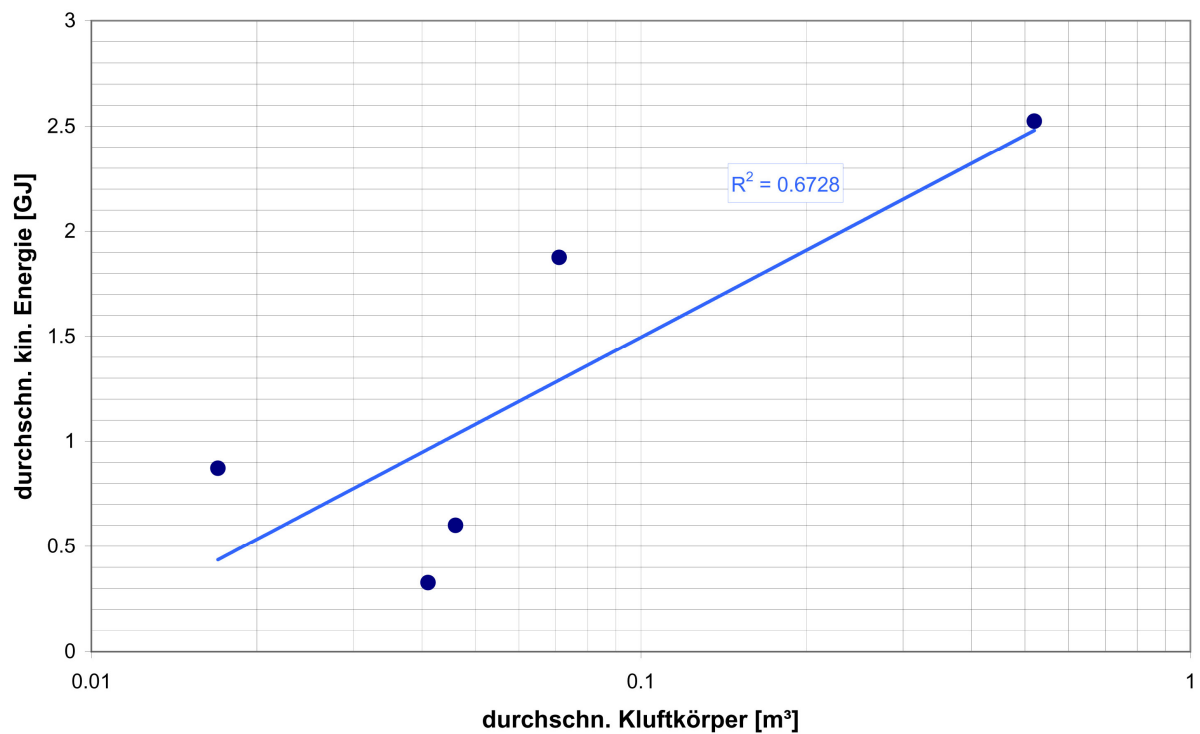


Bild 6.16: Beziehung zwischen der gemessenen, durchschnittlichen kinetischen Energie des Haufwerkes und der mittleren Klufkörpergröße in den Versuchsbetrieben (außer Tagebau Winterberg)

6.1.6 Bemerkungen zur Zündverzögerung

Bis auf die Ausnahme der ersten beiden Sprengungen im Tagebau Winterberg, die elektrisch und am Bohrlochmund gezündet wurden, sind alle Versuchssprengungen nichtelektrisch mit den Oberflächenverzögerungszeitstufen 17 - 25 - 42 ms im Bohrlochtiefsten redundant initiiert worden. Der Zünder im Bohrlochtiefsten wurde 25 ms vor dem am Bohrlochmund gezündet. Es wurde bewusst darauf geachtet, dass die Verzögerung wenig variiert oder gleichbleibend ausgelegt war. Die entscheidende Neuerung war, dass die Zündfolge entsprechend den Prinzipien der Impulstheorie gestaltet wurde. Die Verknüpfung der einzelnen Ladungen geschah mit unterschiedlichen Winkeln zur freien Fläche (Beispiel in Bild 4.5). In mindestens drei Betrieben war es vorgesehen, dass elektronische Zünder zum Einsatz kommen. Dieses Vorhaben ist an der fehlenden Bereitschaft sowohl der Sprengstofflieferanten als auch der Versuchsbetriebe gescheitert, die teuren elektronischen Zünder zu kaufen oder zur Verfügung zu stellen.

Die Bearbeiter haben im Vorfeld der Untersuchungen zusammen mit ORICA EUROPA bei entsprechenden Sprengversuchen das elektronische Zündsystem Ikon eingesetzt und damit nach den Prinzipien der Impulstheorie gezündet. Die Ergebnisse sind in [MÜ 04b] bereits veröffentlicht. Als Beleg, dass die beiden Zündverfahren keine unterschiedlichen Erschütterungen erzeugen, dient das Bild 6.17.

Die Messwerte liegen alle innerhalb eines üblichen Streubereiches (Bild 6.17). In einem Granodiorit Tagebau zeigen dagegen die nichtelektrischen und elektronisch gezündeten Sprenganlagen von 3- bis 4-Reihensprengungen signifikante Unterschiede (Bild 6.18). Die mehrfach elektronisch in einer Reihe initiierten Ladungen haben insbesondere im Nahbereich deutlich höhere Schwinggeschwindigkeit ausgelöst als erwartet.

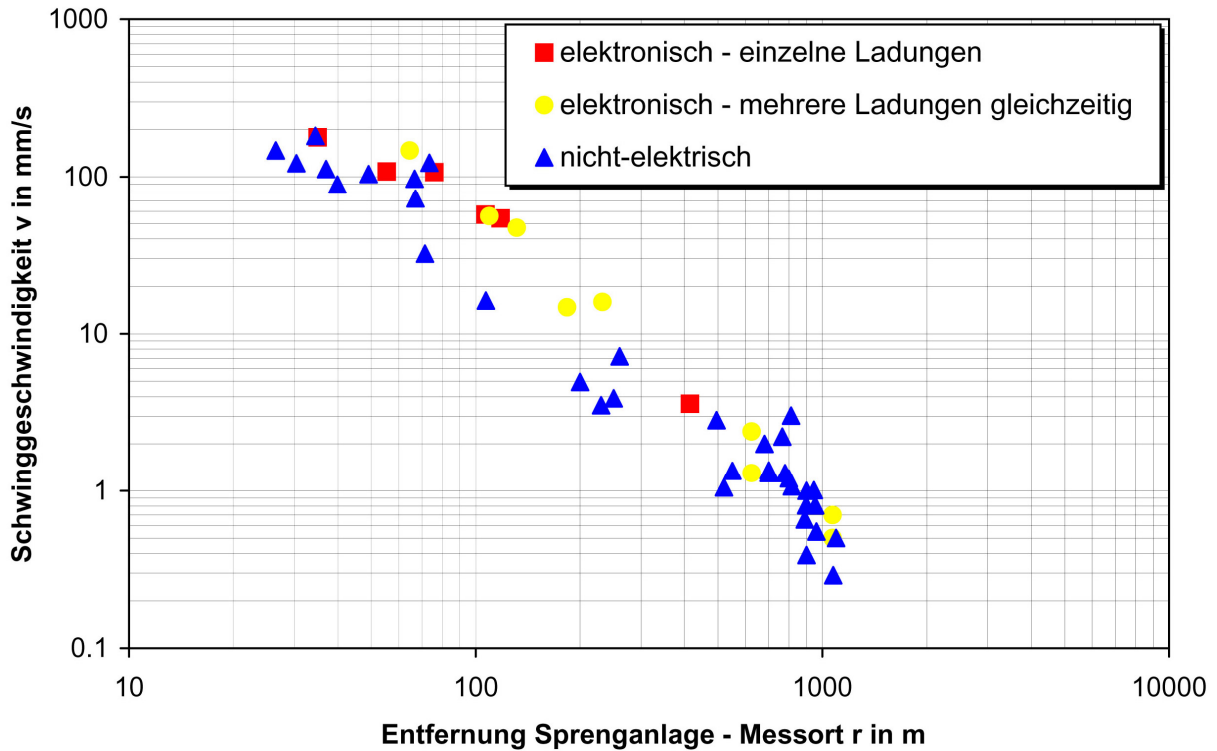


Bild 6.17: *ppv-r*-Diagramm von erzielten Schwingungsgeschwindigkeiten vergleichbarer Sprenganlagen in einem sehr schwer sprengbaren Rhyolith-Gebirge mit elektronischer und nichtelektrischer Zündung

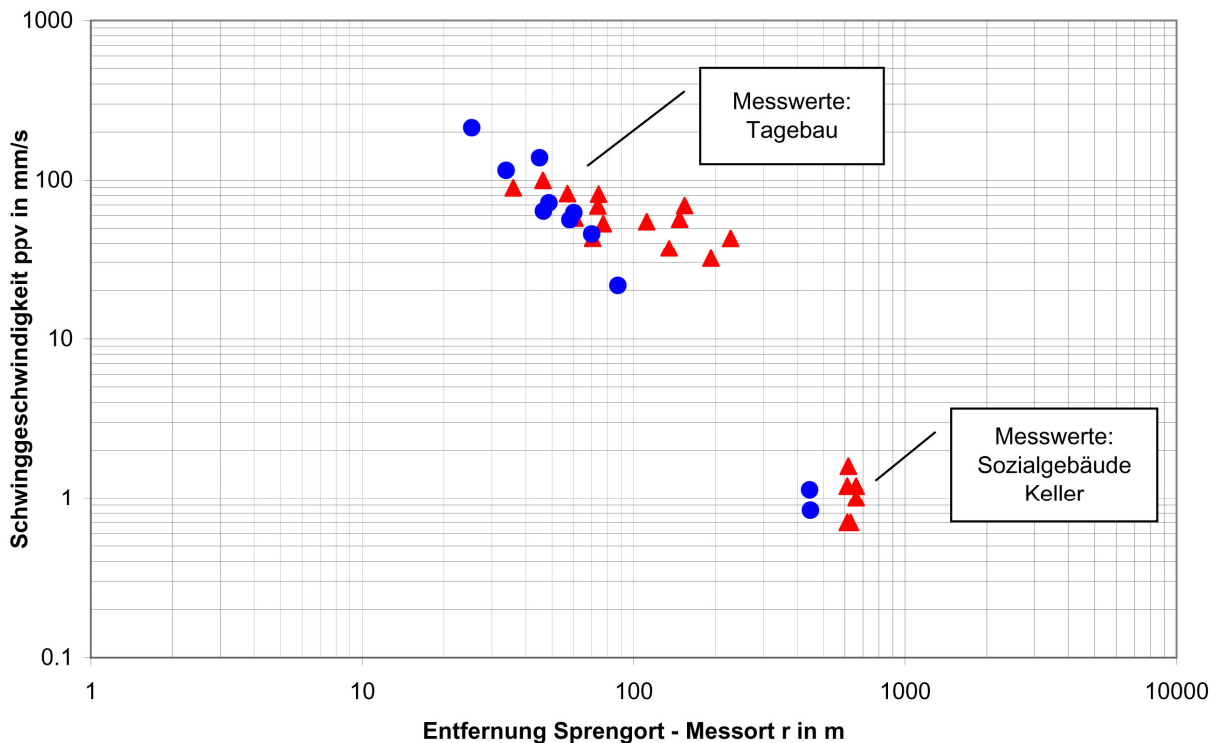


Bild 6.18: *ppv_{max}-r*-Diagramm von Erschütterungsmessungen vergleichbarer Sprenganlagen im sehr schwer sprengbaren Granodiorit-Gebirge mit elektronischer (Dreiecke) und nichtelektrischer (schwarze Kreise) Zündung

Die genauere Auswertung mittels Frequenzanalyse ergab, dass bei einer Verzögerungszeit von 46 ms zwischen den gezündeten Reihen die Eigenfrequenz des Festgebirges von 29 ... 30 Hz angeregt wurde. Das führte dazu, dass eine Resonanzerscheinung für einige ms auftrat, die einerseits die hohen Erschütterungen mit einer typischen Resonanzschwingung erzeugte und andererseits eine bis dahin nicht beobachtete, hohe Zertrümmerung des Sprengmediums bewirkte [MÜ 04b]. Das hohe Verzögerungsintervall von 46 ms löste offenbar die frequenten Anregungen aus, so dass empfohlen werden musste, die Verzögerungsintervalle von elektronischen Zündern sorgfältig dem jeweiligen Festgebirge anzupassen. Leider konnten die Versuche nicht fortgesetzt werden. Die interessanten Aussagen für eine bessere Zertrümmerung in Tagebauen ohne umgebende Bebauung wären Grund für einen neuen Forschungsansatz.

Außerhalb dieser Feststellung bleibt die Schlussfolgerung, dass die nach der Impulstheorie ausgelegte Zündfolge mit gleichzeitiger Zündung von Ladungen einer Reihe mit elektrischen, nichtelektrischen und elektronischen Zündern gleichermaßen möglich ist. Der Einsatz der elektronischen Zündung verspricht eine optimale Überlagerung der Stosswellen, wenn das Sprengmedium nicht im Bereich der Eigenfrequenz angeregt wird.

6.2 Sprengpraktische Schlussfolgerungen und umweltrelevante Auswirkungen

6.2.1 Energiesparende Verbesserung der Stückigkeit und des Abwurfes

Die wichtigste und grundlegende Voraussetzung für den erforderlichen bohr-, spreng- und zündtechnischen Aufwand ist die Erfassung der Festgebirgseigenschaften:

- Trennflächenabstände der Hauptklufscharen
- Raumstellung der Trennflächen
- gesteinsdynamische Eigenschaften (Bild 4.2)

und die Zuordnung in die Kategorie der Sprengbarkeit (Bild 4.3). Diesen naturgegebenen Eigenschaften muss je nach Sprengziel der sprengtechnische Aufwand untergeordnet werden (Bild 4.1). Im eigens erarbeiteten und aus den Ergebnissen abgeleiteten physikalischen Modell und der Beziehung (18) sind die bohr- und sprengtechnischen Parameter enthalten, die die Zertrümmerung des Festgebirges im überwiegenden Maße bewirken (Bild 4.7). Unabhängig und fundamental gelten folgende Zusammenhänge:

- Die Zertrümmerung erfolgt sukzessiv vom Größtkorn zum Feinkorn [HE 93, MÜ 74, MÜ 80, MÜ 88].
- Der Sprengenergiebedarf steigt mit zunehmenden Kluftabständen und höheren Anforderungen an ein kleinstückiges Haufwerk.
- Die kinetische Energie des ausbrechenden Haufwerkes nimmt mit gröberer Korngrößenzusammensetzung zu.
- Die Zerstörung des Sprengmediums nimmt von sub-, über trans- bis zur supersonsichen Wellenausbreitung zu

Der energieeinsparende Effekt bei der Schaffung einer besseren Stückigkeit bzw. Zertrümmerung liegt darin, dass man diese allein durch die Veränderung der Zündfolge nach den Prinzipien der Impulstheorie erreicht. Der Sprengstoffeinsatz bleibt konstant. Es muss so gewählt werden, dass mindestens eine trans-, besser supersonsiche Wellenausbreitung gewährleistet ist.

Der Nachweis dieser Aussage gelang mit der Untersuchung des Einflusses des wirksamen Detonationsdruckes (nach Beziehung (18) - Bilder 6.6 - 6.8). Durch die Veränderung der gezündeten Vorgaben, des Bohrlochabstandes sowie des Seitenverhältnisses in der Größe des wirksamen Detonationsdruckes leitet sich der höhere Wirkungsgrad einer Sprengung ab. Die Erhöhung des wirksamen Detonationsdruckes bewirkt gleichermaßen einen verbesserten Abwurf, der zudem in eine bestimmte weniger gefährdete Richtung im Tagebau gelenkt werden kann.

Das umweltfreundliche Vorgehen wird belegt durch die nahezu ausschließliche Verwendung von Emulsionssprengstoffen, die keine oder wenig toxische Schwaden bei der detonativen Sprengstoffumsetzung erzeugen – im Gegensatz zu gelatinösen Sprengstoffen. Die chemische Umwandlung der Sprengstoffgemische setzt sehr geringe Mengen an CO₂ frei [CO 96].

Die Detonationsgeschwindigkeiten der Sprengstoffe sollen möglichst zwischen den P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Festgesteine des Sprengmediums liegen, um eine mindestens transsonische Wellenausbreitung zu erzeugen.

Zur Kontrolle der optimalen energetischen Ausnutzung der eingesetzten Sprengstoffe, einer angepassten Geometrie und Zündfolge kann der wirksame Detonationsdruck der gesamten

Sprenganlage P_{zm} (19) mit dem Sprengvolumen V_{Sp} in Beziehung gesetzt werden (Bild 6.19). Aus dem Diagramm ist einfach ableitbar, dass die Punkte im linken, unteren Bereich sehr ungünstig angepasste und ungünstig dimensionierte Sprengungen darstellen. Je weiter die Größen nach rechts ansteigen, um so besser ist die zertrümmernde Wirkung und die energetische Ausnutzung. Zur Verifizierung und Präzisierung der Aussagen sollten weitere Daten ermittelt werden, die bei entsprechender statistischer Sicherheit zu genauen praktischen Schlussfolgerungen führen wird.

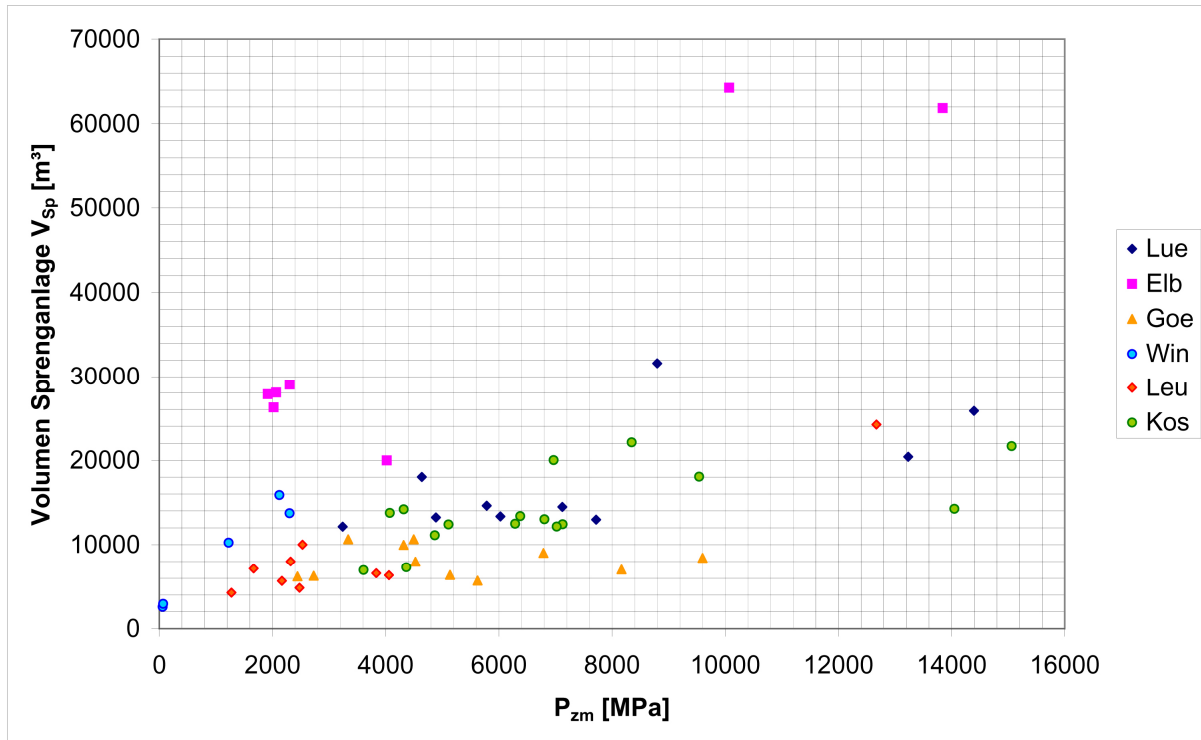


Bild 6.19: Beziehung zwischen dem wirksamen Detonationsdruck P_{zm} der gesamten Sprenganlage und dem Volumen der Sprengung V_{Sp}

6.2.2 Verbesserung der Zertrümmerung durch Erhöhung des Energieeintrages

Bei bekannter Klufthäufigkeit der Festgebirge und akustischen Impedanz der Festgesteine ist durch die Erhöhung des spezifischen Sprengstoffeinsatzes nach Bild 6.1 die Stückigkeit des gesprengten Haufwerkes zu verbessern. Mit dem verstärkten Einsatz von Sprengstoff muss der Laderaum vergrößert oder das Bohrlochraster zwangsläufig verkleinert werden.

Die Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers ist energiesparender gegenüber der Verkleinerung des Bohrlochrasters, welches mehr aufwendige Bohrmeter benötigt.

Aus diesem Grunde wird für eine umweltfreundlichere Sprengtechnik angeraten, bei der Erfordernis eines erhöhten Sprengstoffeinsatzes den Bohrlochdurchmesser vorzugsweise zu vergrößern. Eine derartige Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers hat zudem den Vorteil, dass man durch Erweiterung des Bohrlochrasters teure Bohrmeter und damit Dieselkraftstoff einsparen kann.

Im Tagebau Leukersdorf wurde dazu beispielsweise eine Sprengung am 24.09.2007 mit einem Bohrlochdurchmesser von 103 mm durchgeführt, ohne dass eine Einschränkung der Haufwerksqualität eingetreten war. Mit dieser Aktion konnte eine 47 %ige Einsparung von Bohrmeter zu Lasten eines größeren Bohrlochdurchmessers erreicht werden. Die Vergrößerung des Bohrlochrasters nach Empfehlung und den Ergebnissen der Untersuchungen im Tagebau Koschenberg führte zu einer Einsparung von dieselverbrauchenden Bohrmeter von 30 %, ohne die Haufwerksqualität einzuschränken. Diese Beispiele dokumentieren, dass mit derartig systematischen Untersuchungen eine optimale Anpassung der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik möglich ist. Die Zertrümmerung des Haufwerkes ist durch folgende Maßnahmen steuerbar:

- Verkleinerung der gezündeten Vorgabe
- Vergrößerung des Seitenverhältnisses
- Auslegen der Zündfolge nach der Impulstheorie
- Erhöhung des spezifischen Sprengstoffeinsatzes
- Einsatz von Sprengstoffen mit höheren Dichten und Detonationsgeschwindigkeiten
- 100 %iger Füllungsgrad
- optimale Anpassung des Bohrlochdurchmessers an das Bohrschema und den spezifischen Sprengstoffverbrauch
- Kontrolle des Sprengergebnisses mit dem wirksamen Detonationsdruck

7 Beeinflussung von Erschütterungen bei Gewinnungs- sprengungen

7.1 Bisheriges und das erarbeitete Modell zur Erschütterungsbeurteilung

7.1.1 Stand der Technik zur Erschütterungsbewertung

Bei der Durchführung von Sprengarbeiten treten zwangsläufig im Umfeld Erschütterungen als unerwünschte Nebenwirkung auf. Diese dynamischen Einwirkungen werden durch Messungen der Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit oder des Schwingweges seit Jahren erfasst. Für das Sprengwesen hat sich infolge des Frequenzbereiches von 1 - 315 Hz die Messung der Schwinggeschwindigkeit mit der dazugehörigen Frequenz als Ersatzgröße für Erschütterungen durchgesetzt. Dazu wurden weltweit hochwertige Messgeräte mit moderner Auswertesoftware entwickelt und eingesetzt. Inzwischen werden zur genaueren Erfassung der direkten Größe des Dehnungs-Stauchungszustandes bei Erschütterungseinwirkung dynamische Dehnungssensoren auf Faser-BRAGG-Gitter-Basis angeboten (Kapitel 3.8). Während sich die Messtechnik deutlich verbessert hat, wird die Erfassung, Bewertung, Prognose und Interpretation der Erschütterungsmessungen recht unterschiedlich und mit unbefriedigenden Aussagen vorgenommen. Es gibt weltweit keine einheitliche Auffassung zu Anhalts- oder Grenzwerten für die vielfältigen Bauwerke sowie vergleichbare Normen. Zum anderen werden in der Fachliteratur verschiedene Verfahren und Modelle zwecks Ermittlung von Lademengen-Abstands-Beziehungen vorgestellt, mit denen die Aussage- und Prognosegenauigkeit für Erschütterungen erhöht werden soll. Einige, verbreitet angewandte Vorgehensweisen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens kritisch hinsichtlich ihrer

- Messfehler
- Modellbildung
- statistische Sicherheit und
- Aussagegenauigkeit

untersucht. Die systematisch durchgeführten Schwinggeschwindigkeitsmessungen und langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Bodendynamik führten zu der Erkenntnis, dass die am Immissionsort ankommende bzw. angeregte Schwinggeschwindigkeit und Frequenz durch die Untergrundverhältnisse am Standort des Geophones beeinflusst wird. Zu dieser Problematik wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein gleicher dynamischer Impuls auf den Untergrund ausgelöst wurde. An den Messpunkten konnte die vorhandene akustische Impedanz des jeweiligen Locker- oder Festgesteines ermittelt und die erzeugte Schwinggeschwindigkeit mit einem Geophon erfasst werden. Die Messreihe ergab eine

deutliche Abhängigkeit der durch den gleichen Impuls erzwungenen Schwinggeschwindigkeit von der akustischen Impedanz [BA 00a]. Mit steigender akustischer Impedanz des Untergrundes nimmt die durch die gleichen dynamischen Impulse ausgelöste Schwinggeschwindigkeit ab. Die Ergebnisse stimmen mit der aus der Wellenmechanik bekannten Beziehung [RO 01] überein:

$$\sigma = ppv \cdot c_p \cdot \rho_G \quad \left[\frac{kg}{ms^2} \right] \quad (21)$$

Das bedeutet für die praktischen messtechnischen Bedingungen, wenn der Unter- oder Baugrund eines Gebäudes eine sehr geringe akustische Impedanz hat und beispielsweise aus einem bindigen, steifen Boden besteht, kann die Schwinggeschwindigkeit um das 2 bis 3-fache höher liegen, als bei einem felsigen Untergrund. Verallgemeinert kann man daraus schlussfolgern, dass die Erschütterungsempfindlichkeit des Untergrundes von der akustischen Impedanz abhängt. Aus diesem Grunde wurde die Erschütterungsempfindlichkeit des Gebirges als zusätzliches Merkmal für die Sprengbarkeit von Festgebirgen eingeführt (Bild 4.3). Streuungen von Messwerten der Schwinggeschwindigkeit können somit von den Untergründen der Messpunkte beeinflusst sein. Eine weit verbreitete Verfahrensweise bei Erschütterungsmessungen mit Geophonen sind Freifeldmessungen. Die Beurteilung der Ergebnisse verschiedener Messreihen zeigen immer wieder den Effekt, dass Freifeldmessungen gegenüber denen auf festen Untergründen eines Fundamentes oder Kellerfußbodens in Gebäuden stets höhere Werte bei gleicher Entfernung zum Sprengort aufweisen.

In einigen Ländern ist es vorgeschrieben, die Geophone am Messort durch Befestigung besser mit dem Untergrund zu koppeln. Zur Klärung des Einflusses der Art und Weise des Aufstellens wurden Versuche durchgeführt. Die Tabelle 7.1 enthält die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten bei konstantem dynamischen Impuls mit und ohne Stabilisierung.

Tabelle 7.1: Ermittlung des Einflusses der Stabilisierung des Geophons am gleichen Messort bei gleichen dynamischen Impuls [MÜ 07c]

| Impuls in Richtung | Geophon in üblicher Weise auf drei spitze Füßchen gestellt (1) | Geophon mit 5 kg belastet (2) | Fehler bzw. Verringerung des Messwertes (2) : (1) % |
|--------------------|--|-------------------------------|---|
| | (Schwinggeschwindigkeit mm/s) | | |
| x | 0,513 | 0,230 | 55,17 |
| y | 0,195 | 0,151 | 22,56 |
| z | 0,147 | 0,118 | 19,73 |

Die Ergebnisse zeigen die bemerkenswerte Tendenz, dass eine Stabilisierung des Geophons durch zusätzliche Gewichte oder eine feste Kopplung am Messpunkt genauere Messwerte erbringt. Kleine und leichte Geophone auf 3 bis 4 Beinchen verfälschen den

Messwert durch Bewegungen. Es wird empfohlen, die Geophone nach diesen Prinzipien schwerer zu konfigurieren oder mit dem schwingenden Untergrund optimal zu koppeln. Bei den Messungen wurden die Geophone mit Steinen oder Gewichten beschwert, um den Messfehler möglichst klein zu halten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass folgende Einflüsse zu erheblichen Abweichungen der erwarteten Schwinggeschwindigkeiten an einem oder mehreren Messorten führen können:

- die Untergrundverhältnisse,
- die Kopplung der Geophone mit dem Untergrund,
- die genauen Ausrichtungen der x, y und z-Komponente,
- die anisotropen und inhomogenen Ausbreitungsverhältnisse um die Sprenganlage und
- deren Zündfolge.

Diese Randbedingungen gilt es, bei künftigen Messungen zu beachten und sollten als helfende Hinweise in die DIN 4150 eingebracht werden.

Die erste im deutschsprachigen Raum anerkannte empirische Beziehung zur Bewertung von Sprengerschütterungen wurde 1958 durch KOCH auf der Grundlage von systematischen Messungen der Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit von der gezündeten Lademenge und der Entfernung des Geophonstandortes zum Sprengort aufgestellt [KO 58]:

$$ppv = a \cdot L_z^b \cdot r^{-c} \quad \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (22)$$

Die grundlegenden Erkenntnisse von KOCH, dass die Lademenge und der Abstand r einen wesentlichen Einfluss auf die Erschütterungen haben sind bis heute unbestritten und gelten als fundamentale Aussage.

Von zahlreichen Autoren wurden diese Einflussgrößen

- Entfernung r (Sprengort - Messpunkt) und
- Lademenge pro Zündzeitstufe (L_z)

genutzt, weiter bewertet und beispielsweise zu folgenden Lademengen-Abstands- oder vergleichbaren Beziehungen entwickelt [BL 99, BL 06, BÖ 82, DI 1/97, D 3/99, DO 80, HE 93, HN 87, HOP 98, KI 03, LÜ 06, MOS 76, PE 94, SI 00, SP 06, TH 78, WI 06]:

$$ppv = 206 \cdot L_z^{0,8} \cdot r^{-1,3} \text{ für kristalline Festgesteine} \quad (23)$$

$$ppv = 897 \cdot L_z^{0,68} \cdot r^{-1,51} \text{ für silikatische Festgesteine, allg.} \quad (24)$$

$$ppv = 969 \cdot L_z^{0,6} \cdot r^{-1,5} \text{ für sedimentäre Festgesteine} \quad (25)$$

$$ppv = 16 \frac{\sqrt{0,01 \cdot L_z}}{(0,01 \cdot r)^{1,4786 + 0,1314 \cdot \lg(0,01 \cdot r)}} \quad (26)$$

$$ppv = 4273 \cdot L_z \cdot r^{-n} \quad (27)$$

$$ppv = 900 \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{L_z}} \right)^{-1,6} \quad (28)$$

$$ppv = \frac{r}{\sqrt{L_z}} \quad (29)$$

$$ppv = 182 \left(r / L_z^{0,5} \right)^{-1,82} \quad (30)$$

$$ppv = 187 \left(r / L_z^{0,5} \right)^{-1,18} \quad (31)$$

$$ppv = 4273 D_s^{-2,08} \quad D_s = \sqrt{\frac{ft}{lb}} \quad (32)$$

Im Gegensatz zu den vorgenannten Lademengen-Abstandsbeziehungen hat BLAIR versucht, mit einer Monte Carlo - Schätzung eine Erschütterungsprognose zu erarbeiten [BL 99]. Neuerdings werden numerische Verfahren auf der Grundlage von empirischen, vereinfachten Beziehungen der Simulation von Sprengungen durchgeführt, die wenig den wirklichen Bedingungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung entsprechen [KL 03].

Die ausgewählten, meist durch statistische Untersuchungen belegten Lademengen-Abstands- oder skalierte Entfernungsbeziehungen gehen auf die Modellvorstellung von KOCH zurück, dass die Schwinggeschwindigkeit mit der ansteigenden Ladmenge pro Zündzeitstufe und der Verringerung der Entfernung zunimmt. Von den Einflussfaktoren L_z

und r zeigt die Entfernung vom Sprengort zum Messort den maßgeblichsten Einfluss auf die Erschütterungen.

Die Lademenge pro Zündzeitstufe L_z weist dagegen keinen statistisch gesicherten und nachweisbaren Zusammenhang zur Schwinggeschwindigkeit auf [FL 06, MÜ 07c]. Die \pm einheitlichen Abhängigkeiten und die ähnlichen Berechnungsergebnisse der Schwinggeschwindigkeit mit den Prognose-Beziehungen (23) bis (32) sind auf den stets vorherrschenden Einfluss der Größe r zurückzuführen.

Die Anwendung der verschiedenen Prognoseformeln erfolgt teilweise recht unkritisch und ohne Einbeziehung der angewandten Bohr-, Spreng- und Zündtechnik, der Eigenschaften des Sprengstoffes, der geomechanischen Gegebenheiten des Untergrundes, der Kopplung der Geophone am Messort, eines breit streuenden Entfernungswertes der Geophone zum Sprengort und/oder anderer Messgrößen wie die der Dehnungs-Stauchungszustände am Messpunkt.

Die ausgewählten Prognosebeziehungen zur Bewertung und Ermittlung der Schwinggeschwindigkeit (23) bis (32) wurden durch neueste statistische Untersuchungen miteinander hinsichtlich ihrer gesicherten Aussage und Genauigkeit der Vorausberechnung verglichen. Zur Gewährleistung eines objektiven Vergleiches wurden einheitliche Eingangswerte und Messergebnisse aus einem Basalt-Tagebau mit einem schwer sprengbaren und dem Metagrauwacke-Tagebau Koschenberg mit mittelschweren sprengbaren Festgebirge ausgewählt. Die nichtlinearen Beziehungen erforderten eine angepasste statistische Regressions- und Mehrfachkorrelationsanalyse. In der Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse der statistischen Bewertung nach den Beziehungen (23), (24), (26), (28), (29), (30), (31) und den neu erarbeiteten Impuls- bzw. Energie-Abstandsbeziehungen (9) und (12) aufgeführt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass in den meisten Fällen der Lademengen-Abstandsbeziehungen keine statistische Sicherheit gewährleistet ist. Als Ausnahme gelten die Beziehungen (23), (24) und (25), die in je einem Tagebau eine durchaus gültige Bewertungsgrundlage für die Erschütterungen darstellen. Derartige Berechnungsansätze müssen allerdings universell für den Gültigkeitsbereich anwendbar sein.

Tabelle 7.2: Korrelationskoeffizienten zur Beurteilung und zum Vergleich von ausgewählten Erschütterungsprognosebeziehungen (rot umrandet = statistisch gesichert)

| Beziehung | statistische Bewertung | |
|--------------|--|--|
| | Basalt-Tagebau – Korrelationskoeffizient R ² (geringe Messwertanzahl) | Metagrauwacke-Tagebau - Korrelationskoeffizient R ² (hohe Messwertanzahl) |
| (23) | 0,824 | 0,695 |
| (24) | 0,826 | 0,686 |
| (26) | 0,535 | 0,811 |
| (28) | 0,759 | 0,624 |
| (29) | 0,501 | 0,141 |
| (30) | 0,508 | 0,621 |
| (31) | 0,663 | 0,680 |
| (9) Impuls | 0,846 | 0,985 |
| (12) Energie | 0,851 | 0,987 |

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die angebotenen, empirischen Lademengen-Abstandsbeziehungen keine ausreichend gesicherte und genaue Prognose ermöglichen.

Es ist damit für eine umweltfreundliche Sprengtechnik unerlässlich, die Erschütterungsprognose und -beeinflussung auf ein gesichertes, aussagefähiges Modell zu bringen. Die bereits eingebrachten neuen Beziehungen (9) und (12) ergeben im Vergleich zu den anderen Berechnungsansätzen eine ausreichende statistische Sicherheit für beide Messwertgruppen (Tabelle 7.2).

7.1.2 Neues Modell zur Erschütterungsprognose

Die bisherige Vorgehensweise aller Prognosen sollten aus nachstehenden Gründen einer sorgfältigen und kritischen Betrachtung unterzogen werden:

- Die Erschütterungsprognosen sind meist durch statistische Untersuchungen von Messergebnissen erarbeitet worden. Die darin enthaltenen Faktoren bzw. Exponenten gelten für bestimmte Messobjekte, Untergründe, Festgebirge usw., und können nicht verallgemeinert auf alle anderen, ähnlichen Bereiche übertragen werden.
- Die Allgemeingültigkeit der in der Fachliteratur vorhandenen Prognosebeziehungen für die gleichen Gesteine oder alle Festgebirge ist fragwürdig und infolge der

vielfältigen Einflussfaktoren streng genommen statistisch und physikalisch unzulässig.

- Der empirische Charakter der Lademengen-Abstandsbeziehungen muss einer kritischen Prüfung unterzogen werden (Tabelle 7.2).
- Die Gewinnung in den Tagebauen oder die Vorgehensweise auf den Felsbaustellen ist durch die behördliche Festlegung einer Lademenge pro Zündzeitstufe eingeschränkt und kann zur Aufgabe eines Betriebes aus wirtschaftlichen oder erschütterungsbedingten Gründen führen.
- Die Eigenschaften der eingesetzten Sprengstoffe gehen nicht in die Bewertung der Erschütterungsimmissionen ein, obwohl signifikante Unterschiede ihrer Wirkungen bestehen (Bild 4.8).

Aus dem verallgemeinerten Modell einer Gewinnungssprengung nach Bild 7.1 können die Wirkungszonen und die wichtigsten Vorgänge um eine gezündete Sprengung zugeordnet werden. Die Erschütterungszone wird in einen Nah- und Fernbereich untergliedert, die, wie sich später herausstellen wird, künftig um jede Sprengstelle definiert werden sollten [BA 00a].

Zur Entwicklung eines neuen, physikalisch ausgewogenen Modells der Erschütterungsprognose musste im unmittelbaren Nahbereich am Emissionsort direkt hinter dem Bohrloch der in das stehen bleibende Festgebirge abgegebene Kraftstoß von einzelnen oder gemeinsam gezündeten Ladungen einer Sprenganlage ermittelt werden. Im Bild 7.2 ist das Ergebnis einer Messung 0,8 m hinter einer detonierenden Ladung der Zeitstufe 22 mit dem dynamischen Dehnungssensor auf Faser-BRAGG-Gitter-Basis dokumentiert [MÜ 01b]. Aus der Kurve der dynamischen Dehnungen im Verlauf der Zündfolge ist zu entnehmen, dass jede Bohrlochladung bzw. Zeitstufe einen Kraftstoß in das Gebirge entsendet (Bild 7.2). Bei der Sprengung wurden jeweils drei Ladungen in einer Zeitstufe gezündet und dennoch nur je ein Peak der Dehnung pro „Ladung“ bzw. „Impuls“ erfasst.

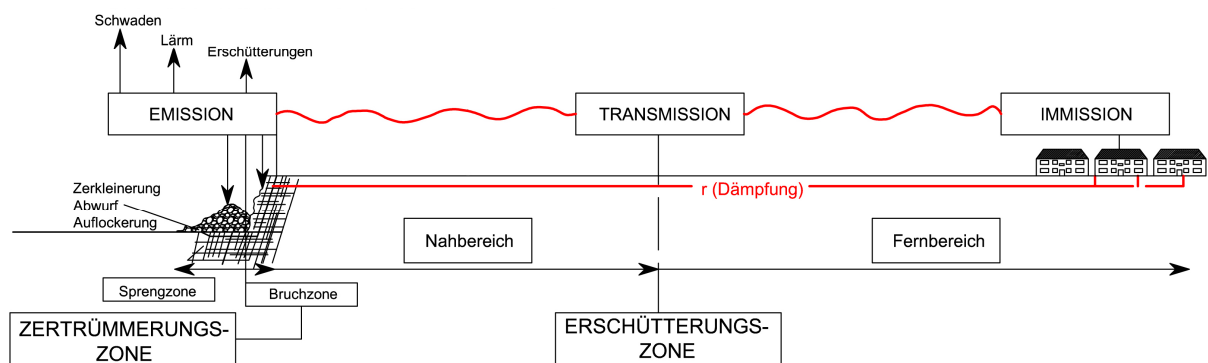


Bild 7.1: Modell einer Gewinnungssprengung mit den Wirkungszonen und den wichtigsten Vorgängen

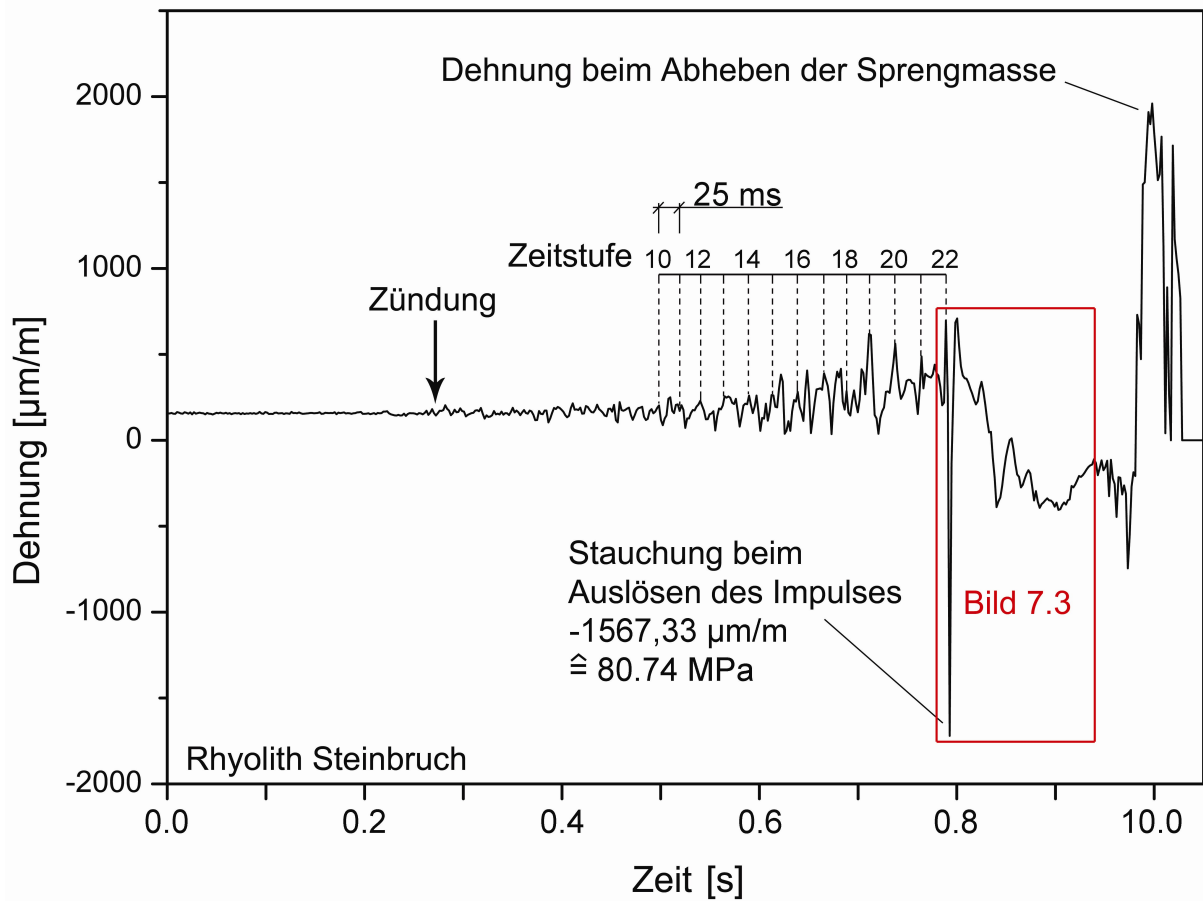


Bild 7.2: Dehnungs-Stauchungskurve - gemessen 0,8 m hinter einer detonierenden Bohrlochladung in einem Rhyolith-Tagebau [MÜ 01b]

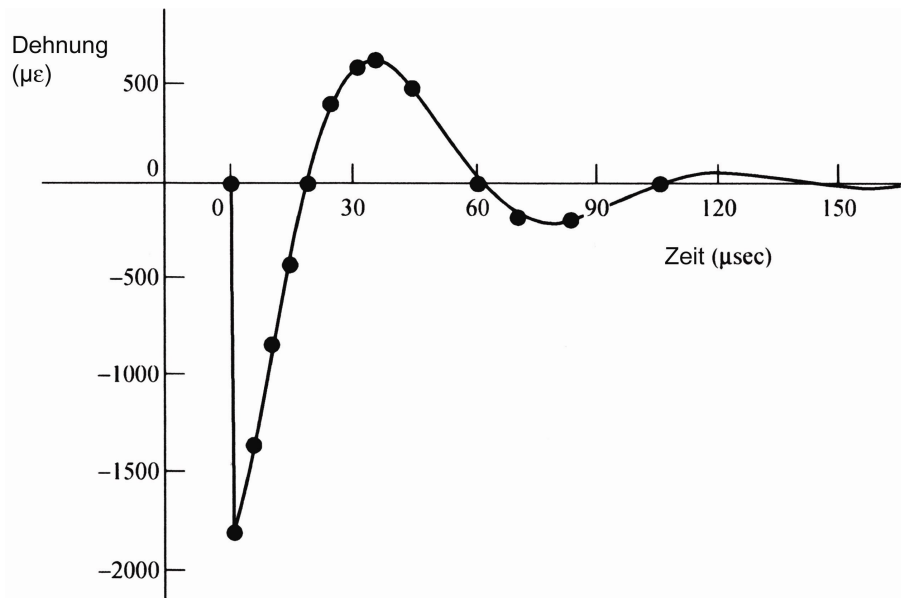


Bild 7.3: Darstellung der rechnerisch ermittelten Dehnung gegen die Zeit hinter einer detonierenden Ladung für einen Radius von 0,8046 m [HU 99]

Es konnte in allen Versuchsbetrieben nachgewiesen werden, dass bei entsprechender Zündfolge nur die maximale Ladung eines Bohrloches die Sprengerschütterungen je Peak beeinflusst und nicht die Lademenge der Zündzeitstufen mit der doppelten bis zügfachen Masse Sprengstoff [u.a. MÜ 07c].

Der gemessene Kurvenverlauf in Bild 7.2 stimmt phänomenologisch gut mit der von HUSTRULID [HU 99] dargestellten Berechnung der „Dehnungswellenenergie“ überein (Bild 7.3). Die Dehnungswellenenergie wird nach Beziehung

$$E_{SWE} = 2\pi R^2 \sigma_G \cdot c_p^3 \int_0^t \varepsilon^2 \cdot dt \quad \left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (33)$$

berechnet. Aufwendige Nachberechnungen haben ergeben, dass mit dieser Beziehung (33) die Dehnungszustände für bestimmte Entfernungen ermittelt werden können. Die Gültigkeit der Beziehung gestattet es, die Energiegröße E_{SWE} bei Kenntnis der Eingangsparameter abzuschätzen und durch die Dehnungsmessungen messtechnisch nachzuweisen. Im Rahmen der Forschung wurden aus Kostengründen nur zwei Messungen im direkten Nahbereich durchgeführt, weil in der Regel der Sensor kurz nach der Messwerterfassung zerstört wird. Die Eingangsparameter für derartige Berechnungen sind in den Tabellen 5.1 bis 5.6 enthalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass man mit dem Dehnungssensor auf Faser-BRAGG-Gitter-Basis in der Lage ist, die dynamischen Dehnungen vom Emissionsort systematisch bis in einen ferneren Immissionsort genau zu erfassen. Das Messsystem ist somit in der Lage jeden durch die Erschütterungen beeinflussten Ort zu überwachen. Auf diese Weise ist eine objektive Beurteilung der Erschütterungsimmissionen um deren Quelle gewährleistet.

Zur Erfassung der Erschütterungen wurden die beschriebenen Schwinggeschwindigkeits- und Dehnungsmessungen durchgeführt. Zwischen der dynamischen Dehnung ε_{dyn} und der Schwinggeschwindigkeit ppv gibt es über die Gleichungen (21), (34) und (35) eine lineare Abhängigkeit. Auf diese Weise ist die Messung der dynamischen Dehnung als direkte Größe für die Erschütterungen objektiv günstiger, weil dieser Wert physikalisch besser interpretierbar ist:

$$\sigma = ppv \cdot c_p \cdot \rho_G \quad \left[\frac{kg}{ms^2} \right] \quad (21)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (34)$$

Aus (21) und (34) ergibt sich

$$ppv \approx \varepsilon \quad (35)$$

Wegen dieses Zusammenhanges kann man die Erschütterungsbeziehungen auf entsprechender Datengrundlage jeweils für die Schwinggeschwindigkeit und die Dehnung erarbeiten. Aus dem hinter dem Bohrloch gemessenen Dehnung ε und dem dynamischen E-Modul E ist mit der Beziehung (34) die tatsächlich erzeugte Spannung ableitbar (vergleiche Bild 7.2). Nach den im Rahmen der Forschungsarbeiten verbesserten Modellvorstellungen wurden die Energie-Abstandsbeziehungen entwickelt (12) und (13), die physikalisch besser in den Rahmen des Gesamtmodells eingefügt werden kann (Bild 4.7). Die Anwendung der bereits erwähnten Modelle (Bild 4.7) der Impuls-Abstands- und Energie-Abstandsbeziehung für die Schwinggeschwindigkeit und Dehnung erfordert je nach statistischer Sicherheit Gültigkeitsgrenzen zu setzen:

- entsprechend der gemessenen Genauigkeit und Streuung der Eingrößen $W_B, c_d, r^{\pm 20\%}$
- Zündfolge nach der Impulstheorie gezündet
- Verwendung eines \pm ähnlichen Sprengstoffgemisches [MÜ 03c].

Tabelle 7.3: Ergebnisse ausgewählter Korrelationskoeffizienten von statistischen Berechnungen verschiedener Einflussparameter der Erschütterungen [erweitert nach MÜ 07c]

| Nr. | statistische Untersuchung $ppv_{max} \Rightarrow$ $\varepsilon_{max} \Rightarrow$ | Korrelationskoeffizient R^2 (für ppv_{max} und ε_{max} gültig) | Bemerkungen zum Einfluss auf die Erschütterungen |
|-----|---|--|--|
| 1 | r | $\geq 0,7$ | größter Einfluss auf die Erschütterungen |
| 2 | $L_Z \cdot r^n$ | $\leq 0,55$ | die Lademenge pro Zündzeitstufe ist als Einflussfaktor ungeeignet |
| 3 | $W_B \cdot r^n$ | $\geq 0,7$ | die Lademenge eines Bohrloches verändert die Korrelation von Nr. 1 nicht bzw. geringfügig |
| 4 | $W_B \cdot c_d \cdot r^n$ | $> 0,75 \dots 0,99$ | $(W_B \cdot c_d)$ = verbessert die Korrelation als statistisch gesichert |
| 5 | $V_{SB} = \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) r^{-n}$ | $> 0,75 \dots 0,99$ | verbessert die Korrelation als statistisch gesichert und ist physikalisch objektiv wirksam |

Auf der Grundlage der vorgenannten physikalischen Zusammenhänge, der Anwendung der Impulstheorie und der energetischen Interpretation der detonativen Sprengstoffumsetzung wurden die in Tabelle 7.3 aufgeführten Regressionsanalysen durchgeführt. Diese statistischen Untersuchungen bezogen sich auf die Beeinflussung der Schwinggeschwindigkeit und dynamischen Dehnung zu verschiedenen Größen und wurden nach den neuesten Verfahren durchgeführt [LOZ 07].

Die Beziehungen (9), (10), (12), (13) eignen sich optimal für die statistisch gesicherte Bewertung von Sprengerschütterungsimmissionen. Infolge der möglichen rechnerischen Abschätzung der im Nahbereich der detonierenden Ladung in das Festgebirge induzierten Dehnung (Bild 7.2) ist die Erschütterungsbewertung mit Dehnungsmessungen vom Emissionsort bis zum Messpunkt objektiv realisierbar und physikalisch deutbar. Umgekehrt ist es durch die gefundenen Zusammenhänge möglich, von einer statistisch gesicherten Dehnungs-Energie-Abstandsbeziehung auf die am Sprengort ausgelöste dynamische Dehnung zu schließen.

7.2 Ergebnisse der Untersuchungen zu den Erschütterungsimmissionen

7.2.1 Impuls-Abstandsbeziehungen

Alle verfügbaren Schwinggeschwindigkeits- und Dehnungsmessungen wurden mit den neuen Beziehungen für jeden Tagebau gesondert ausgewertet. Im ersten Schritt wurden die Schwinggeschwindigkeits-Entfernungs-Diagramme erstellt (Bilder 7.4 bis 7.11). Durch die verschiedenen Situationen im Bereich der Nordwand gegenüber der Tiefsohle im Tagebau Koschenberg wurden jeweils getrennte Auswertungen vorgenommen (Bilder 7.7 bis 7.8).

Tabelle 7.4: Statistische Ergebnisse der Auswertung der Schwinggeschwindigkeitsmessungen zur Entfernung Sprengort - Messstelle

| Tagebau | erfasster Entfernungsbereich | Korrelationskoeffizient ppv/r^n | Exponent von r |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Elbingerode | 28 - 800 m | 0,8967 | -1,4306 |
| Görsdorf | 27 - 550 m | 0,8656 | -1,4237 |
| Koschenberg - gesamt - | 23 - \geq 1000 m | 0,809 | -1,5277 |
| Koschenberg - Nordwand - | 23 - 620 m | 0,8198 | 1,5163 |
| Koschenberg - Tiefsohle - | 46 - \geq 1000 m | 0,8625 | -1,4095 |
| Leukersdorf | 43 - 900 m | 0,8769 | -1,7173 |
| Lüptitz | 28 - 600 m | 0,9431 | -6809 |
| Winterberg | 26 - 720 m | 0,9319 | -1,7048 |

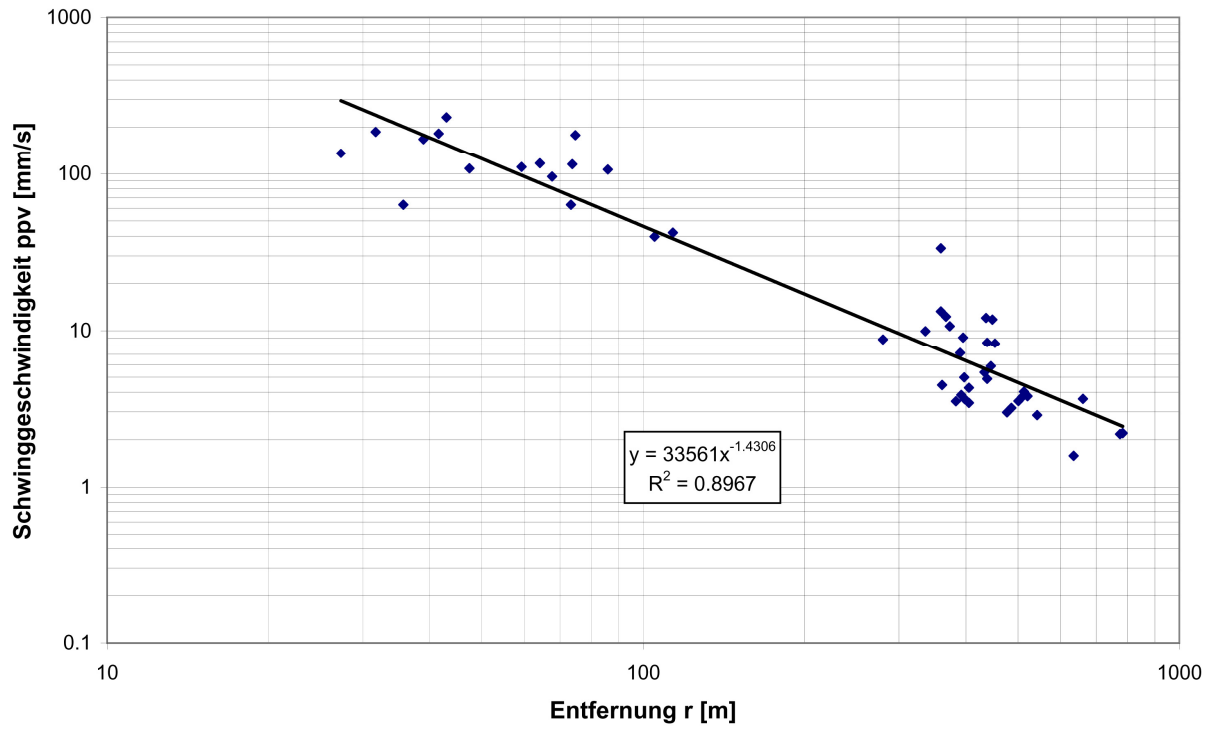


Bild 7.4: ppv-r-Diagramm Tagebau Elbingerode

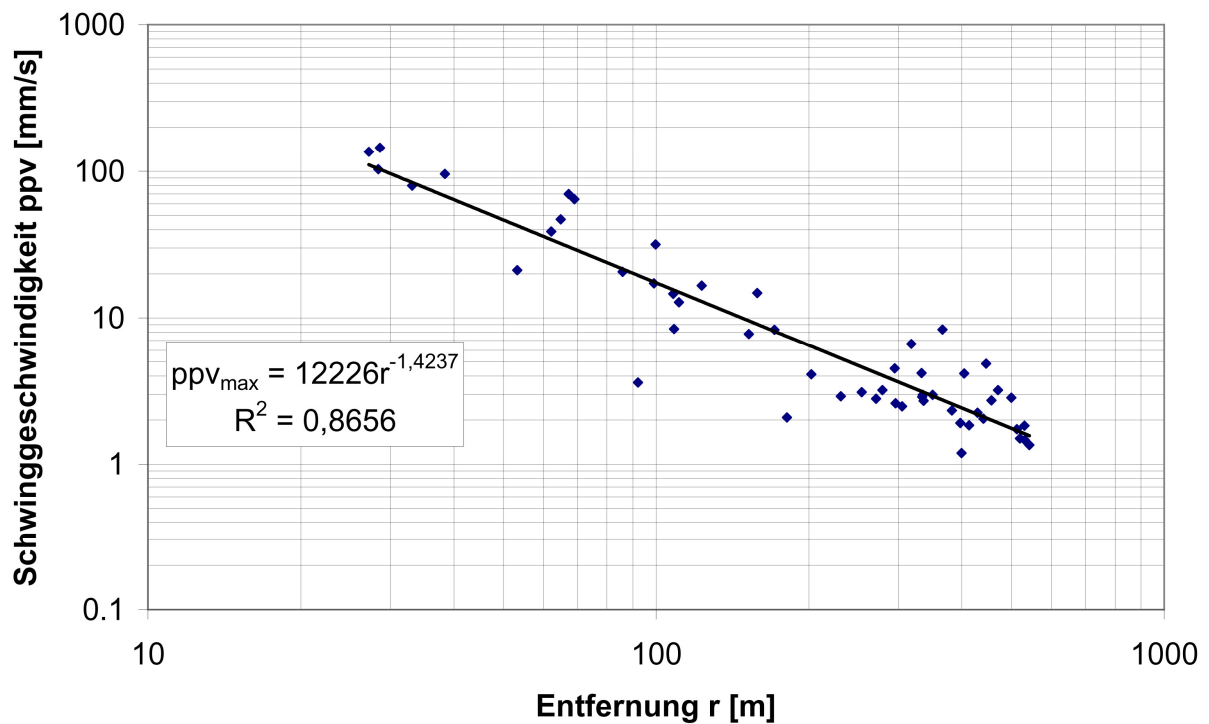


Bild 7.5: ppv-r-Diagramm Tagebau Görzdorf

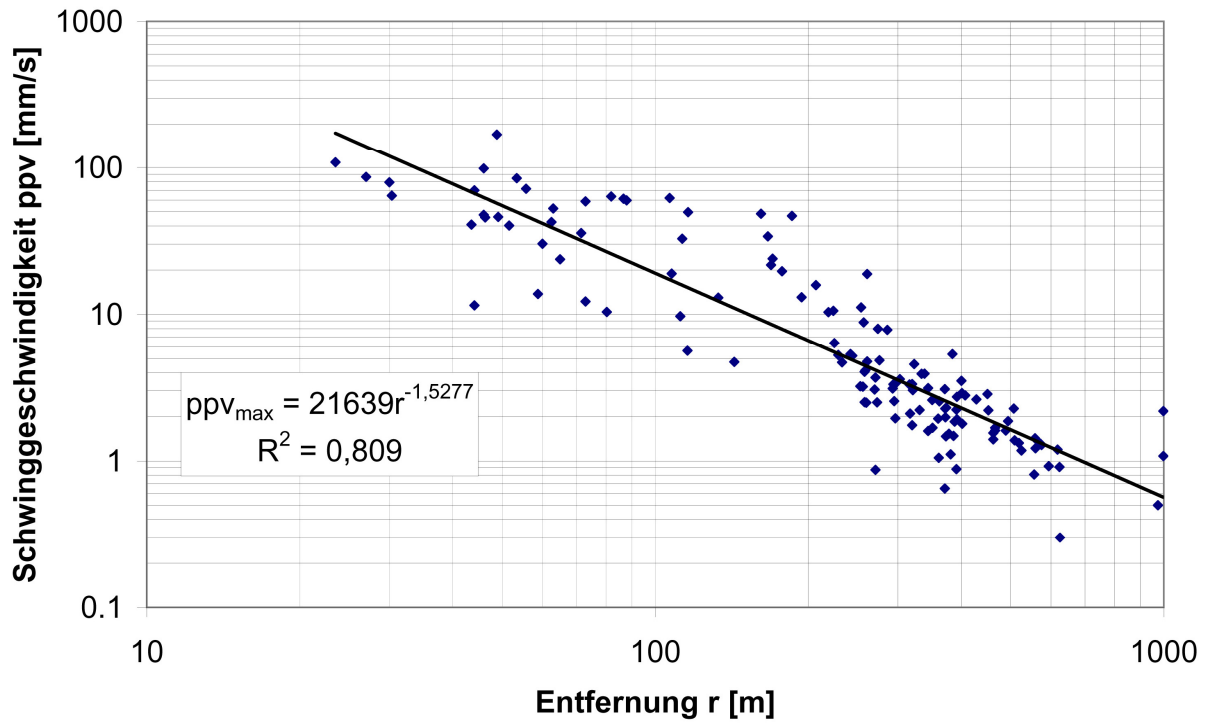


Bild 7.6: *ppv-r*-Diagramm Tagebau Koschenberg – gesamt –

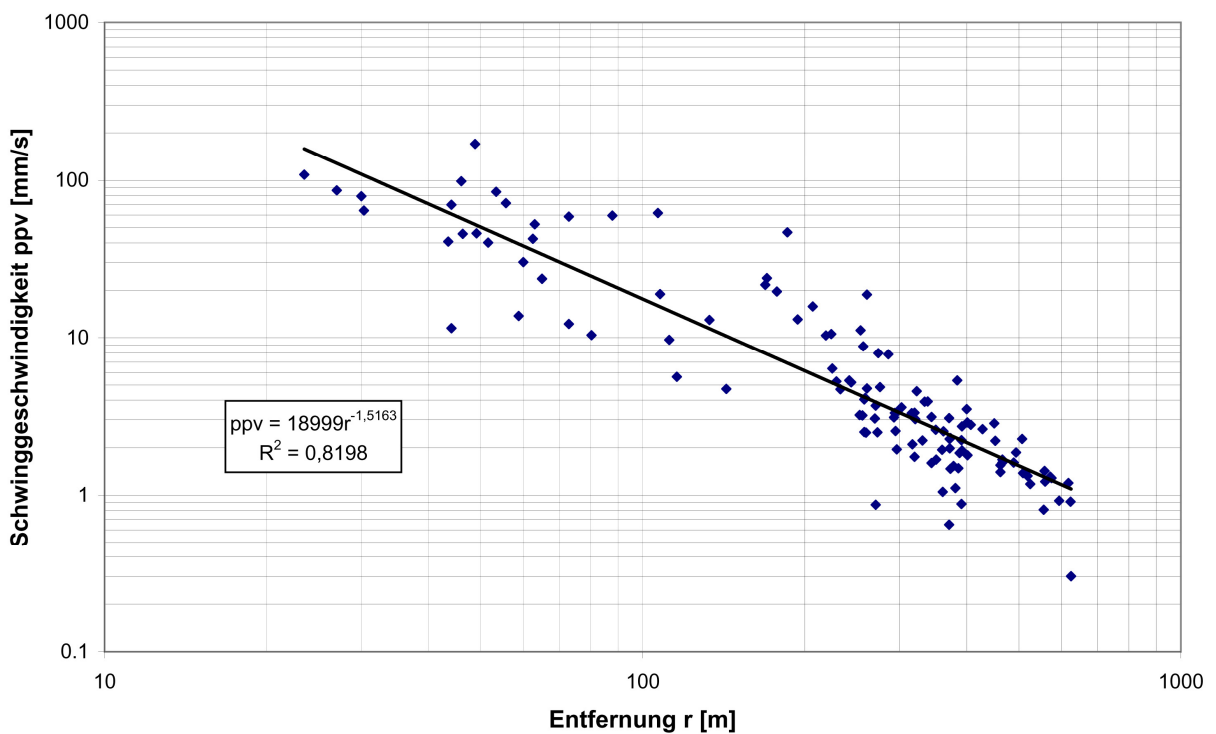


Bild 7.7: *ppv-r*-Diagramm Tagebau Koschenberg - Nordwand

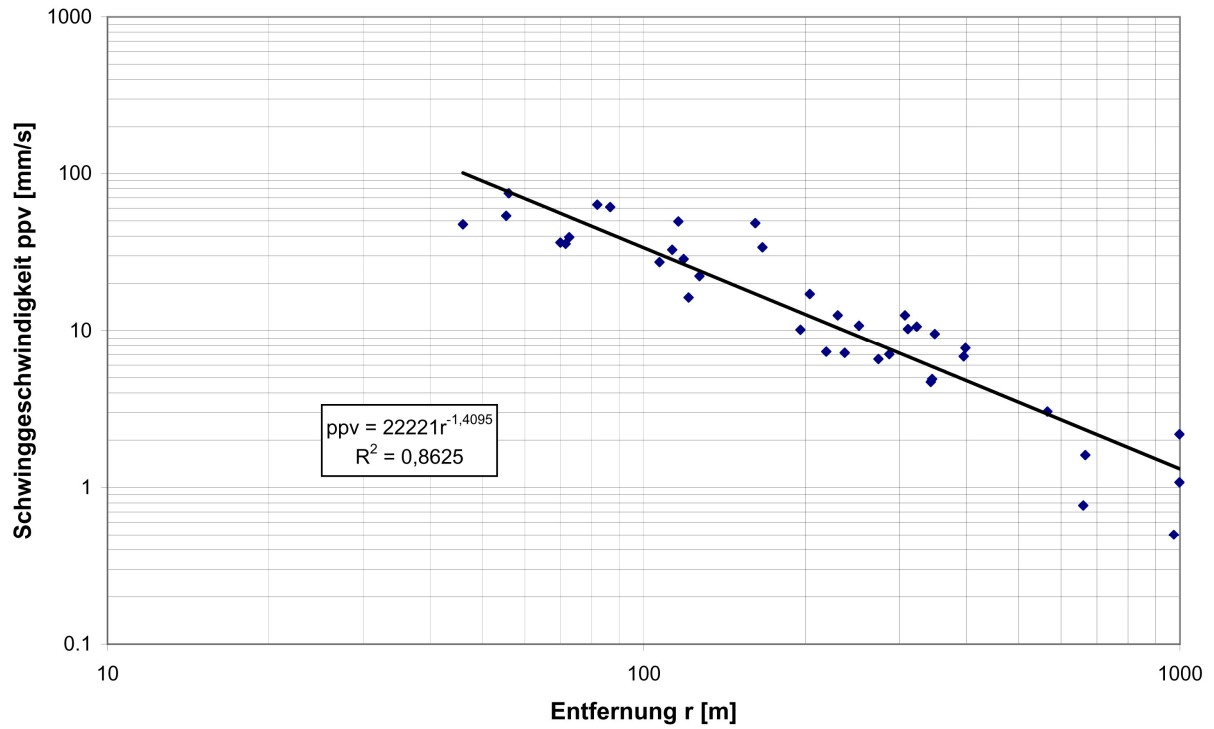


Bild 7.8: *ppv-r*-Diagramm Tagebau Koschenberg - Tiefsohle

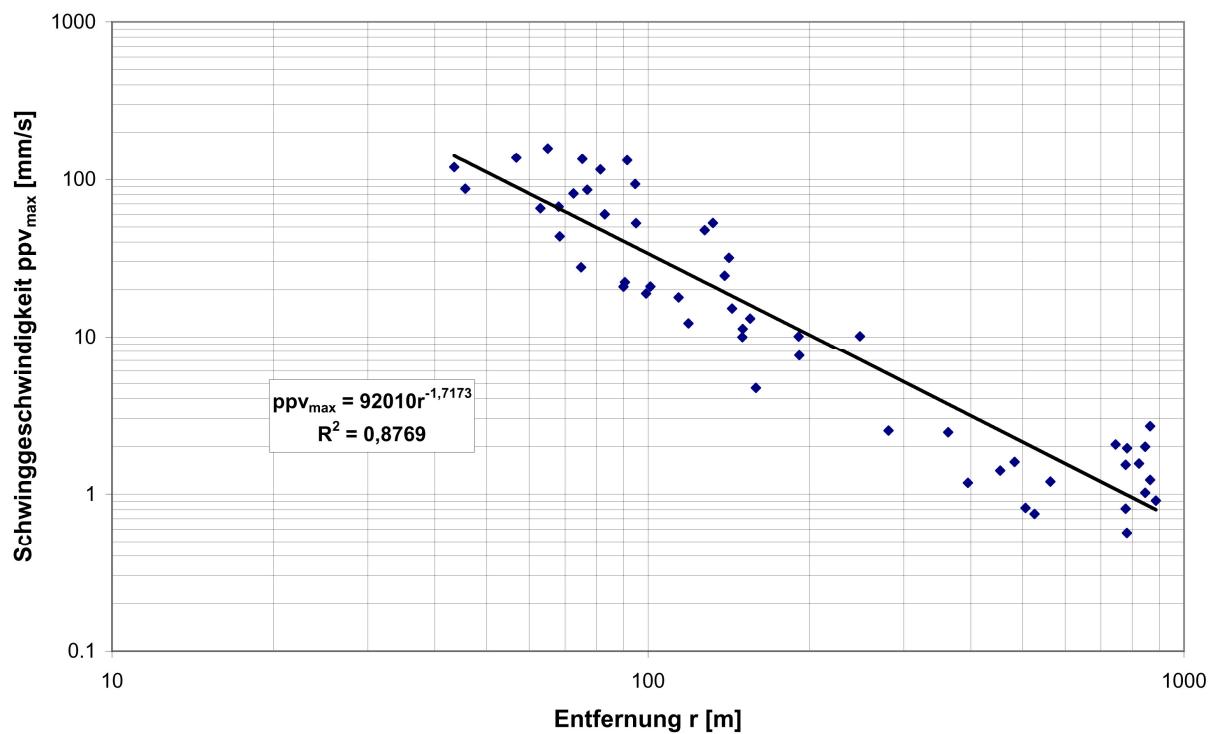


Bild 7.9: *ppv-r*-Diagramm Tagebau Leukersdorf

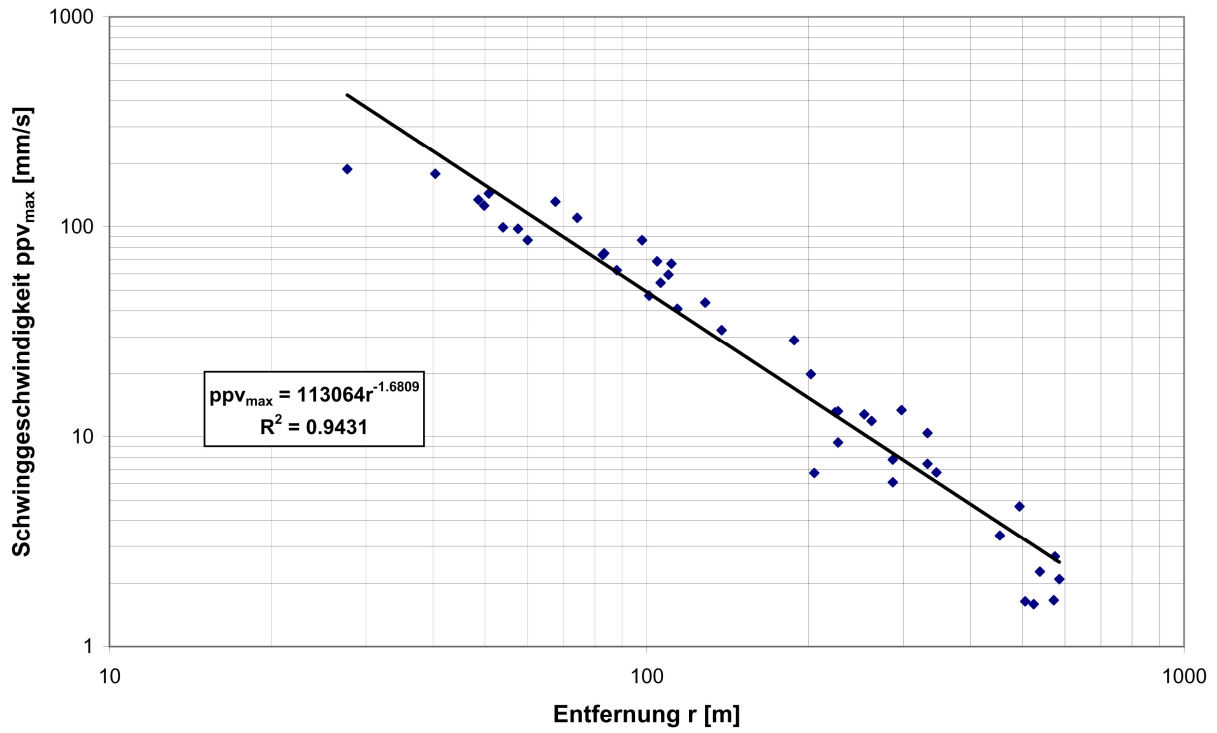


Bild 7.10: *ppv-r*-Diagramm Tagebau Lüptitz

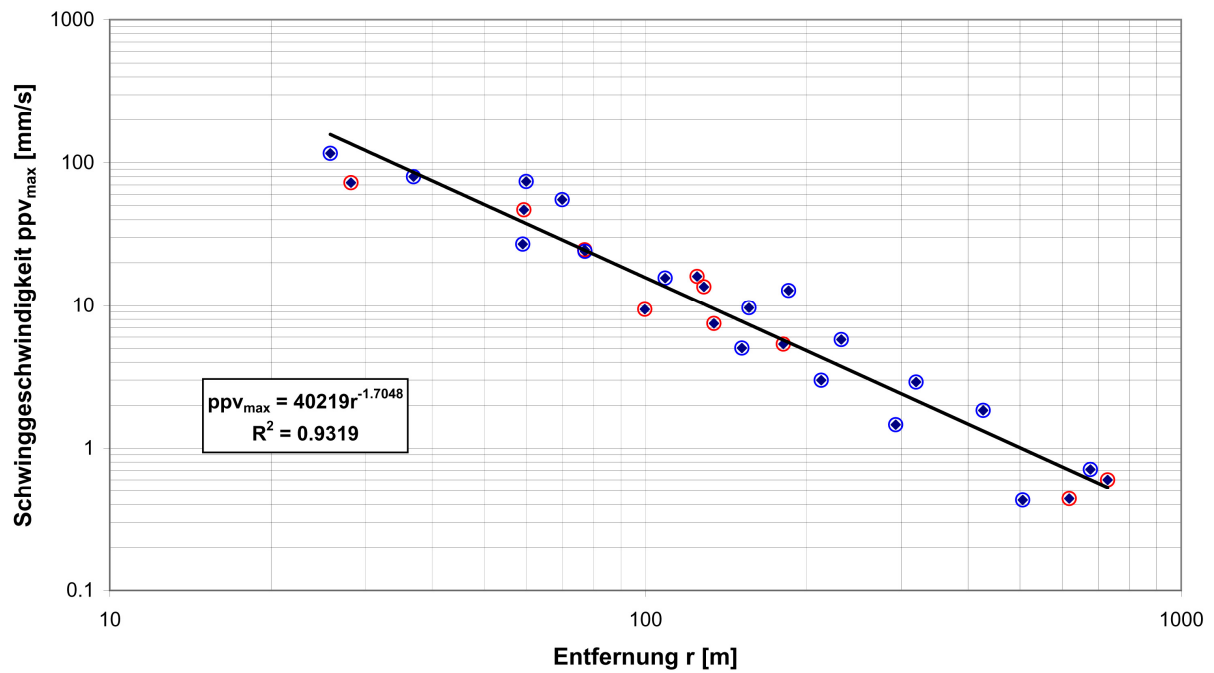


Bild 7.11: *ppv-r*-Diagramm Tagebau Winterberg

In der Tabelle 7.4 wurden zum schnellen Vergleich einige statistische Parameter zur Auswertung der $ppv-r$ -Diagramme (Bilder 7.7 bis 7.8) zusammengestellt. Infolge der diszipliniert nach den eingangs geschilderten Aufstellungsprinzipien der Geophone sowie deren Kopplung mit Auflagegewichten sowie ähnlicher geometrischer Bedingungen der Bohrlochlänge sind die Regressionsbeziehungen zwischen r und ppv durchweg statistisch gesicherte Abhängigkeiten. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Größe der Entfernung r den größten Einfluss auf die Schwinggeschwindigkeit hat. Es wäre fachlich und hinsichtlich der Aussagen zu den Auswirkungen von Erschütterungen fatal, mit der Bewertung an dieser Stelle aufzuhören. Die übrigen Parameter Lademenge eines Bohrloches W_B und die Detonationsgeschwindigkeit c_d der eingesetzten Sprengstoffe müssen in die Erschütterungsanalyse einbezogen werden. Die daraus entwickelten Ergebnisse der Impuls-Abstandsbeziehungen für jeden Tagebau sind in den Bildern 7.12 bis 7.19 dargestellt.

Tabelle 7.5: Statistische Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Impuls-Abstandsbeziehungen der Schwinggeschwindigkeit in den einzelnen Tagebauen

| Tagebau | Faktor m | Exponent m | Vorherrschender Sprengstoff | Korrelationskoeffizient R^2 der Beziehung |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Elbingerode | 0,0242 | 0,9913 | Emulsionssprengstoff (1 x HEAVY ANFO) | 0,8948 |
| Görsdorf | 0,0164 | 0,993 | Emulsionssprengstoff | 0,8701 |
| Koschenberg - gesamt - | 0,0674 | 0,9624 | Emulsionssprengstoffe verschiedener Hersteller | 0,82 |
| Nordwand | 0,05 | 1,0124 | Emulsionssprengstoffe verschiedener Hersteller | 0,7844 |
| Tiefsohle | 0,031 | 0,99 | Emulsionssprengstoffe verschiedener Hersteller | 0,8547 |
| Leukersdorf | 0,152 | 0,9919 | Emulsionssprengstoffe | 0,8711 |
| Lüptitz | 0,1281 | 0,9951 | Emulsionssprengstoffe | 0,9328 |
| Winterberg | 0,1733 | 1,0064 | ANFO | 0,9836 |
| Winterberg | 0,0635 | 1,0506 | Emulsionssprengstoff | 0,9831 |

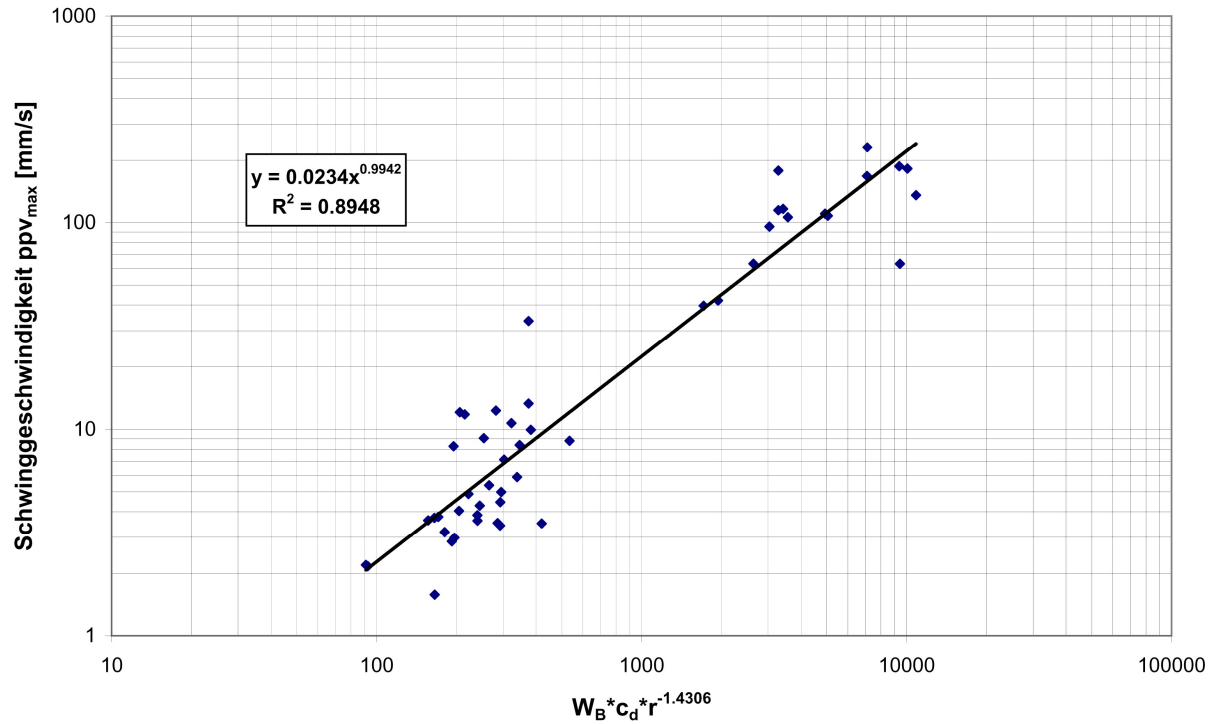


Bild 7.12: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-n}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Elbingerode

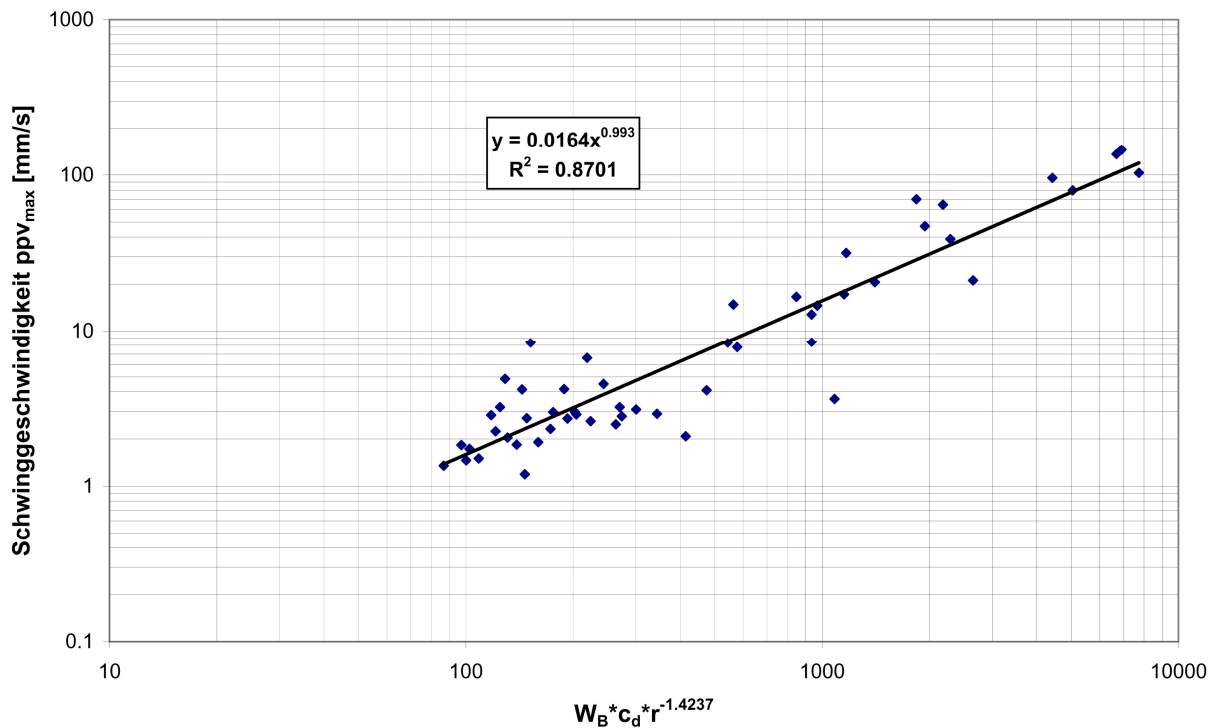


Bild 7.13: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-n}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Görzdorf

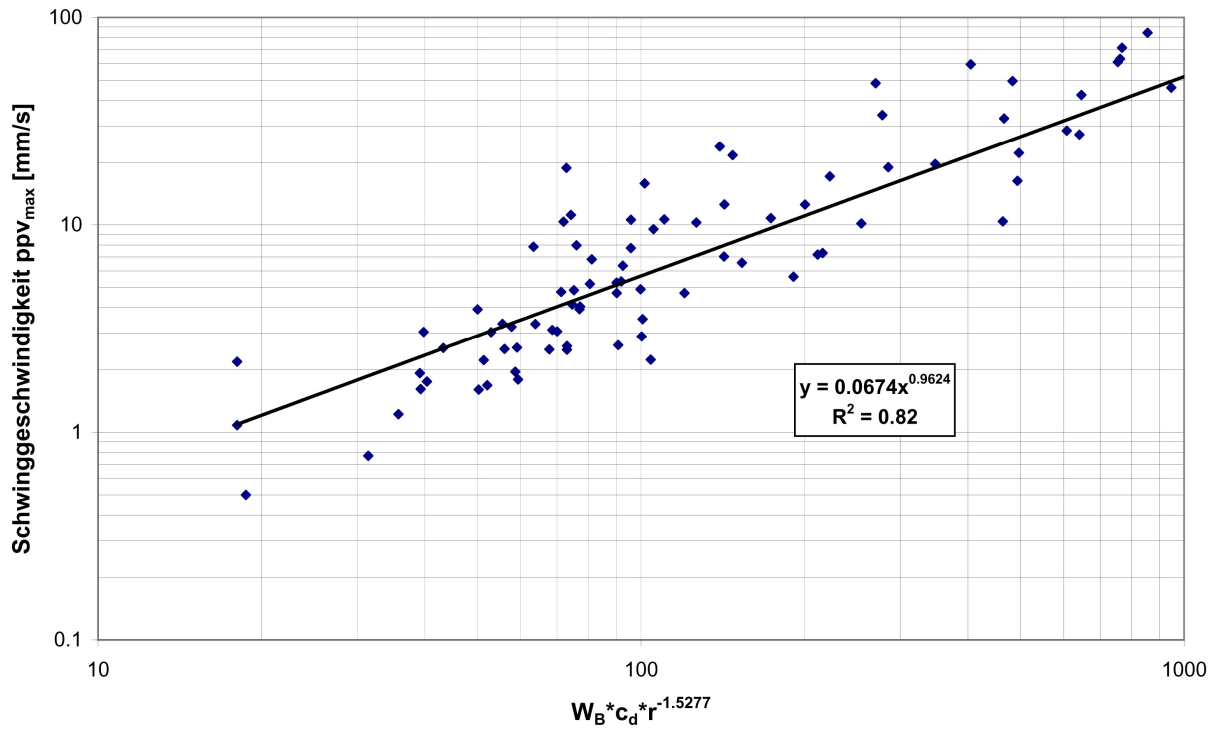


Bild 7.14: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-n}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Koschenberg – gesamt –

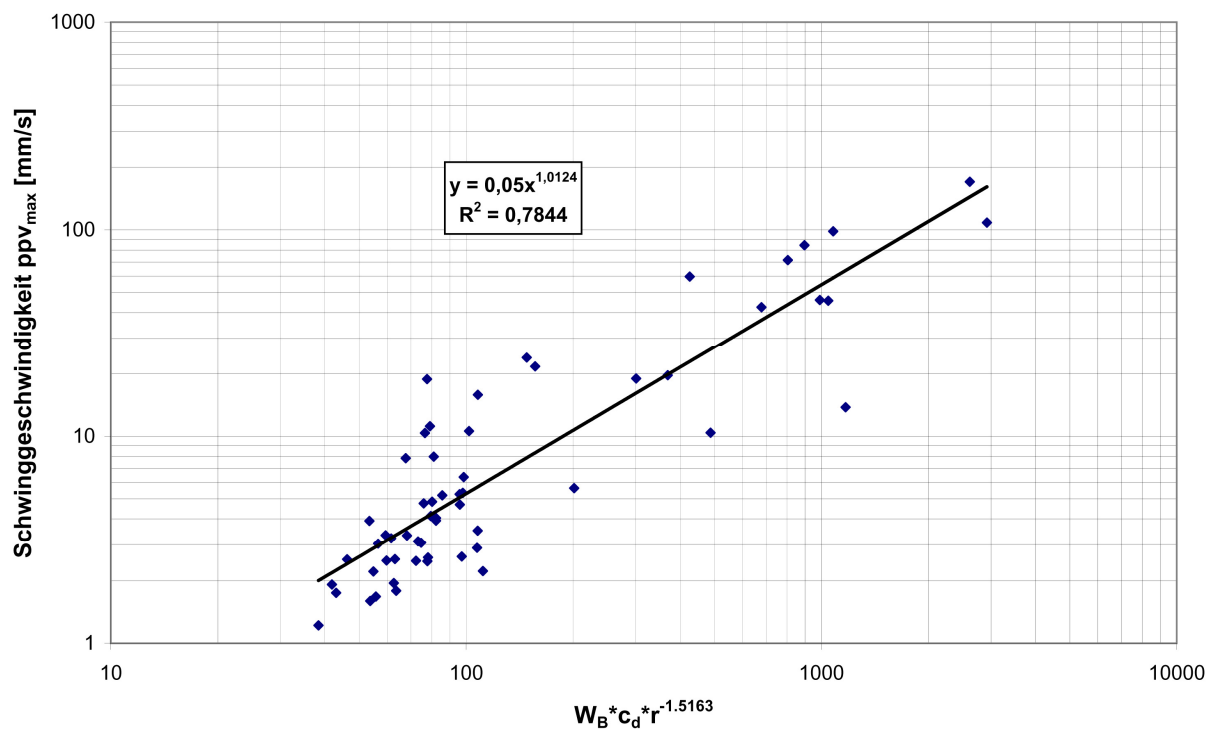


Bild 7.15: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-n}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Koschenberg - Nordwand

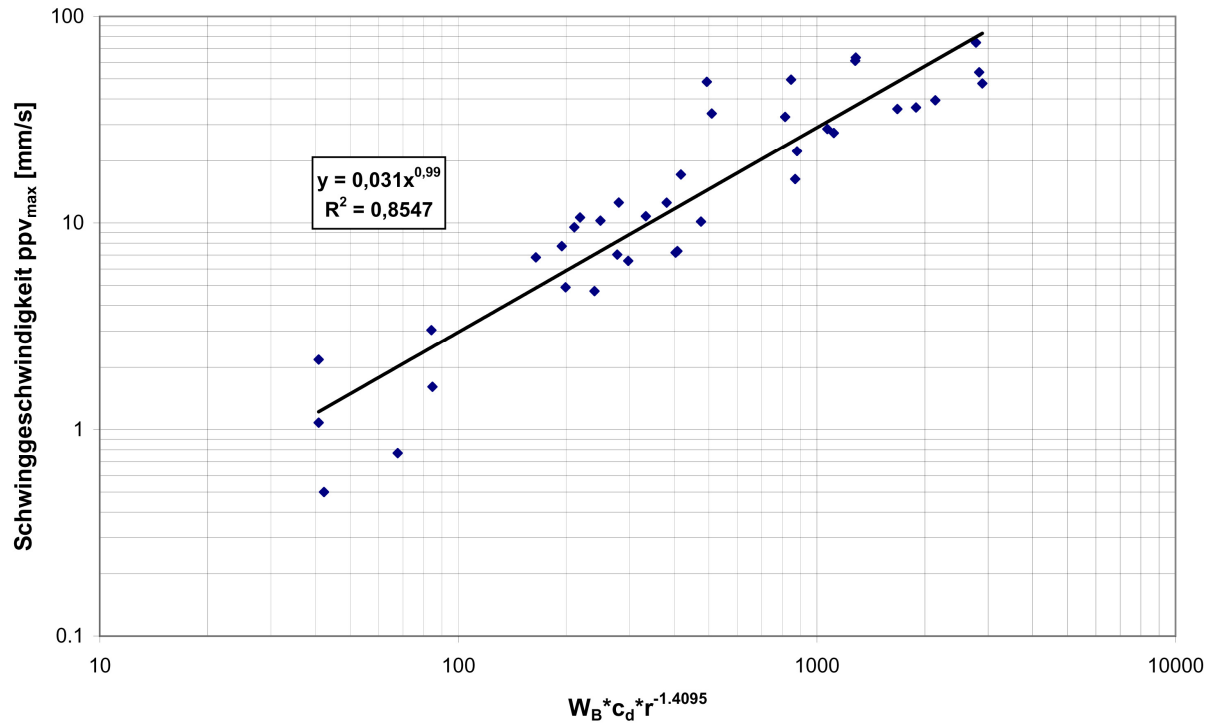


Bild 7.16: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-\eta}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Koschenberg - Tiefsohle

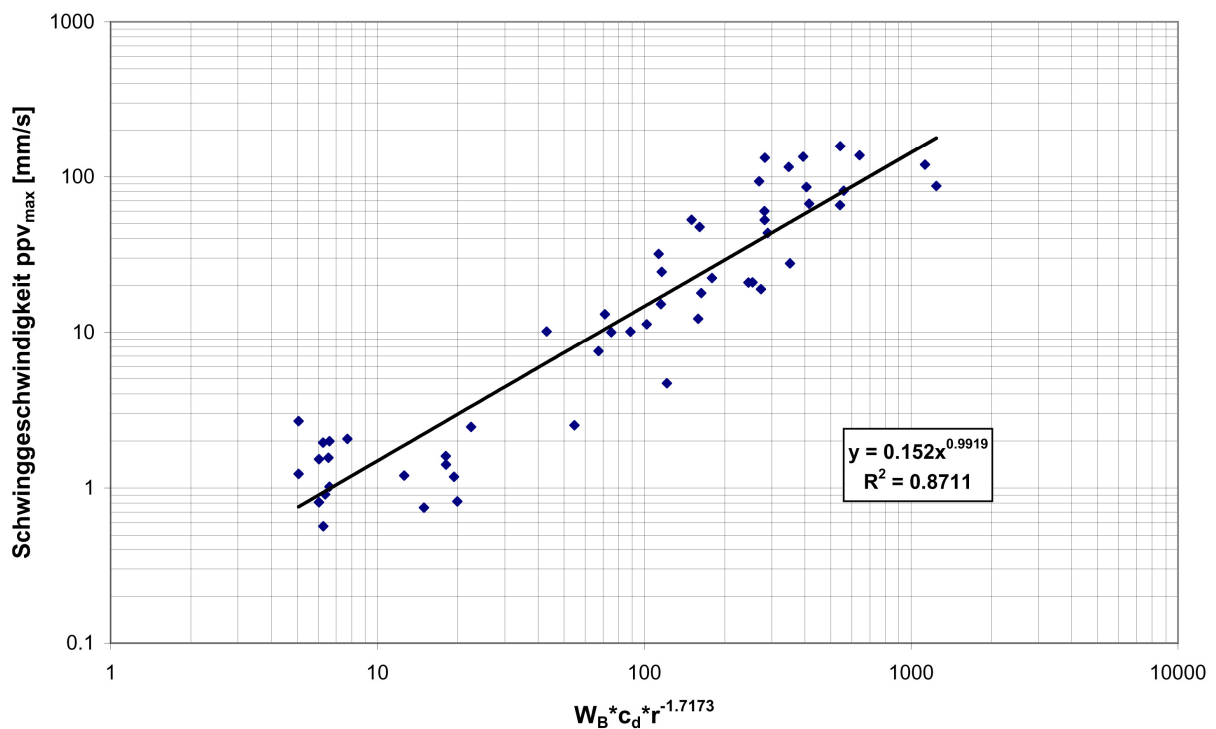


Bild 7.17: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-\eta}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Leukersdorf

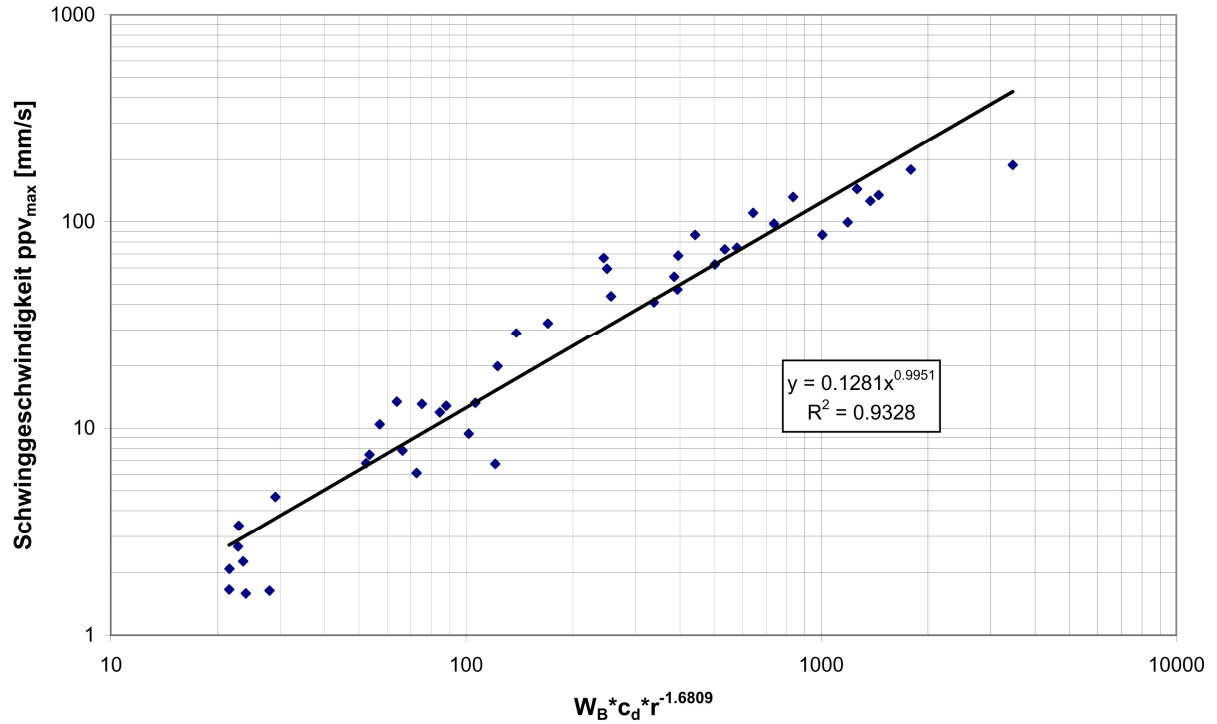


Bild 7.18: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-n}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Lüptitz

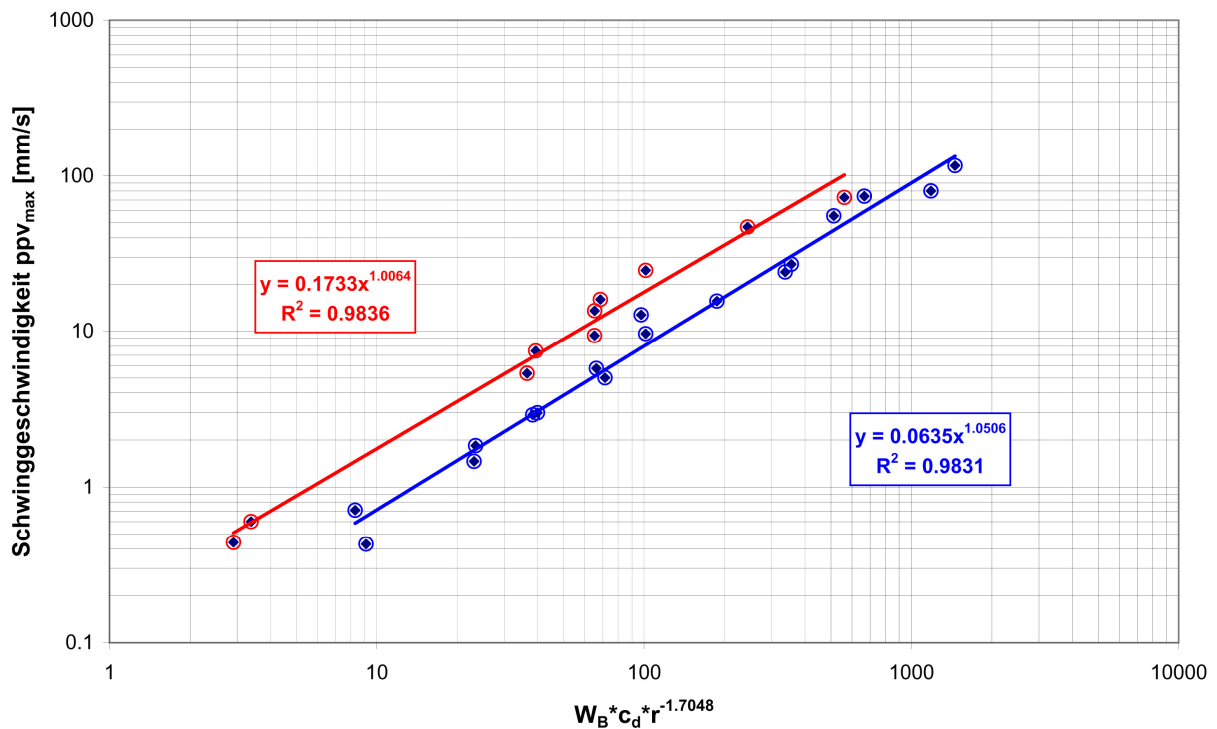


Bild 7.19: $W_B \cdot c_d \cdot r^{-n}$ - ppv_{max} -Diagramm Tagebau Winterberg

Diese basieren auf multiplen Regressionsanalysen mittels der gemessenen oder angewandten Eingangswerte

ppv (mm/s)

W_B (kg)

c_d (m/s) und

r (m)

Die einzelnen Regressionsbeziehungen sind in den Bildern 7.12 bis 7.19 enthalten. Die Tabelle 7.5 vermittelt die statistischen Ergebnisse der Analyse. Es ist festzustellen, dass die Korrelationskoeffizienten einen tendenziellen Rückgang aufzeigen. Das kann nach entsprechender Fehleranalyse durch die vielfältigen Einflussgrößen mit größeren Streuungen der Werte begründet werden. Am grundsätzlichen Ergebnis ändert sich dadurch nichts, dass für jeden

...Tagebau statistisch gesicherte, objektiv für die jeweiligen Randbedingungen gültige Impuls-Abstands-Beziehungen erarbeitet wurden. Mit den Beziehungen können Erschütterungen bewusst verändert, beeinflusst oder stabilisiert werden – je nach Erfordernis im Umfeld des Tagebaues und der vorhandenen Bebauung.

Die gleiche Analyse wurde mit den Dehnungsmessungen durchgeführt, sofern die Anzahl der Messungen dies ermöglichte. In der Aufgabenstellung war formuliert, dass insbesondere die Tagebaue Görzdorf, Koschenberg und Leukersdorf durch die nahe benachbarte Bebauung mit Beschwerden durch Erschütterungsimmissionen zu tun haben und die Möglichkeit der Beeinflussung der Erschütterungen große praktische Bedeutung hat. Die Entwicklung von Impuls-Abstandsbeziehungen zur dynamischen Dehnung wurde trotz wesentlich geringerer Datenlage in den Bildern 7.20 bis 7.23 verwirklicht. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigen für die Tagebaue Görzdorf und Leukersdorf ausreichende Sicherheiten. Im Tagebau Koschenberg ist das Ergebnis mit einem $R^2 = 0,757$ nicht zufriedenstellend. Die breite Streuung der Messwerte ist damit zu begründen, dass es in dem extrem geklüfteten Metagrauwacken-Festgebirge nur wenige Stellen ohne Trennflächen gibt. Der Sensor konnte nicht immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Erschütterungswellen aufgebracht werden.

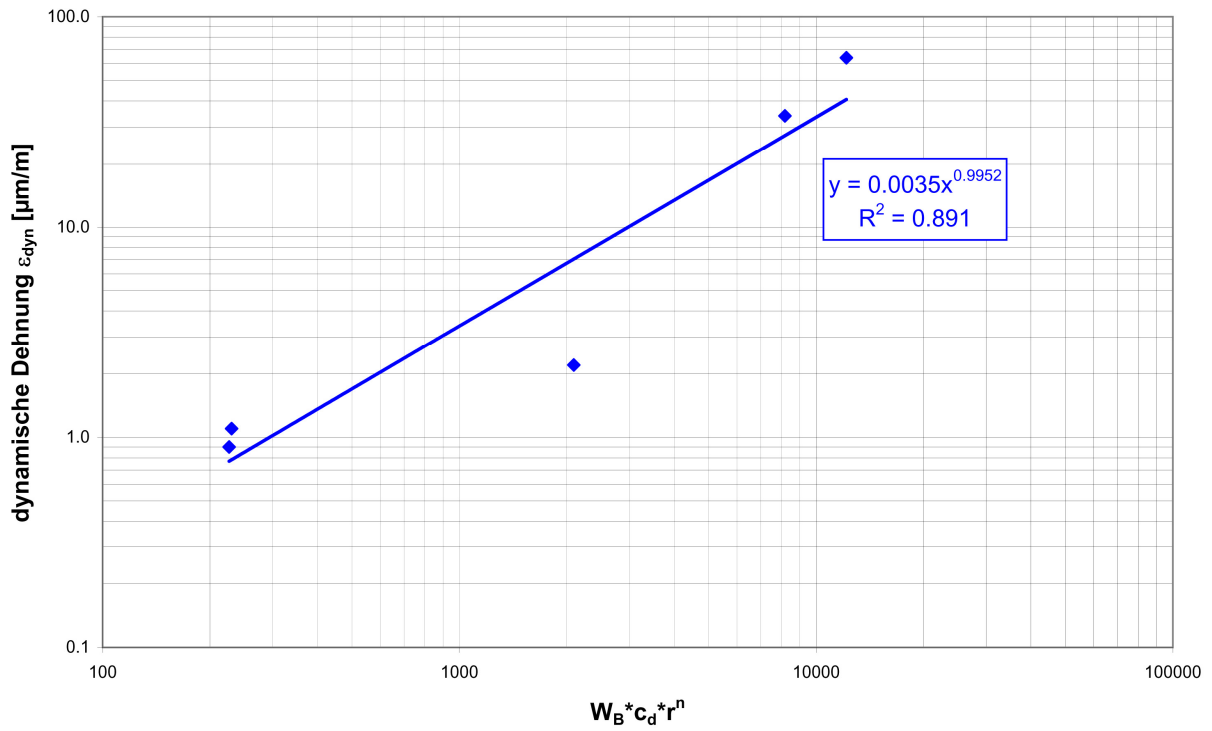


Bild 7.20: $W_B \cdot c_d \cdot r^n - \epsilon_{dyn}$ -Diagramm Tagebau Görzsdorf

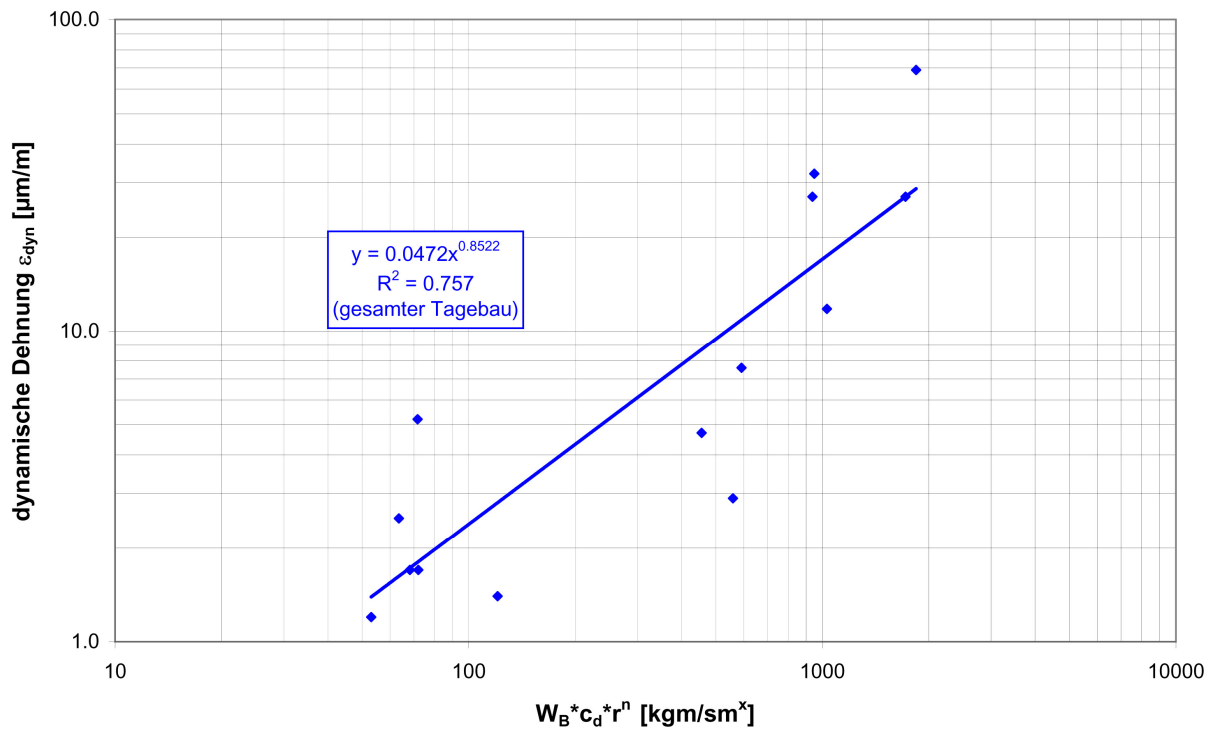


Bild 7.21: $W_B \cdot c_d \cdot r^n - \epsilon_{dyn}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg

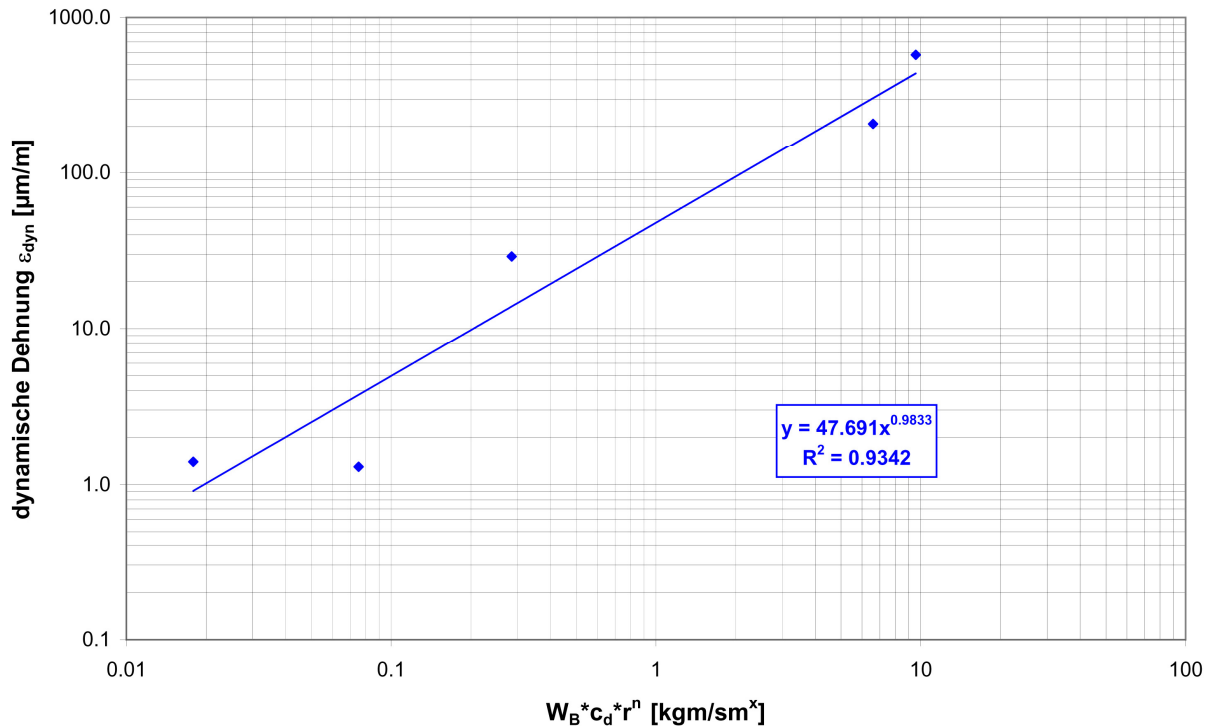


Bild 7.22: $W_B \cdot c_d \cdot r^n - \epsilon_{dyn}$ -Diagramm Tagebau Leukersdorf

Die Messergebnisse sind daher nicht alle vergleichbar und statistisch gleichzustellen. Dennoch sind diese ersten Ergebnisse von Impuls-Abstandsbeziehungen für die Dehnung von erheblicher praktischer Bedeutung. Die Dehnungs-Impuls- und Energie-Abstandsbeziehungen gestatten bei genauer Messweise und gesicherten Daten im Entfernungsbereich von 50 bis 300 m von der Sprengstelle eine Extrapolation der Dehnungsgröße auf den Meterradius um die detonierende Ladung. In diesem Fall erscheint es möglich, einen Vergleich der Dehnungswellen-Energie (33) und der im Bohrloch freiwerdenden Energie (nach 16) vorzunehmen. Für das Kalksteinfestgebirge in Elbingerode ergibt sich nach entsprechenden Rückrechnungen eine Impuls-Abstandsbeziehung für die Dehnung:

$$\epsilon_{\max} = 0,1306 \left(W_B \cdot c_d \cdot r^{-0,4778} \right)^{0,6337} \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right] \quad (34)$$

und bei Einsatz von 200 kg Emulsionssprengstoff eine Dehnung bei $R = 1$ m von

$$\underline{\pm 664 \mu\text{m/m.}}$$

Die Rückrechnung mit der Beziehung (33) ergibt eine dynamische Dehnung von

$\pm 786 \mu\text{m/m}$

Das erarbeitete Erschütterungsmodell kann auf diese Weise objektiv messtechnisch und physikalisch begründet werden. Die erarbeiteten Beziehungen sind statistisch gesichert und gestatten sowohl eine Beeinflussung der Erschütterungsimmissionen durch Änderung der Lademenge sowie des Sprengstoffes als auch eine genauere Vorhersage möglicher Erschütterungen vor der Durchführung der Sprengung.

7.2.2 Energie-Abstandsbeziehungen

Die Energie-Abstandsbeziehungen nach (12) und (13) werden mit der gleichen Vorgehensweise wie die vorgenannten Impuls-Abstandsbeziehungen auf der Grundlage der für die Sprengungen bekannten Eingangswerte V_{SB} (m^3), ξ , ρ_s (kg/m^3), c_d (m/s), r (m) sowie die ppv - (mm/s) und ε ($\mu\text{m/m}$) Messergebnisse erarbeitet. Die genannten Größen werden durch eine multiple Korrelationsanalyse in die statistisch gesicherten Regressionsbeziehungen überführt. Ein anderer, einfacher Weg wurde ausführlich bei [MÜ 05/06] beschrieben. In den Bildern 7.23 bis 7.30 sind die ppv -Energie-Abstandsbeziehungen für alle Tagebaue mit einer hohen statistischen Sicherheit dokumentiert.

Hervorzuheben ist die im Tagebau Winterberg eindeutig nachweisbare Beeinflussung des eingesetzten Sprengstoffes auf die Sprengerschütterungsimmissionen (Bilder 7.19 und 7.30).

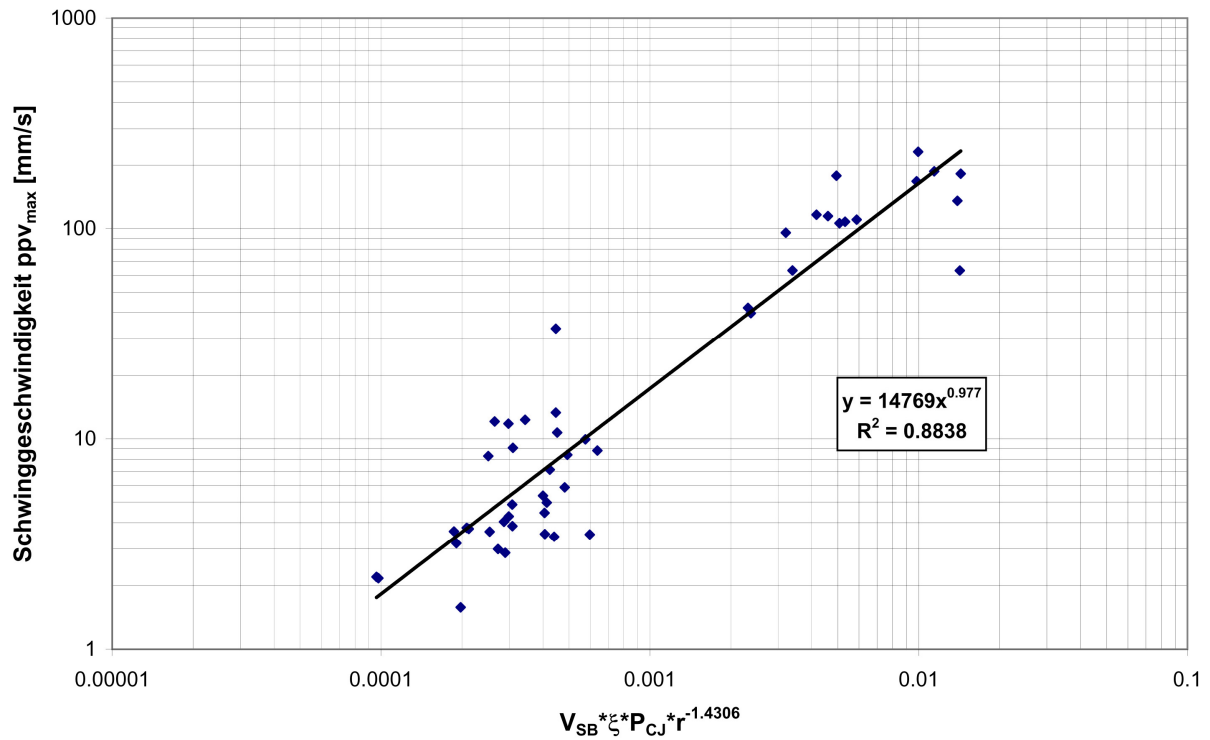


Bild 7.23: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Elbingerode

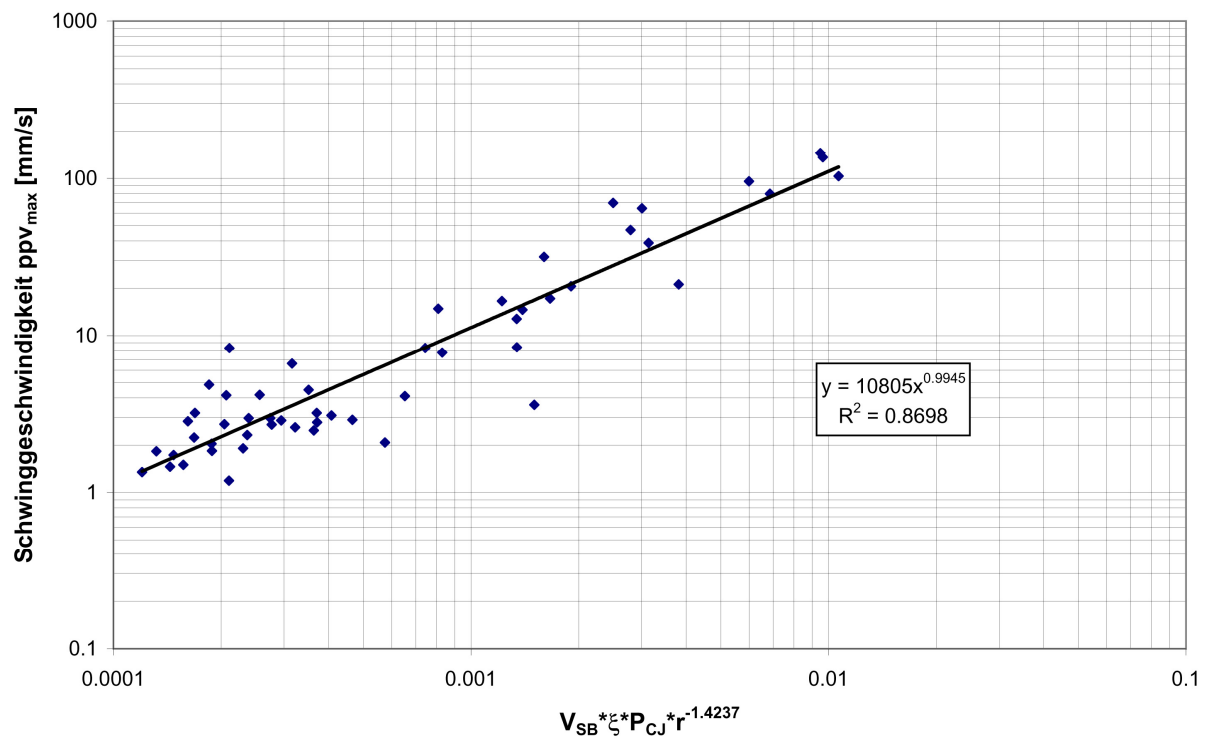


Bild 7.24: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Görzdorf

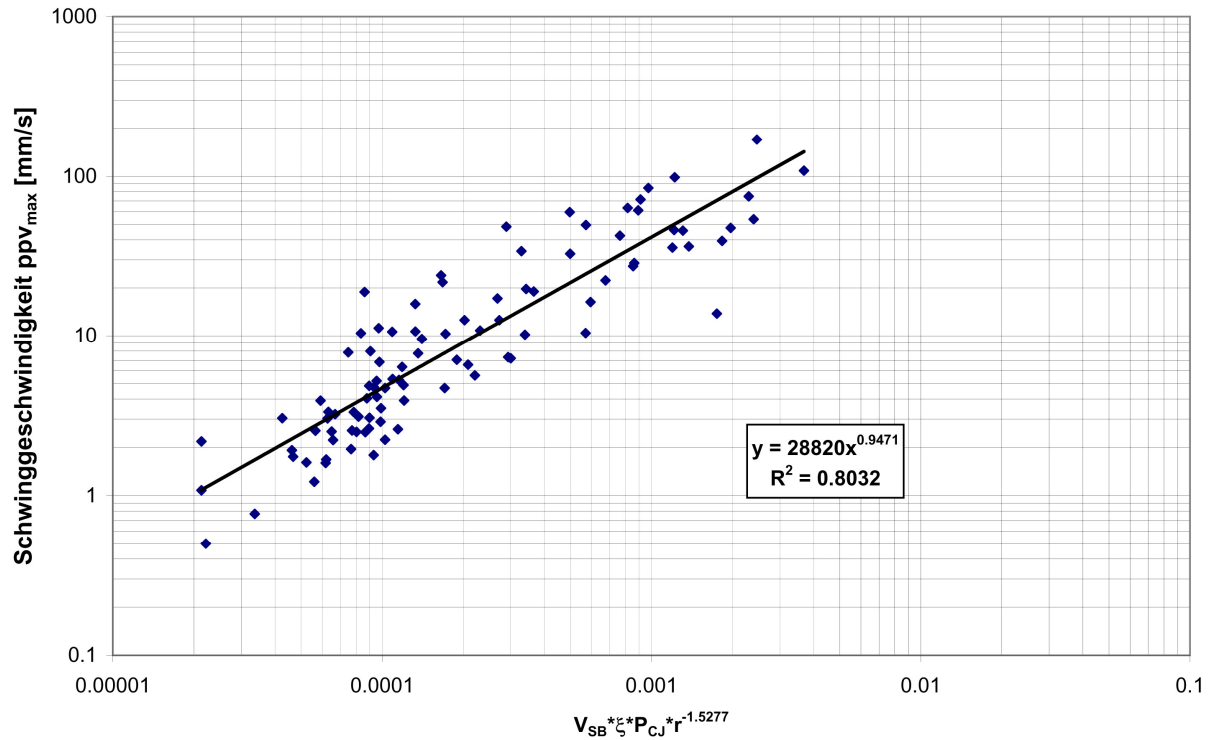


Bild 7.25: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg – gesamt –

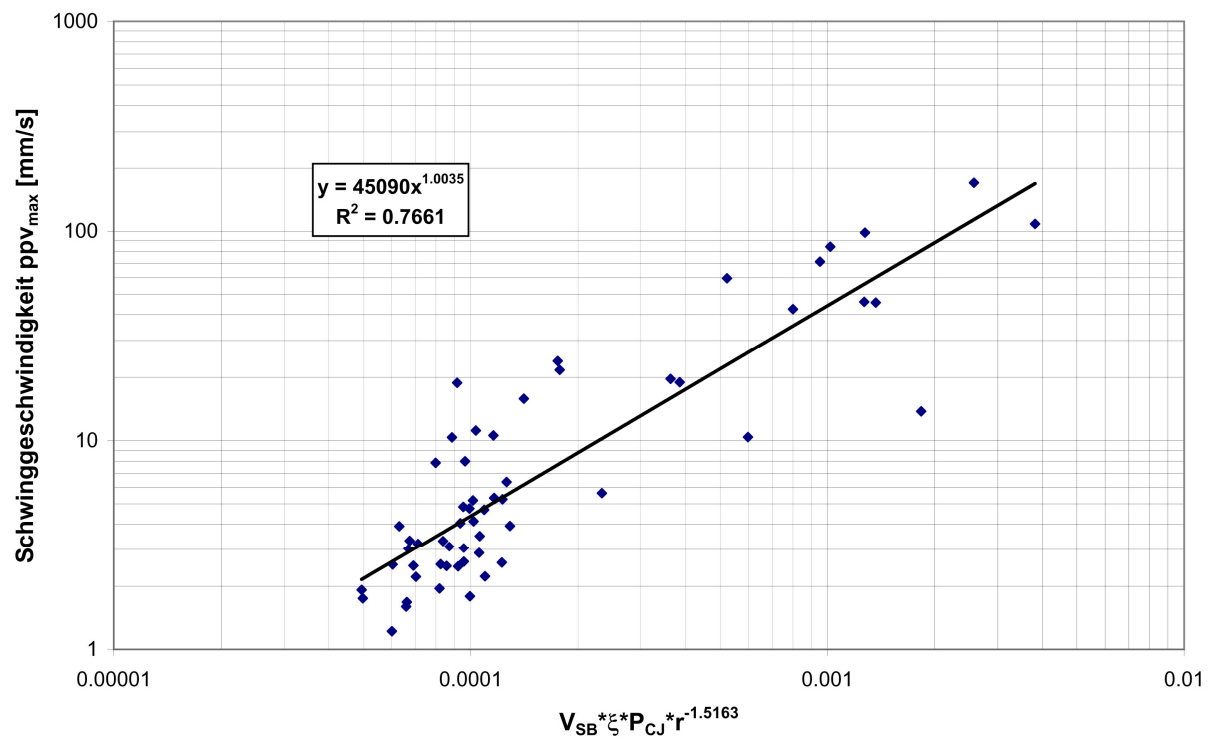


Bild 7.26: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg - Nordwand

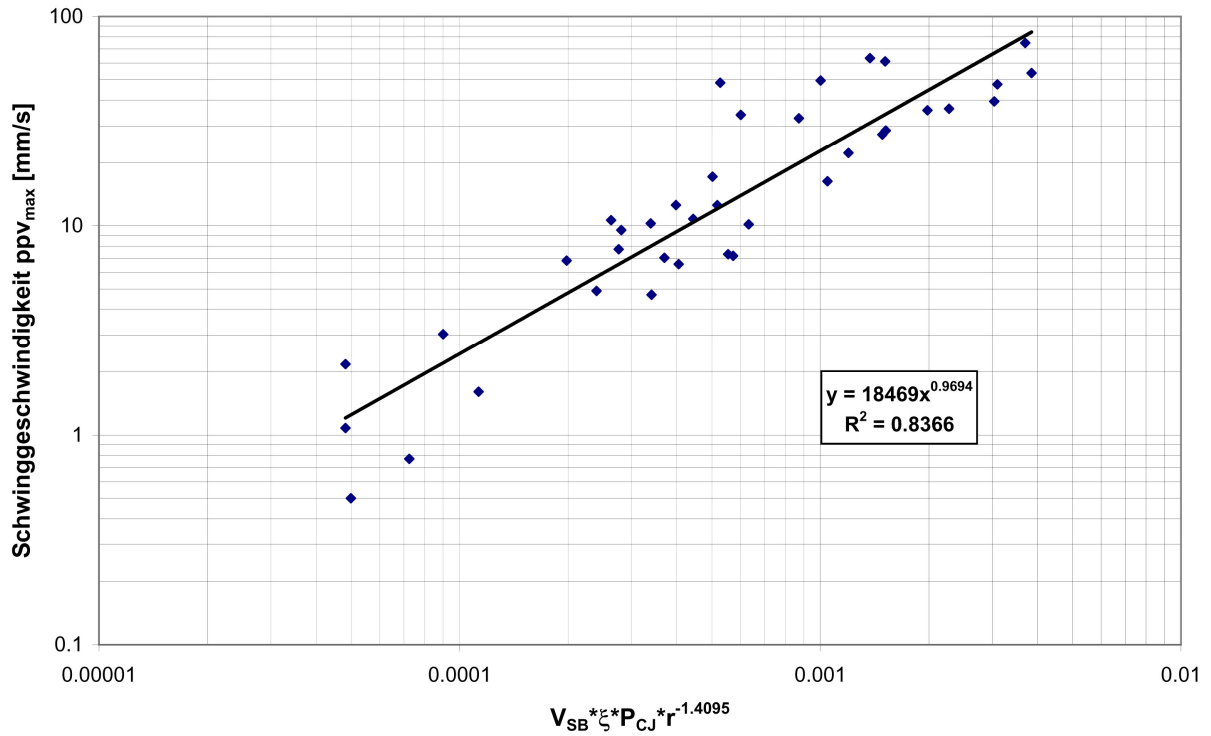


Bild 7.27: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^n - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Koschenberg - Tiefsohle

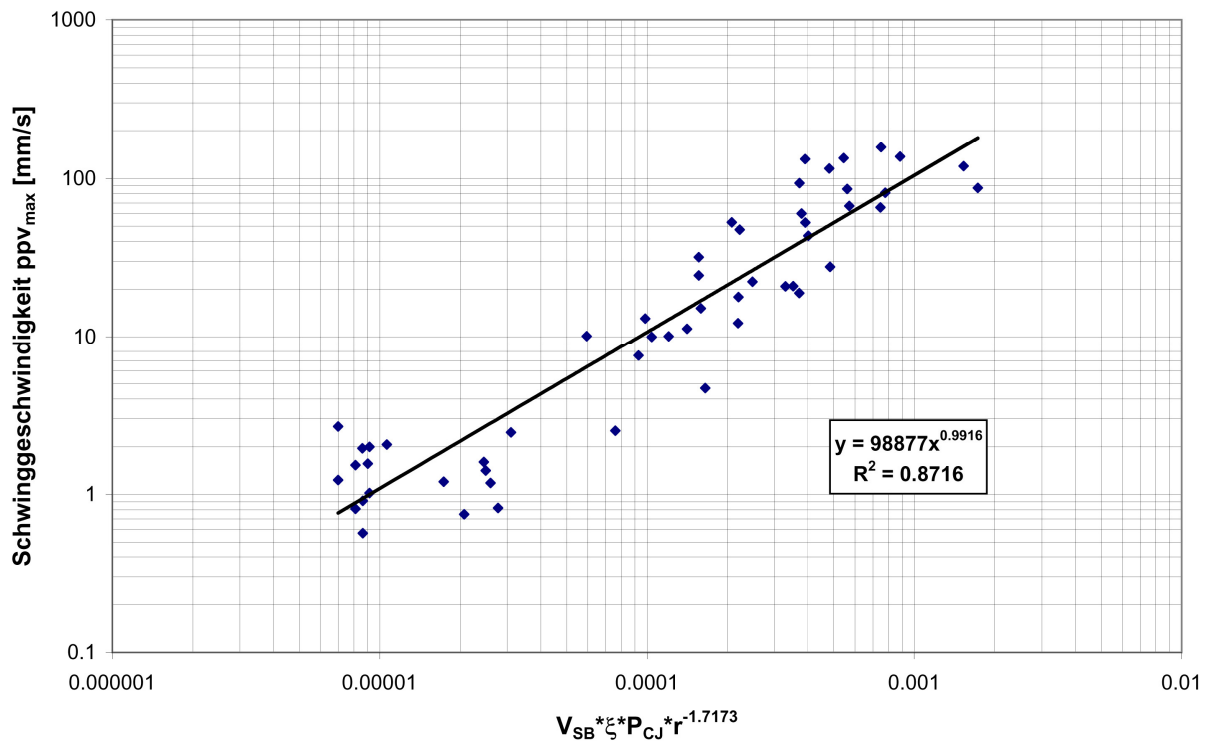


Bild 7.28: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^n - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Leukersdorf

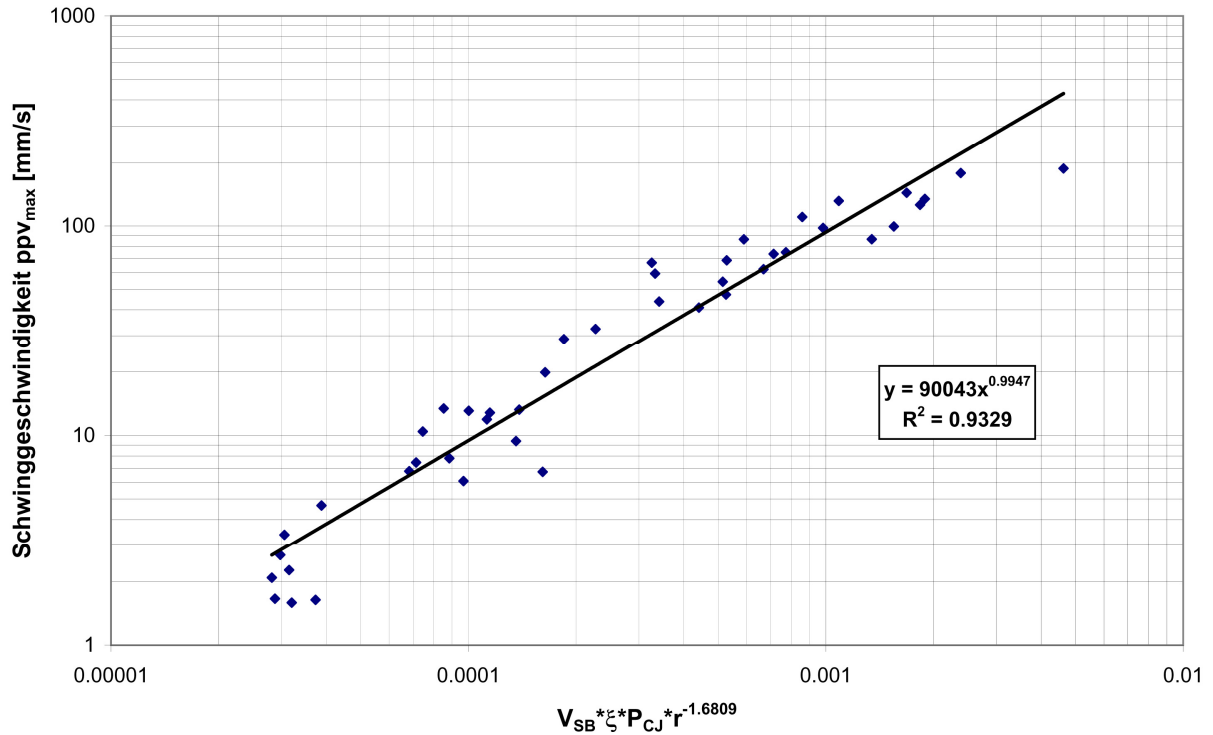


Bild 7.29: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Lüptitz

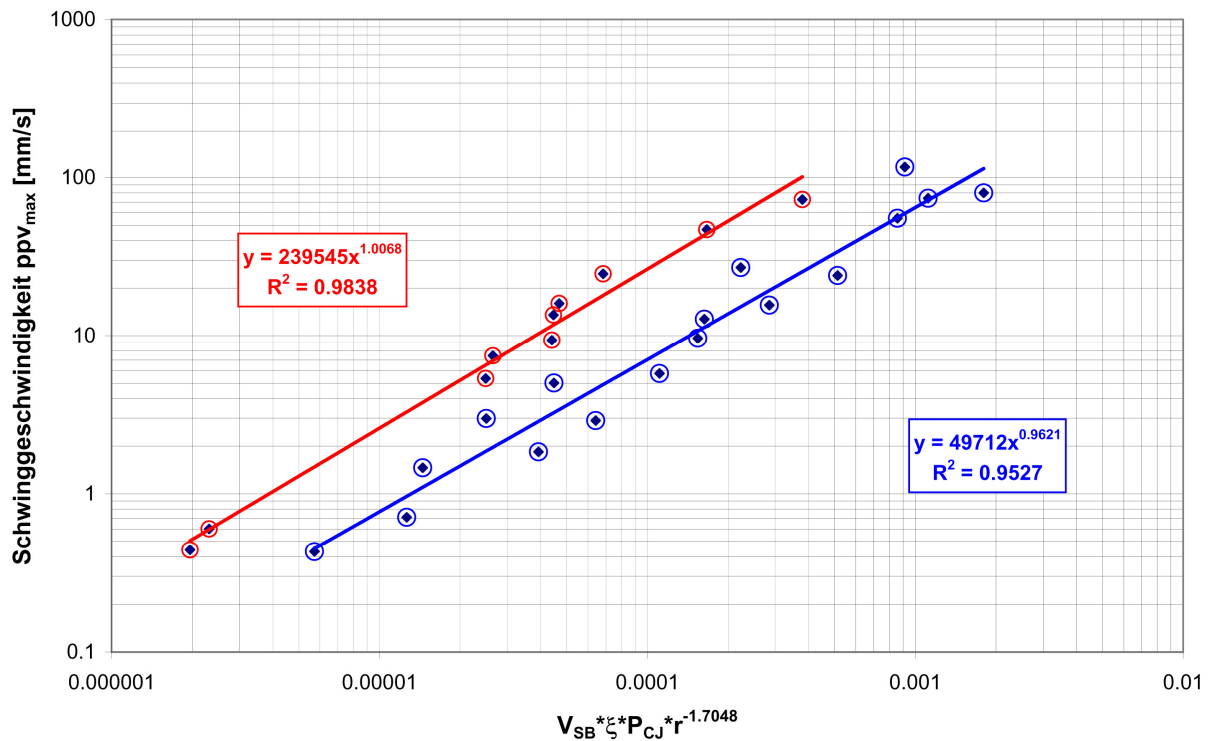


Bild 7.30: $V_{SB} \cdot \xi \cdot P_0 \cdot r^{-n} - ppv_{max}$ -Diagramm Tagebau Winterberg (rot = ANFO; blau = Emulsionsprengstoff)

Wird in einem Festgebirge ein Sprengstoff mit zu geringer Wirkung bzw. subsonischer Wellenausbreitung eingesetzt, steigen die Sprengerschütterungen an. Je angepasster der Sprengstoff an die jeweilige Gebirgsbedingung, um so geringer sind die induzierten Erschütterungen. Diese Erkenntnis wird noch deutlicher sichtbar, wenn die Regressionsgeraden aller ermittelten *ppv*-Energie-Abstandsbeziehungen in einem Diagramm zusammenstellt (Bild 7.31) werden. Von links nach rechts werden bei höherem Energieeintrag oder mit der Optimierung der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik die Sprengerschütterungen geringer. Im Tagebau 1a werden beispielsweise ANFO-Sprengstoffe mit hohen Sprengerschütterungen bzw. im Tagebau 6 Emulsionssprengstoffe mit einem großen spezifischen Sprengstoffverbrauch und geringerer Erschütterungsimmissionen eingesetzt. Mit diesen Erkenntnissen können die erwarteten Sprengerschütterungsimmissionen effektiv beeinflusst werden.

Die Sprengungen können umweltfreundlicher ausgelegt werden, weil man die Sprengerschütterungsimmissionen beeinflussen, verringern oder steigern kann. Der Zusammenhang mit der Verbesserung der Stückigkeit und der Einhaltung der zulässigen Sprengerschütterungen gestattet die Gestaltung einer umweltbewusst gesteuerten Bohr-, Spreng- und Zündtechnik, ohne dass das erwartete Sprengergebnis eingeschränkt

7.2.3 Zonen der dynamischen Einwirkungen um eine Sprenganlage

Es ist bekannt, dass sich um eine detonative Sprengstoffladung bestimmte Zonen der Einwirkung ausbilden:

- Zermalmungszone
- Risszone
- Erschütterungszone [BE 90, HE 93, HOP 98, HU 99, JI 95, LA 63, MOS 76, PE 94, TH 78].

Die ausgeprägte Bildung einer Risszone um die detonierte Ladung gehört zu den Zielen einer detonativen Sprengstoffumsetzung im Bereich der Vorgabe resp. des Reihenabstandes. Die Gesteine zerreißen bei dynamischer Belastung zwangsläufig in unterschiedlicher Weise. Die Bruchgeschwindigkeit der Risse und Neubrüche im Gestein liegt nach dem LAGRANGE-Diagramm deutlich unter der P-Wellengeschwindigkeit (Bild 7.32). Im LAGRANGE-Diagramm sind die allgemeinen Zusammenhänge der Wellen- und Bruchgeschwindigkeit dargestellt. Die Längswelle mit dem höchsten Anteil der Bruchbildung

hat gegenüber der Scherwelle die größte Wellengeschwindigkeit. Die Bruchentwicklung schreitet nach den Wellendurchgängen nur langsam voran (Bild 7.33) Bei Kenntnis der Geschwindigkeiten kann man die Bruchbildung simulieren. Es ist verständlich, dass eine zu schnelle Zündung der Ladungen die Bruchentwicklung nicht fördert, sondern unterbricht. Die Bruchgeschwindigkeit ist somit von wesentlicher Bedeutung für die Wahl der Verzögerungszeit einer Zündfolge. Durch die in dieser Arbeit ermittelten c_p und c_s -Werte der Festgesteine ist die Größenordnung der Bruchgeschwindigkeit abschätzbar.

Verbindet man die LAGRANGE-Postulation mit den Wirkungen der Wellenausbreitung durch verschiedene Detonationsgeschwindigkeiten (Bild 7.32), dann kann unter der Voraussetzung gleicher geometrischer und sprengtechnischer Bedingungen das Folgende geschlussfolgert werden (vergleiche auch Bild 6.5):

- subsonische Verhältnisse führen zu geringerer Bruchentwicklung in der Risszone und erhöhen die Erschütterungen
- transsonische Verhältnisse erzielen eine mittlere bis gute Bruchentwicklung in der Risszone und erzeugen mittlere bis geringe Erschütterungen
- supersonische Verhältnisse erzielen eine optimale bis sehr gute Bruchentwicklung in der Risszone und weisen vergleichsweise die geringsten Erschütterungen auf.

Vergleicht man diese theoretisch abgeleiteten, fundamentalen Aussagen mit den praktischen Ergebnissen in Bild 7.31 so ist festzustellen, dass einerseits im Tagebau Winterberg die Sprengungen mit ANFO eine subsonische Wellenausbreitung mit geringerer, zerstörender Wirkung und den höchsten Erschütterungen auslösen (Regressionsgerade 1a) und andererseits im Tagebau Görzdorf trans- bis supersonische Wellenausbreitungen erzeugt werden, welche die geringsten Erschütterungen und eine sehr gute Zertrümmerung bewirkten (Regressionsgerade 6, Bild 7.31).

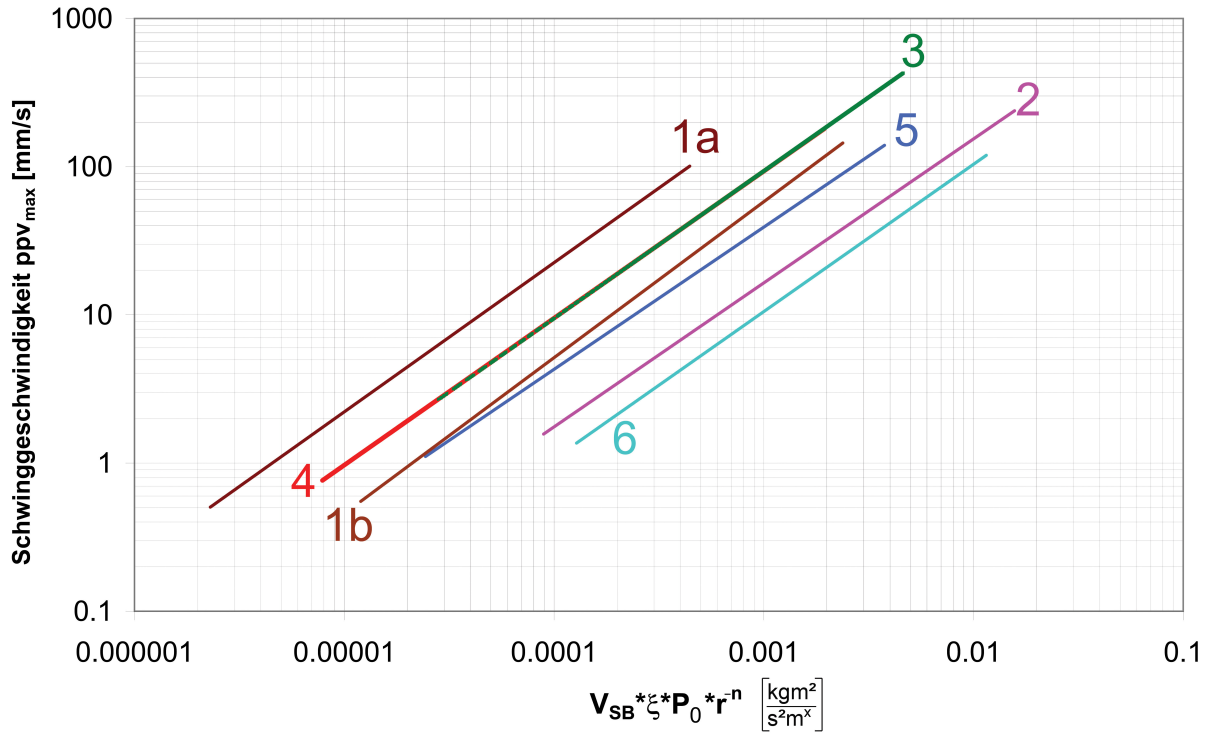


Bild 7.31: Vergleich der Regressionsgeraden der Energie-Abstandsbeziehungen aller Tagebaue; es bedeuten: 1a = Kalkstein Winterberg (ANFO), 1b = Kalkstein Winterberg (Emulsion), 2 = Kalkstein Elbingerode, 3 = Rhyolith Lüptitz, 4 = Rhyolith-Tuff Leukersdorf, 5 = Metagrauwacke Koschenberg, 6 = Gneis Görsdorf

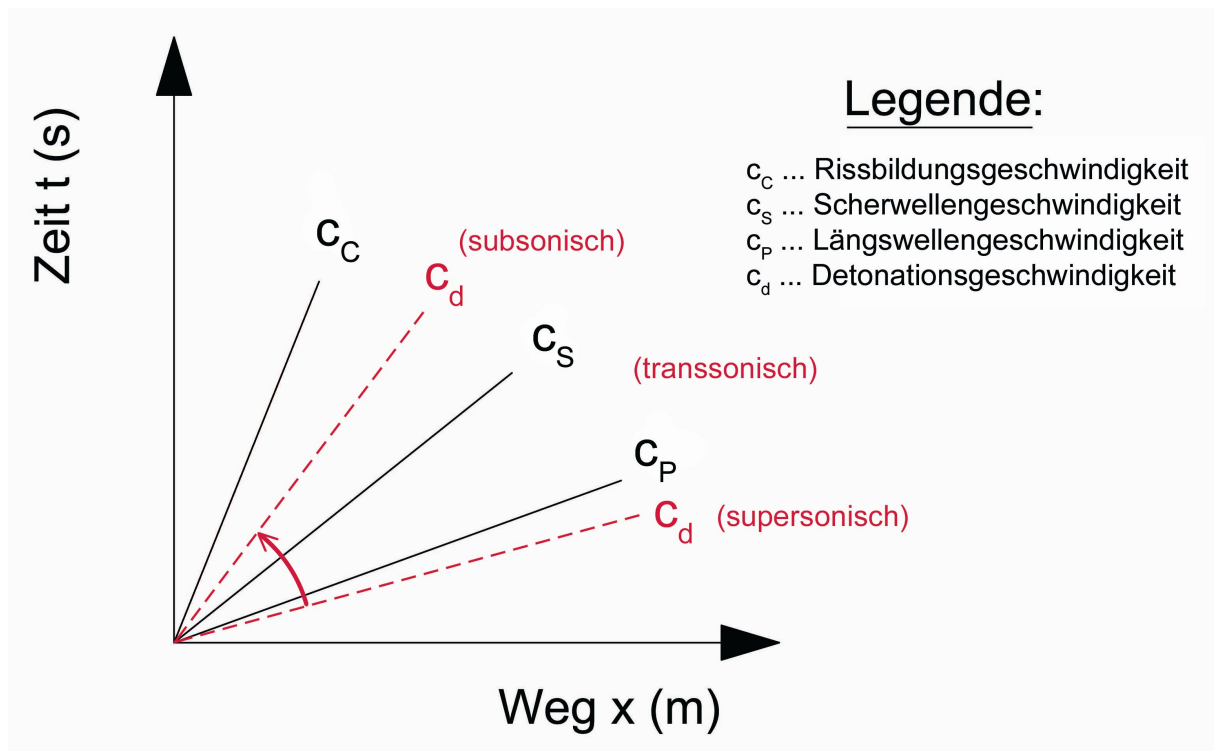


Bild 7.32: Prinzipdarstellung des Weg-Zeit-LAGRANGE-Diagramms [in RO 04]

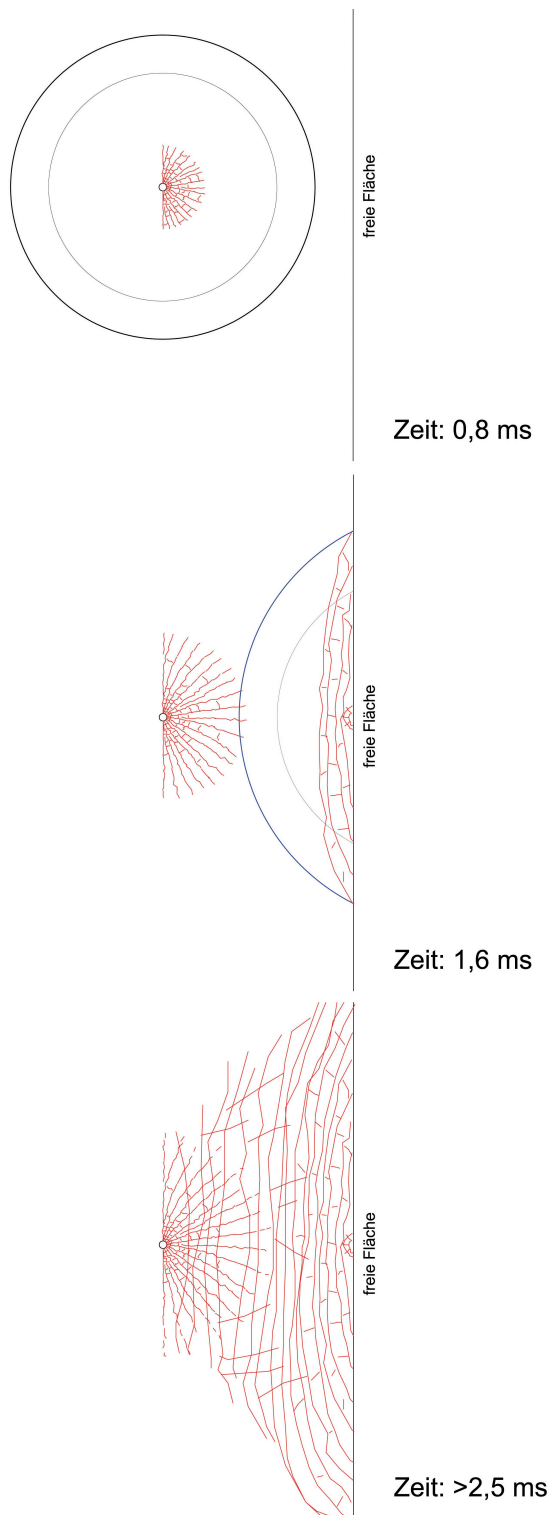


Bild 7.33: Schematisierte zeitliche Rissentwicklung nach der detonativen Sprengstoffumsetzung für ein Festgebirge ohne Trennflächen und einer P-Wellengeschwindigkeit von 4.000 m/s

Die systematischen Dehnungsmessungen zeigten, dass die „Erschütterungszone“ weiter differenziert werden kann (Bild 7.1). Das Bild 7.34 vermittelt die in der Metagrauwacke im Nahbereich gemessenen Verformungen. Diese nehmen gleichermaßen wie die dynamischen Dehnungswerte und Schwinggeschwindigkeiten mit zunehmender Entfernung ab. Für den Tagebau Koschenberg kann die Zone von nachgewiesenen Verformungen um die Sprenganlage mit 108 m angegeben werden (Bild 7.34). Bereits in dieser Entfernung von der Sprengstelle sind im Tagebau Koschenberg die Dehnungen so gering, dass eine Schädigung des Bauwerkes durch die dynamische Einwirkung physikalisch mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist. Als untere Grenze wird vorerst eine Dehnungsgröße von 1,0 $\mu\text{m}/\text{m}$ angelegt, die bereits im ständigen „Rauschen“ an den Messstellen auftreten kann. Größere Verformungen über 1,0 $\mu\text{m}/\text{m}$ können bei mehrfacher Einwirkung auf ein Bauwerk an der gleichen Stelle theoretisch zur Ermüdung und später zum Bruch eines Bauwerksteiles führen. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, die Zone der nachgewiesenen Verformungen um eine Sprenganlage auszuweisen. Innerhalb dieser Zone ist es theoretisch möglich, dass ein Gebäude nach mehrfacher Belastung einen Riss erleiden kann. Außerhalb der Zone sind Risschäden mit hoher Wahrscheinlichkeit physikalisch auszuschließen. Für die nachstehenden Tagebaue besitzt nach den Messergebnissen die Zone der Verformungen einen Radius um die Sprengstelle von

- 107,5 m im Tagebau Koschenberg,
- 84 m im Tagebau Görzdorf und
- 139 m im Tagebau Leukersdorf.

Auf der Grundlage der zahlreichen Messergebnisse aus den unterschiedlichsten Festgebirgen, kann die im Bild 7.35 beispielhaft dargestellte Zoneneinteilung der dynamischen Einwirkungen einer detonativ umgesetzten Sprenganlage als verallgemeinerungswürdige Gliederung empfohlen werden. Das bemerkenswerte dabei ist, dass eine Schädigung von Gebäuden oder Bauwerken jeglicher Art ab Zone (3) mit großer Wahrscheinlichkeit vollständig ausgeschlossen werden kann. Die Begründung dieser eindeutigen Aussage kann auf der Grundlage der Messergebnisse der dynamischen Dehnungen mit dem FBG-Sensor erfolgen.

Bei Einsatz von Dehnungssensoren ist es künftig möglich, um jeden Tagebau eine Nahzone abzugrenzen, in der es nach längerer Sprengwirkung mit größeren Erschütterungsamplituden nach einer bestimmten Einwirkungszeit tatsächlich zu Rissbildungen an Bauwerken kommt. Die dynamischen Einwirkungen in der Fernzone sind

so gering, dass eine Bauwerksschädigung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. Die Erschütterung selbst können in der Größenordnung bis 2,0 mm/s Schwinggeschwindigkeit zu Beschwerden der Anwohner, da sie ab dieser Größenordnung deutlich spürbar sind.

Diese neuen Erkenntnisse werden die Auseinandersetzung mit den Anliegern um die Sprengbereiche erleichtern und den Umgang mit Erschütterungsproblemen verbessern helfen.

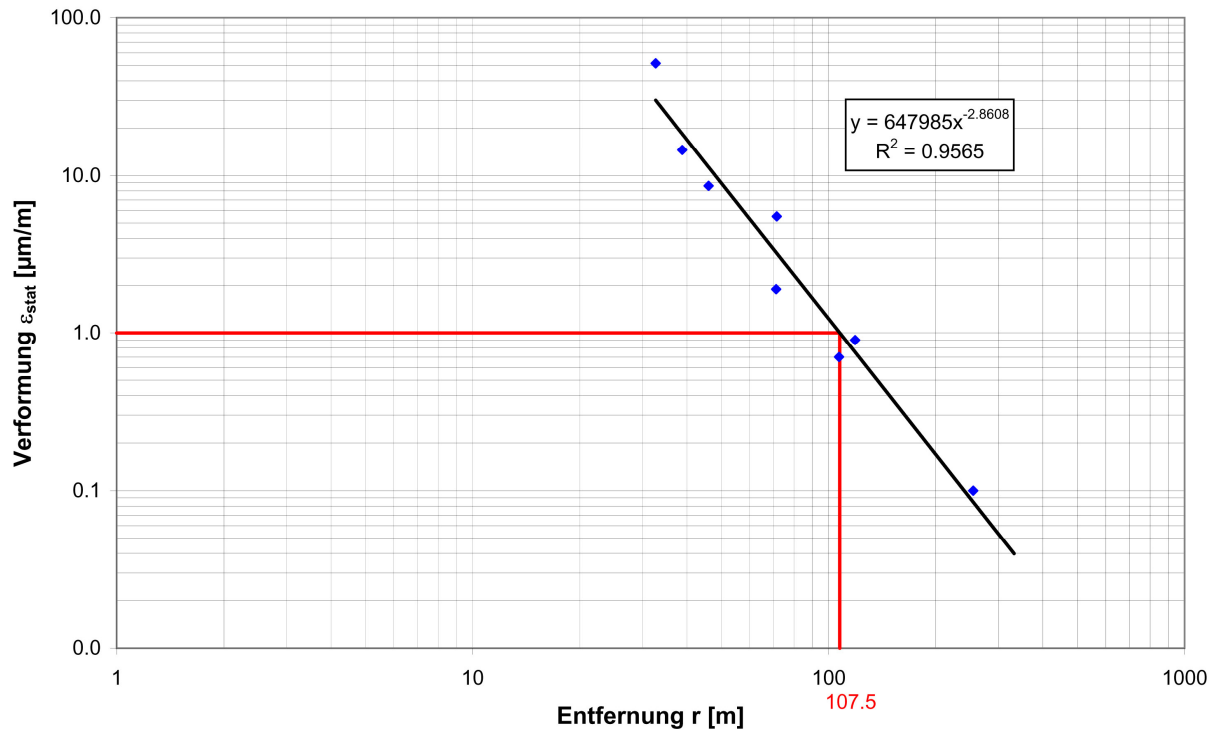


Bild 7.34: Verformungs-Entfernungs-Diagramm für den Tagebau Koschenberg zur Festlegung der „Zone der nachgewiesenen Verformung“ durch Dehnungsmessungen

| Zonen Nr. | Beschreibung der Bereiche | Bezeichnung der Zone | Einwirkung in m | Bemerkungen |
|-----------|--|--|--------------------------|---|
| | | detonierende Ladung - gezündete Sprenganlage | | Emulsionssprengstoff |
| 1 | Emissionsort ↓ Bereich für bleibende Veränderungen am Festgebirge/an Gebäuden (1 und 2 = Nahzone) | Zertrümmerungs- bzw. Riss- Bruchzone in der Vorgabe und zwischen den Ladungen | 3 - 8 m | supersonisch bis transsonisch (indifferent) |
| 2 | | Zone der nachgewiesenen Verformung; bei > 100 fachen Einwirkungen; Rissbildungen möglich | 8 m 8 bis 139 m | Schäden sind wahrscheinlich |
| 3 | Bereich ohne schädigende Einwirkungen auf die Bausubstanz | Zone der hohen dynamische Dehnungen $\leq 6 \mu\text{m/m}$ | 139 bis 230 m | Erschütterungen sind deutlich spürbar |
| 4 | Immissionsort (3 bis 6 = Fernzone) ↓ | Zone der geringen dynamische Dehnungen $< 6 \mu\text{m/m}$ und deutlich spürbare Erschütterungen vom zulässigen Anhaltswert bis 2,0 mm/s | 230 m 230 m bis 490 m | |
| 5 | Gebäude auch bei mehrfachen, in Abständen erfolgten Sprengungen | Zone der fehlenden dynamischen Dehnungen und spürbaren Erschütterungen 2,0 mm/s bis 1,0 mm/s | 490 m > 490 - 700 m | Erschütterungen sind weniger spürbar |
| 6 | Ohne Schädigung | Zone der schwach wahrnehmbaren Erschütterungen $< 1,0 \text{ mm/s}$ | 700 m > 700 m | |

Bild 7.35: Zonen der dynamischen Einwirkungen um eine Sprenganlage am Beispiel vom Tagebau Leukersdorf

7.3 Umweltrelevante Nutzung der Ergebnisse und die praktische Umsetzung

Mit dem dargestellten, physikalisch und messtechnisch nachgewiesenen Modell für die Bewertung von Sprengerschütterungsimmissionen können statistisch gesicherte

Impuls-Abstands- und
Energie-Abstandsbeziehungen

sowohl für die indirekte Größe der Schwinggeschwindigkeit als auch für die direkte Größe der dynamischen Dehnung berechnet werden. Es gibt keine allgemeingültige Beziehung für die Erschütterungsimmissionen. Für jedes Objekt und jeden Tagebau muss auf einer gesicherten Datengrundlage die jeweilige Beziehung (9), (10), (12) oder (13) erarbeitet werden. Ändert sich der Sprengstoff hinsichtlich seiner Dichte und Detonationsgeschwindigkeit deutlich, ist eine neue Untersuchung erforderlich. Die bisherige Vorgehensweise mit den Lademengen-Abstandsbeziehungen ist statistisch nicht gesichert und berücksichtigt keine Sprengstoffeigenschaften. Durch das neue Modell und bei konsequenter Anwendung der oben genannten Beziehungen kann man durch Änderung der Parameter

- Bohrlochdurchmesser
- Bohrlänge/Wandhöhe
- Detonationsgeschwindigkeit und Sprengstoffdichte
- Anpassung der Zündfolge nach den Prinzipien der Impulstheorie

die Erschütterungsimmissionen bewusst beeinflussen und umweltfreundlich je nach örtlichen Bedingungen gestalten.

Die Möglichkeit sehr große Sprengungen nach den Prinzipien der Impulstheorie auslegen zu können, ohne dass die Sprengerschütterungsimmissionen ansteigen, zeigt eine weitere umweltrelevante Verbesserung. Die Häufigkeit der Sprengungen kann pro Jahr deutlich verringert werden. Auf diese Weise werden nicht nur Kosten durch konzentrierte Gewinnung eingespart, sondern die Belästigung der in der Umgebung ansässigen Bewohner gemindert. Erschütterungen werden somit weniger häufig ausgelöst und diese bleiben im zulässigen Rahmen eines Tagebaues. Mit den Möglichkeiten zur Minimierung von Sprengerschütterungsimmissionen kann der Praxis ein Mittel in die Hand gegeben werden, die die Akzeptanz der Gewinnungsbetriebe erhöhen und die Wirtschaftlichkeit in keiner Weise reduzieren wird. Die Messung der dynamischen Dehnung kann bis zur detonierenden

Bohrlochladung erfolgen und bietet eine genaue Datengrundlage sowohl für die Verformung des Untergrundes als auch für die Beurteilung der Erschütterungen. Die Dehnungsmessungen sollten eine größere Verbreitung finden. Aus diesen Messungen lassen sich im Gegensatz zu den Schwinggeschwindigkeitsmessungen genauere Schlussfolgerungen für die Umweltbeeinflussung ziehen. Auf der Grundlage von entsprechenden Dehnungsmessungen mit dem FBG-Sensor kann im Nahbereich eine „Zone der nachgewiesenen Verformung“ abgegrenzt werden, in der bei Dauereinwirkung Rissbildungen theoretisch möglich sind. Außerhalb dieser Zone sind zwar deutlich spürbare Erschütterungen zu erwarten, die allerdings physikalisch begründbar und mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Schäden an Bauwerken und Gebäuden bewirken oder auslösen. Mit dieser physikalisch belegbaren Vorgehensweise können die in der Bundesrepublik häufigen Beschwerden durch Sprengerschütterungen auf eine neue Art und Weise beigelegt oder durch Veränderung der Sprengtechnik ausgeglichen werden. Das bedeutende Forschungsziel, die eingesetzten Sprengstoffe ohne Erhöhung der Lademenge energetisch besser auszunutzen wurde auf zwei Wegen nachgewiesen. Zum einen kann nur durch das Auslegen der Zündfolge nach der Impulstheorie der wirksame Detonationsdruck erhöht sowie die Zertrümmerung des Haufwerkes gesteigert werden und zum anderen wurden durch Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers und Bohrrasters bzw. nur durch Vergrößerung des Bohrlochrasters die gleichen Zertrümmerungseffekte erzielt. Bei dem letzteren Vorgehen wurden 20 - 30 % Bohrmeter eingespart, ohne dass der Sprengstoffverbrauch erhöht wurde. Im Tagebau Winterberg wurde statt wie bisher ANFO-Sprengstoff durch Emulsionssprengstoff ersetzt. Die Zerstörung des Haufwerkes wurde einschließlich des Fußbereiches deutlich gesteigert und eine umweltfreundlichere, erschütterungsärmere Sprengtechnik umgesetzt. Wenn der Tagebau sich entschließt, die empfohlene, neue Bohr- und Sprengtechnik durchzusetzen, kann man mindestens den Einsatz eines Kleinbaggers mit Felsmeißel zur Nachzerkleinerung weitestgehend einsparen. Das bedeutet beispielsweise eine Dieselmotorkraftstoffersparnis von 49.800 l / Jahr; die frei werdende Arbeitskraft kann mit einer anderen Tätigkeit beauftragt werden.

Bei der Festlegung der Bohr- und Sprengstoffparameter auf der Grundlage des erarbeiteten Modells lassen sich die einzelnen Größen mit folgenden Arbeitsschritten optimal ableiten

- Festlegung der Sprengbarkeit durch Messung von Trennflächen und der gesteinsdynamischen Kennwerte
- Abschätzung des spezifischen Sprengstoffverbrauches nach (Bild 4.1 und 6.1)
- Einordnen der Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes in Bild 7.32 zwecks Feststellung der Wellenausbreitung/-überlagerung (super-, trans- oder subsonisch)

- Berechnung des wirksamen Detonationsdruckes und dessen Anpassung nach Festlegung der geometrischen Parameter bzw. der Zündfolge; die Zunahme des Detonationsdruckes verursacht eine höhere Zertrümmerung bzw. gute dynamische Wirkung; nimmt der Detonationsdruck ab, nehmen die Erschütterungen zu und die Zertrümmerung im Bereich der Vorgabe geht zurück
- Die Ladung kann nach der Optimierung der geometrischen Parameter sowie Festlegung der Zündfolge physikalisch begründbar berechnet werden
- Nach der systematisch erarbeiteten, den Prinzipien des entwickelten Modells folgenden Bohr-, Spreng- und Zündtechnik ist es möglich, einen umweltverträglichen und energiesparenden Abbau durchzuführen.

In der Forschungsarbeit wurden nur die wichtigsten Nutzeffekte zugunsten der besseren theoretischen Durchdringung aufgezeigt. Einige umweltrelevante Verbesserungen sind:

- Der nahezu ausschließliche Einsatz bzw. die Verwendung von Emulsionssprengstoffen, die keine oder nur geringe toxische Schwaden entwickeln und einen optimalen Detonationsdruck aufbauen können.
- Das Bohrlochraaster wurde in den Tagebauen Koschenberg, Leukersdorf, Winterberg und Elbingerode geändert, ohne die Ergebnisse zu verschlechtern. Damit konnten Bohrmeter bis 30 % eingespart werden.
- Die optimale energetische Ausnutzung der Sprengstoffe durch die Zündfolge erreichte eine bessere Stückigkeit der Haufwerke in Görsdorf, Elbingerode, Winterberg und Lüptitz. Die einsparende Auswirkung auf die Kosten kann quantitativ nicht belegt werden.
- Die bewusste Anwendung der Prinzipien der Impulstheorie beim Zünden von mehreren Bohrlöchern gleichzeitig und die gefundenen Zusammenhänge zwischen den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten sowie der Detonationsgeschwindigkeit der Sprengstoffe zur Entstehung von Machfronten führt durch Überlagerung zur besseren Zertrümmerung des Haufwerkes bei richtiger Wahl des Sprengstoffes.

Wegen der komplexen Vorgänge und der nicht möglichen Trennung der dynamischen von den quasistatischen Energieanteilen ist eine Gesamtbilanz der energetischen Abläufe einer Gewinnungssprengung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Die wesentlichen, sprengtechnischen Prozesse konnten energetisch belegt, berechnet und analysiert werden. Die Ergebnisse sind geeignet, die Herstellung von gebrochenen Natursteinen umweltfreundlicher und erschütterungsärmer im Bereich der Gewinnung zu gestalten. Nicht zuletzt werden die Arbeiten das Verständnis für die wichtigsten Zusammenhänge des Sprengvorganges verbessern und die Akzeptanz der Sprengerschütterungen bei den betroffenen Anliegern um die Tagebaue durch die physikalisch erklärbaren und sprengtechnisch gestaltbaren Wirkungen spürbar erhöhen. Die Umsetzung, Verbreitung und Veröffentlichung der Erkenntnisse wird wie folgt organisiert:

- Jeder Tagebau erhält eine eigene Dokumentation der Sprengversuche mit Vorschlägen zur Verbesserung der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik.
- Pressemitteilung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
- Veröffentlichungen in der Spreng-Info - Zeitschrift des Deutschen Sprengverbandes
- Lehrgänge an der Dresdner Sprengschule
- Vorträge und Workshops zur FRAGBLAST 9 in Granada/Spanien (International Society of Explosives Engineers) im September 2009
- Bei Zustimmung des Auftraggebers: Veröffentlichung des Forschungsberichtes
- Änderung der DIN 4150 - Teil 1 und 3.

Darüber hinaus werden Fachvorträge auf anderen Tagungen und Weiterbildungseinrichtungen angeboten.

Zweifellos konnten nicht alle Zusammenhänge und Abhängigkeiten gefunden werden. Durch geringe Messwertanzahl fehlte an einigen Stellen der umfassende Nachweis. Es bedarf weiterer Untersuchungen, um für verschiedene Wirksamkeiten wie beispielsweise der Verzögerungszeit die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten zu finden.

8 Empfehlungen und Schlussfolgerungen

8.1 Grundsätzliche Empfehlungen für die Versuchsbetriebe

Jeder Versuchsbetrieb erhält statistisch gesicherte Impuls- und Energie-Abstands-Schwinggeschwindigkeitsbeziehungen (Bild 7.12 bis 7.30), die im Sinne des Berichtes angewandt, keine Überschreitungen der zulässigen Erschütterungen auslösen werden. Werden Verminderungen der Sprengerschütterungen erforderlich, können die Tagebaubetriebe die empfohlenen Maßnahmen zur Reduzierung einleiten. Die Anwendung der bohr-, spreng- und zündtechnischen Empfehlungen zur erschütterungsarmen Sprengung sollen insbesondere in Leukersdorf, Görzdorf und Koschenberg umgesetzt werden. Im Tagebau Leukersdorf sollten die Sprenganlagen größer dimensioniert werden, um die Belästigung der Einwohner zu reduzieren und die Sprengtermine weniger häufig auflaufen zu lassen. Die Einzeldaten sind für jeden Tagebau extra in einem Anlagenband und als dokumentarischer Nachweis zusammengestellt.

Im Tagebau Elbingerode konnte aufgezeigt werden, dass auch größere Sprenganlagen, nach der Impulstheorie gezündet, abgetan werden können. Das wird zu Verbesserungen des betrieblichen Ablaufes und zu Einsparungen von Bohrmeterm führen. Der Einsatz von HEAVY-ANFO Sprengstoffen ist auf der 1. Sohle optimal gegeben und sollte künftig - hier lag offenbar eine falsche Beratung des Personals der Sprengstoff vertreibenden Firma vor - mit einem Bohrlochdurchmesser von mindestens 115 optimal 130 mm erfolgen. Mit der Vergrößerung des Bohrlochrasters kann eine Erweiterung des Bohrlochschemas entsprechend des spezifischen Sprengstoffverbrauches erfolgen. Hierzu muss der Hinweis gegeben werden, dass durch die geringeren Detonationsgeschwindigkeiten von HEAVY-ANFO die Erschütterungen ansteigen.

Für den Tagebau Görzdorf wird vorgeschlagen, das Bohrlochraster einheitlich geneigt zu bohren und die Bohrlöcher versetzt auszurichten. Die unterschiedlichen Vorgaben der ersten Reihe durch Mehrausbruch müssen auf der Grundlage einer entsprechenden Vermessung der Wand geladen werden. Auf diese Weise wird sich die Stückigkeit und Sohlenhaltigkeit nachhaltig verbessern.

Der Tagebau Koschenberg hat auf Grund der intensiven Klüftung der Metagrauwacke oftmals Probleme mit dem Ausbruchverhalten. Es wird empfohlen, wenn es für die Lokotrak-Brechertechnik möglich ist, die Abbauböschung \pm parallel einer Hauptklüftschar einzurichten (Bild 5.6). Bei der Ausnutzung der Schichtklüftung kann es in Faltenbereichen zu Rutschungen oder anderen standsicherheitlichen Problemen kommen. Das Bohrraster von 4 x 5 m ($a_R \cdot a_B$) kann beibehalten oder systematisch auf 4,2 x 4,8 m verändert werden. Der gelatinöse Sprengstoff sollte weitestgehend durch Emulsionssprengstoff und Booster im Bohrloch tiefsten ersetzt werden.

Für den Tagebau Leukersdorf sollten weiter Versuche mit einem größeren Bohrlochdurchmesser - wenn es die Erschütterungen erlauben - von 103 mm und einem Raster von 4,8 m Bohrlochabstand und 4,50 m Reihenabstand durchgeführt werden, um Bohrmeter zu sparen. In diesem Zusammenhang wäre die Planung größerer Sprengungen im Sinne dieser Arbeit von großem Vorteil, um durch Einschränkung der Anzahl der Sprengungen/Zeiteinheit die Belästigung der Anwohner zu verringern. Weiterhin wird vorgeschlagen, die Sprengungen gleichmäßiger zu bemessen. Der wirksame Detonationsdruck ist großen Streuungen (3.2 bis 11.4 GJ) unterworfen, die kein gleichmäßiges Sprengergebnis garantieren.

Die Bedingungen im Tagebau Lüptitz sind durch die säulige Absonderung recht kompliziert. Obwohl die Sprengungen gut dimensioniert und konzipiert waren, hat sich die stets geringe Ausladung der 1. Bohrlochreihe zur freien Fläche als ungünstige Randbedingung herausgestellt. Der Sprengverantwortliche handelt sicher mit dem gut gemeinten Sicherheitsgedanken, dass kein Steinflug aus der 1. Reihe entstehen soll. Mit einer gezielten Laservermessung ist die Ausladung der 1. Reihe möglich, so dass empfohlen wird, diese Vorgehensweise umzusetzen. Trotz der erzielten Verbesserungen war das Haufwerk aus der 1. Reihe sehr grobstückig und verzahnt. Jede Sprengung musste die 1. Reihe gewissermaßen aus dem hinteren Bereich ausbrechen helfen, was einerseits zur schlechten Haufwerksqualität und andererseits zu vergleichsweise hohen Erschütterungen geführt hat. Die Umstellung von zwei verschiedenen auf einen Emulsionssprengstoff brachte verbesserte Wirkungen und war zu dem kostengünstiger. Es wurde mit eigens durchgeführten mikroskopischen Gesteinsuntersuchungen festgestellt, dass der Rhyolith ein verschleißträchtiges, quarzreiches Grundmassegefüge aufweist. Der Verschleiß des Vorbrechers ist dem Rhyolith und dem groben Haufwerk zuzuordnen. Entschließt man sich zur Erhöhung des spezifischen Sprengstoffverbrauches wird sich die Durchsatzleistung und der Verschleiß am Vorbrecher verbessern.

Die Sprengungen im Tagebau Winterberg waren vergleichsweise zu den anderen Versuchsbetrieben vor den Veränderungen die am schlechtesten angepasst und für das Gebirge unzureichenden Verfahren. Die umgesetzten Verbesserungen betreffen:

- Zündung im Bohrlochtiefsten
- Veränderung des Bohrlochrasters
- Übergang zur Mehrreihensprengung
- Einsatz von Emulsionssprengstoffen.

Der gesamte Tagebaubetrieb ist zu dem bergmännisch schlecht und unsystematisch ausgelegt. Die Sprengungen sind an das modellierte Trennflächengefüge anzupassen und

als 3-4 Reihensprengung mit Emulsionssprengstoff auszulegen. Die Umsetzung einer modernen Bohr-, Spreng- und Zündtechnik wird zu erheblichen Einsparungen und zur Erhöhung der Sicherheit führen. So können die Meißelarbeiten deutlich eingeschränkt und jährlich mindestens 50.000 l Diesel eingespart werden. Im Landschafts- und Naturschutzgebiet des Harzes sind umweltrelevante Verbesserungen von regionaler Bedeutung.

8.2 Vorschläge zur Veränderung und Ergänzung der DIN 4150, Teil 1 und 3

Es wird in einer gesonderten Ausarbeitung dem DIN-Ausschuss für die DIN 4150, Teil 1 und 3 vorgeschlagen, die DIN 4150 in folgendem Sachverhalt zu ändern oder zu ergänzen:

- Die Lademenge pro Zündzeitstufe ist als Einfluss für die Sprengerschütterungsimmissionen statistisch und physikalisch nicht geeignet.
- Die Lademengen-Abstandsbeziehungen und „universelle“ Prognoseformeln sollten nach einer Übergangszeit nicht mehr Verwendung finden dürfen.
- Die Impuls- und Energie-Abstandsbeziehungen gelten als umfassend gesicherte, physikalisch erklärbare und in der Praxis nachgewiesene Regressionsgleichungen, die es für jeden Tagebau, jede Sprengstelle im Festgebirge zu ermitteln gilt. Die Einzelwerte der Messungen sind mit einer Mehrfachkorrelation in die Prognosebeziehung zu überführen.
- Der Dehnungssensor auf FBG-Basis sollte als Messsystem für Erschütterungen offiziell zugelassen werden.
- Die Zonen der dynamischen Einwirkungen um eine Sprenganlage einschließlich der damit verbundenen Aussagen sollte Gegenstand mit Fallbeispiel in der DIN werden.
- Es sollte geprüft werden, ob die Anhaltswerte der Dehnung und Schwinggeschwindigkeit als neue Normvorgabe zugelassen werden oder nicht.
- Die Sachverständigen für Erschütterungen und Sprengtechnik sind durch Information oder/und ergänzende Ausbildung mit der neuen Vorgehensweise vertraut zu machen.

8.3 Empfehlungen für die sprengstoffherstellende Industrie

Mit den Untersuchungen kann nachgewiesen werden, dass es für eine optimale Vorbereitung, Durchführung und Analyse von Sprengarbeiten in der Gewinnung von Gesteinsbaustoffen unerlässlich ist, folgende Sprengstoffeigenschaften genau zu kennen:

- Sprengstoffdichte
- Detonationsgeschwindigkeit (in-situ, möglichst im jeweiligen Festgebirge ermittelt)
- Schwadenvolumen
- Angaben zu den quantitativen Gasen der Schwaden nach der Sprengstoffumsetzung jeweils in Prozent
- chemische Zusammensetzung (sofern keine patentrechtlichen oder geschäftlichen Geheimnisse verletzt werden)

Die bisherigen Datenblätter der gelieferten Sprengstoffe enthalten recht ungenaue Angaben insbesondere zur Detonationsgeschwindigkeit. Es wird empfohlen, die Streubreite der Sprengstoffdichten und Detonationsgeschwindigkeiten anzugeben bzw. die Gültigkeit der Kennwerte entsprechend den Laborbedingungen. Vom Schwadenvolumen sollten ebenfalls die Streuung der Kennwerte vermittelt und die quantitative Zusammensetzung der Schwaden angegeben werden. Diese Empfehlung erfolgt vor dem Hintergrund, dass in der Sprengpraxis - außer beim Tunnelbau - viel zu wenig auf die umweltrelevanten Gasbildungen geachtet wird. Die Entscheidung, welche Sprengstoffe zum Einsatz kommen, regelt sich über Preis und Anwendungsfreundlichkeit. Die Emulsionssprengstoffe, HEAVY ANFO- und pulverförmigen ANFO-Sprengstoffe haben gegenüber den anderen Sprengstoffgemischen wie TNT-Slurries, gelatinöse Sprengstoffe und sonstige gelatinöse Stoffe enthaltende Mischungen kaum oder keine toxischen Anteile in den Sprengschwaden. Nicht zuletzt ist eine genaue Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der Sprengstoffe für wissenschaftliche Untersuchungen und Berechnungen erforderlich. Unter den derzeitigen Bedingungen ist eine solche tiefgründige Bewertung von Sprengstoffen für Energiemodelle nicht möglich oder nur sporadisch realisierbar [CO 96, HE 93, MY 73].

Danksagung

Die Bearbeiter bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung und Unterstützung des Forschungsvorhabens. Weiterhin bedanken wir uns bei den Sprengverantwortlichen und –berechtigten der Versuchsbetriebe für die Mitwirkung, der verantwortungsvollen Umsetzung und die flexible Zusammenarbeit, ohne die die Ergebnisse nicht hätten erreicht werden können. Aus diesen Gründen sind wir folgenden Fachkollegen und deren Mitarbeitern zu Dank verpflichtet:

| | |
|-----------------|-------------------------------------|
| Hr. H. Fischer | Tagebau Koschenberg |
| Hr. M. Zeipert | |
| Hr. U. Mann | Tagebau Leukersdorf |
| Hr. F. Heydecke | |
| Hr. R. Schmidt | Tagebaue Elbingerode und Winterberg |
| Hr. A. Volkmann | |
| Hr. G. Lau | Tagebau Lüptitz |
| Hr. Posdlich | Tagebau Görzdorf |
| Hr. Streletzki | |

Wir danken den Betriebsleitern aller Tagebaue für ihr Interesse und die Genehmigung der Versuchsdurchführung.

Fazit

Die vielfältigen und komplexen Ergebnisse der zahlreichen Sprengungen sowie deren Interpretation mittels der Impulstheorie erbrachten den Nachweis der gesteckten Forschungsziele, ohne dass im zeitlich abgesteckten Rahmen eine umfassende Auswertung vorgenommen werden konnte. Im Detail sind für jeden Tagebau gesonderte, wirtschaftlich wichtige und ökologisch verbessernde, nutzbare Ergebnisse ableitbar, die in gesonderten Berichten übergeben werden können.

Das neu entwickelte physikalische Modell zur Bewertung einer Sprengung und die Verknüpfung wichtiger Parameter ermöglicht weitere tragfähige Lösungsansätze wie beispielsweise:

- Aus dem wirksamen Detonationsdruck kann mit den gemessenen Daten sowohl die Impuls- als auch die Energiewirkung berechnet werden.
- Die super-, trans- und subsonische Stoßwellenausbreitung sollte nach der detonativen Sprengstoffumsetzung unter vergleichbaren Bedingungen kann hinsichtlich der festgestellten Wirkungen weiter statistisch gesichert untersucht werden.
- Der Einfluss der Verzögerungszeit von nichtelektrischen und elektronischen Zündern ist ein offenes Problem, welches mit den erarbeiteten, komplexen Wirkungsweisen herauszufinden wäre.
- Die elektronische Zündweise ist in verschiedenen Festgebirgen hinsichtlich der Resonanzwirkung systematisch auszutesten, um die sicheren Verzögerungszeiten und die Resonanzbildungen herauszufinden.
- Statistisch gesicherte Dehnungs- und Radarmessungen werden die erarbeiteten Zusammenhänge weiter verifizieren und die physikalischen Aussagen stabilisieren, damit die ausgelösten Spannungen resp. Impulse im Nahbereich der Bohrlöcher weiter spezifiziert werden können.
- Es wird empfohlen, die Angaben auf den Datenblättern der Sprengstoffe sind hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz zu überarbeiten.

Die umfassende energetische Bewertung des Ablaufes einer detonativen Sprengstoffumsetzung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt wegen der Komplexität noch nicht möglich. Es können nur bestimmte Anteile mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden, wie die der Erschütterungen, der kinetischen Energie des Haufwerkes und der Bohrlochladungen.

Literaturverzeichnis

- [BAC 08] BACHMANN, G.H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. & SCHWAB, M. (HRSG.) (2008): *Geologie von Sachsen-Anhalt*.- E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 689 S.
- [BA 00a] BAUMANN, I. & MÜLLER, B. (2000): Neues Messsverfahren für die Erfassung von Sprengerschütterungen und anderen dynamischen Einwirkungen im Bauwesen.- *Spreng-Info* 22(2):19-32.
- [BA 00b] Baumann, I. & Müller, B. (2000): Dehnungsmessstreifen statt Schwinggeschwindigkeitsmessungen.- *31. Int. Tagung Sprengtechnik 2000*, Linz, Österreich.
- [BA 00c] BAUMANN, I., MEISSNER, J., MÜLLER, B. & HOHLFELD, TH. (2000): Die Verbesserung des Ergebnisses von Gewinnungssprengungen insbesondere durch Veränderung der Zündfolge.- *Proc. of EFEE's 1st World Conf. on Explosives and Blasting Technique 2000*, Munich, Germany, HOLMBERG, R. (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 129-139.
- [BE 90] BERTA, G. (1990): *Explosives – An engineering tool*.- Italesplosivi, Milana, Italy.
- [BE 99] BLAIR, D. P. (1999): Statistical models for ground vibration and airblast.- *Int. Jour. of Blasting and Fragmentation*, 3:325-364.
- [BL 06] BLAIR, D. & MINCHINTON, A. (2006): Near-field blast vibration models.- *Proc. of the FRAGBLAST 8, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2006, Santiago, Chile, pp. 152-159.
- [BO 03] BODE, I., HORT, M. MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2003): Messungen mit Radar- und Dehnungssensoren weisen die Impulswirkung von Sprengungen im Festgebirge nach.- *Spreng-Info* 26(3):35-42.
- [BÖ 82] BÖTTCHER, G. (1982): *Forschungsbericht V 1982 – Sprengen, Oberpfälzer Wald und Frankenwald*.- BGR, Hannover, 97 S., mit Datensammlung
- [BU 80] BURSCHSTEIN, M. F. ET AL. (1980): *Primenenie massowich vsrívov w stroitjelstve*.- Nedra, Moskva, 256 S.
- [CH 83] CHIAPPETA, F. R. & BERG, D. G. (1983): Increasing productivity through field controöl and high-speed photography.- *Proc. of FRAGBLAST 1, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 1983, Lulea, Schweden.
- [CO 96] COOPER, P. W. (1996): *Explosives engineering*.- Wiley-VCH, USA.
- [CU 04] CUNNINGHAM, C. & SZENDREI, TH. (2004): Cavity expansion by hypervelocity impact applied to blasthole expansion by detonation.- *Proc. of 30th Ann. Conf. on Explosives and Blasting*, ISEE, 2004, New Orleans, Lousiana, USA, pp. 361-372.
- [DI 1/97] DIN 4150 (1997): *Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1 Allgemeine Grundlagen* (VA 1997).- Beuth, Berlin.
- [DI 2/99] DIN 4150 (1999): *Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2 Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden* (Juni 1999).- Beuth, Berlin.
- [DI 3/99] DIN 4150 (1999): *Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3 Allgemeine Einwirkungen auf baulichen Anlagen* (Februar 1999).- Beuth, Berlin.

- [DI 4/76] DIN 66145 (1976): *Darstellung von Korn- (Teilchen) Größenverteilungen; RRSB Netz* (April 1976).- Beuth, Berlin.
- [DIT 01] DIN-Taschenbuch 289 (2001): *Schwingungsfragen im Bauwesen*.- Beuth, Berlin.
- [DO 85] DOWDING, CH. H. (1985): *Blast vibration monitoring and control*.- Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [DO 00] DOWDING, CH. H. (2000): *Construction Vibrations*.- Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [EI 70] EISSMANN, L. (1970): Geologie des Bezirkes Leipzig - Eine Übersicht.- *Natura regionis Lipsiensis*, H 1 und 2, Naturwissenschaftliches Museum Leipzig, 172 S.
- [ES 06] ESEN, S. (2006): A new non-ideal detonation code for evaluating the performance of commercial explosives.- *Proc. of the FRAGBLAST 8, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Santiago, Chile 2006, pp. 160-168.
- [EX 00] Ex, W. (2000): Einsatz von Boostern beim Gewinnungssprengungen.- *31. Int. Tagung Sprengtechnik 2000*, Linz, Österreich.
- [FI 06] FISCHER, H., ZEIPERT, M., MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2006): Praktische Ergebnisse von Großbohrlochsprengungen auf der Grundlage der Impulstheorie im Tagebau Koschenberg.- *Spreng-Info* **28**(1):17-23.
- [FL 93] FLESCHE, R. (1993): *Baudynamik, praxisgerecht – Band 1 Berechnungsgrundlagen*.- Bauverlag, Wiesbaden-Berlin.
- [FO 80] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESSEN (1980): *Merkblatt über Felsgruppenbeschreibung für bautechnische Zwecke im Straßenbau*.- Köln.
- [FO 92] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESSEN (1992): *Merkblatt über Felsbeschreibung für den Straßenbau*.- Köln.
- [FRA 09] FRANKE, D. (2009): *Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Wörterbuch*.- URL: <http://www.regionalgeologie-ost.de>, März 2009.
- [FR 96] FRANKLIN, J. & KATSABANIS, T. (eds.) (1996): Measurement of blast fragmentation.- *Proc. of the FRAGBLAST 5, Workshop on measurement of blast fragmentation*, 1996, Montreal, Canada, Balkema, Rotterdam.
- [GÖ 76] GÖLL, G. & HELFRICHT, R. (1976): Festigkeitskenngrößen von Hartgesteinen und deren Einfluss bei der Zerkleinerung.- *Baustoffindustrie*, **19**(A4):18-24, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [HA 06] HAMDI, E., DU MOUZA, J. & LE CLEAC'H, J. M. (2006): Micro-fragmentation energy evaluation in rock blasting.- *Proc. of the FRAGBLAST 8, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2006, Santiago, Chile, pp. 134-139.
- [HEN 06] HENNINGSEN, D. & KATZUNG, G. (2006): *Einführung in die Geologie Deutschlands*.- 7. überarb. u. erweit. Aufl., Elsevir – Spektrum Akademischer Verlag, München, 234 S.
- [HIN 76] HINZE, C. (1976): *Geologische Karte von Niedersachsen, Blatt Seesen Nr. 4127 M 1: 25.000*.- Redaktion: BÜCHNER, K.-H., DUPHORN, K., FAUTH, H., GRIMMELMANN, W., HEINEMANN, B. MAIER, R., SIMON, P., SPERLING, H. & STEIN, V.; Herausgeber: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG, Hannover.

- [HIN 98] HINZE, C., JORDAN, H., KNOTH, W., KRIEBEL, U. & MARTIKLOS, G. (1998): *Geologische Karte Harz M 1 : 100.000*.- Herausgeber: Geologisches LANDESAMT SACHSEN-ANHALT in Zusammenarbeit mit dem NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG, Halle (Saale).
- [HN 87] HINZEN, K.-G. & LÜDELING, R. (1987): *Forschungsbericht 87-105 02809 – Minderung der Erschütterungsimmissionen durch Entwicklung problemangepasster Sprengtechniken*.- BGR, Hannover, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 104 S. mit Anhang A und B (Dokumentation der in-situ Aussagen).
- [HIR 66] HIRSCHMANN, G. (1966): Assynthetische und variszische Baueinheiten im Grundgebirge der Oberlausitz. - *Freiberger Forschungshefte, C 212*:146.
- [HIR 69] HIRSCHMANN, G. & BRAUSE, H. (1969): Regionaler und tektonischer Überblick. In: *Alt- und Vorpaläozoikum des Görlitzer Schiefergebirges und der westlichsten Westsudeten.– Exkursionsf. u. Veröffentl. GGW, 32*:6-19, Berlin.
- [HI 01] HIRSEMANN, A. (2001): *Systematische digitale Haufwerksanalysen in verschiedenen Tagebaubetrieben mittels Verfahren Unifrag® im Vergleich zu Wipfrag®*.- Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Studiengang Markscheidewesen und Geodäsie, Freiberg, 09.11.2001, [unveröffentlicht].
- [HO 98] HOHLFELD, TH., KAISER, J. & MÜLLER, B. (1998): Die rechnerische Prognose von Sprengerschütterungsimmissionen in Abhängigkeit von der Sprengtechnik.- *Nobel Hefte, 64*(2/3):103-114.
- [HO 99] HOHLFELD, TH. & MÜLLER, B. (1999): Modeling of blasts in rock masses with varying goals.- *Proc. of the FRAGBLAST 6, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, 1999*, Johannesburg, South Africa, pp. 221-227, Balkema, Rotterdam.
- [HOT 95] HOTH, K., TISCHENDORF, G. & BERGER, H.-J. (1995): *Geologische Karte Erzgebirge/Vogtland M 1 : 100.000*.- Redaktion: HOTH, K., WASTERNAK, J., BERGER, H.-J., BREITNER, K., MLČOCH, B. & SCHOVÁNEK, P.- Herausgeber: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, Dresden.
- [HOL 99] HOLLSTEIN, H. (1999): *Strukturgeologisch-fazielle Kartierung, Kluftanalysen, Vorratsberechnung, Abbauplanung und Modellierung des Kalksteinbruches Winterberg bei Bad Grund*.- Diplomkartierung und Diplomarbeit, TU Clausthal-Zellefeld, 108 S. [unveröffentlicht].
- [HOP 98] HOPLER, R. B. (1998): *ISEE Blasters Handbook*.- 17th ed., Cleveland, USA.
- [HR 02] HORT, M., SEYFRIED, R. & VÖGE, M. (2002): Radar Doppler velocity of volcanic eruptions – Theoretical considerations and quantitative documentation of changes in eruptive behaviour at Stromboli volcano.- *Geophy. Int.*, Italy [revised].
- [HOY 04] HOYER, O., MANN, U., MÜLLER, B., BÖHNKE, R. & NIEDZWIEDZ, H. (2004): Blastpillow® – Definiertes Luftkissen im Bohrlochtiefsten senkt den Bohrmeter-, Sprengstoffaufwand und die Erschütterungsimmissionen.- *Spreng-Info 26*(3):26-31.
- [HU 99] HUSTRULID, W. (1999): *Blasting principles for open pit mining: Vol. 1 General design concepts; Vol 2. Theoretical foundations*.- Balkema, Rotterdam.

- [JE 81] JENDERSIE, H. (1981): *Sprengtechnik im Bergbau*.- Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- [JI 95] JIMENO, C. L., JIMENO, E. L. & CARCEDO, F. J. A. (1995): *Drilling and blasting of rocks*.- Balkema, Rotterdam.
- [KI 03] KIEHL, J. R. & WERFLING, J. (2003): Measurements and analyses of blasting vibrations.- *ISRM Technol. Roadmap for Rock Mechanics*, Institute of Mining and Metallurgy, South Africa, pp. 635-640.
- [KL 74] KLENGEL, K.-J., MÜLLER, B. & SACHSE, R. (1974): Bemerkungen zum spezifischen Sprengstoffverbrauch bei Felssprengungen.- *Wiss. Zeitschr. Hochschule für Verkehrswesen „F. List“ Dresden*, **21**(3):513-524.
- [KO 58] KOCH, H. W. (1958): Zur Möglichkeit der Abgrenzung von Lademengen bei Steinbruchsprengungen nach festgestellten Erschütterungsstärken.- *Nobel Hefte*, **24**:92-96.
- [KR 00] KRENTZ, O., WALTER, H., BRAUSE, H., HOTH, K., KOZDRÓJ, W., CYMERMAN, Z., OPLETAL, M., STEPANKA, M., VALEČKA, J., PROUZA, V., KACHLÍK, V. & CAJZ, V. (2000): *Geologische Karte Lausitz - Jizera - Karkonosze (ohne känozoische Bildungen) M 1 : 100.000*.- Herausgeber: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, Freiberg/Sa., D; Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, P; Český geologický ústav, Praha, CZ.
- [LA 63] LANGFORS, U. & KIHLSSTRÖM, B. (1963): *Modern rock blasting*.- Almqvist & Wiksell, Stockholm.
- [LEO 95] LEONHARDT, D. (1995): *Geologische Übersichtskarte des Freistaates Sachsen M 1 : 400.000 Karte ohne känozoische Bildungen*.- Redaktion: HOTH, K., EILERS, H. & FRITSCHKE, H.; Herausgeber: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, Freiberg/Sa.
- [LE 99] LEWANDOWSKI, T., KEITH, G., CROUCHER, M. & SINGH, D. P. (1999): The impact of surface blasting on underground opening – Geotechnical assessment.- *Proc. of the FRAGBLAST 6, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 1999, Johannesburg, South Africa, pp. 131-137, Balkema, Rotterdam.
- [LI 86] LILLY, P. H. (1986): An empirical method of assessing rock mass blastibility.- *Proc. of the 4th Large Open Pit Mining Conf.*, October 1986, Parkville, Viktoria, Australia, pp. 89-92.
- [LIN 94] LINNEMANN, U. (HRSG.) (1994): *Das Saxothuringikum – Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen*.- Lausitzer Druck- und Verlagshaus, Bautzen, 159 S.
- [LO 03] LÓPEZ, L. M., SANCHIDRIÁN, J. A., PIEDRA, L. J. & RIOS, J. (2003): Shock wave pressure in underground explosions.- *Proc. of EFEE's 2nd World Conf. on Explosives and Blasting Technique 2003*, Prague, Czech Republic, HOLMBERG, R. (ed), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 441-447.
- [LOZ 07] LOZAN, J. L. & KANSCH, H. (2007): *Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler – Wissenschaftliche Auswertungen*.- Hamburg.
- [LÜ 86] LÜDELING, R. & HINZEN, K.-G. (1986): Erschütterungsprognose und Erschütterungskataster – Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Sprengerschütterungen.- *Nobel Hefte*, **213**:105-123.

- [MA 04] MANN, U. & MÜLLER, B. (2004): Spaltsprengungen zur Herstellung einer profilgerechten Böschung mit Sicherungsmaßnahmen.- *Spreng-Info* **26**(1):16-22.
- [MA 05] MANN, U., HOYER, O., MÜLLER, B., BÖHNKE, R. & NIEDZWIEDZ, H. (2005): Erfahrungen und Auswertungen von Versuchssprengungen beim Einsatz von Luftkissen (Blastpillow®) im Bohrloch tiefsten.- *Spreng-Info*, **27**(1):54-58.
- [MR 01] MARTIKLOS, G.; BEUTLER, G. & EHLING, B.-C. (2001): *Geologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt M 1 : 400.000 Karte ohne känozoische Bildungen*.- Herausgeber: LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGWESEN SACHSEN-ANHALT, Halle (Saale).
- [MAR 06] MARTIENBEN, TH. & MÜLLER, B. (2006): Komplexe Anwendung der Photogrammetrie für die Sprengtechnik und Tagebausicherheit.- *Spreng-Info* **28**(3):37-44.
- [MC 04] MCKENZIE & HOLLEY, K. G. (2004): A study of damage profiles behind blasts.- *Proc. of 30th An. Conf. on Explosives and Blasting*, ISEE, 2004, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 203-214.
- [ME 01] MEISSNER, J., BAUMANN, I. & MÜLLER, B. (2001): Blast vibration and strain monitoring by fibre Bragg grating sensors.- *14th OFS – Optical Fibre Sensors Conf.*, 11-13 October 2001, Venice, Italy, pp. 223-228.
- [MY 73] MEYER, R. (1973): *Explosivstoffe*.- 3. Aufl., Chemie Verlag, Weinheim / Bergstraße.
- [MÖ 64] MÖBIUS, G. (1964): Die geotektonische Entwicklung des Grundgebirges im Raum Erzgebirge – Elbtalzone – Lausitzer Grundgebirge – Westsudeten.- *Abh. Dt. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Chem., Geol., Biol.*, **5**:1-114, Berlin.
- [MO 93] MOHR, K. (1993): *Geologie und Minerallagerstätten des Harzes*.- 2. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 496 S.
- [MO 04] MOSER, P. & GRASEDIECK, A. (2004): Rock specific breakage energy functions derived from lab-scale blast experiments.- *Proc. of 30th Ann. Conf. on Explosives and Blasting*, ISEE, 2004, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 41-52.
- [MO 05] MOSER, P. (2005): Less fines in aggregate and industrial minerals production – results of an European research project.- *Proc. of EFEE's 3rd World Conf. on Explosives and Blasting Technique 2005*, Balkema, Rotterdam, pp. 567-574.
- [MOS 76] MOSINEZ, V. N. (1976): *Der zerstörende und seismische Effekt von Sprengungen in Gesteinen*.- Nedra, Moskau.
- [MÜL 08] MÜLLER, A. (2008): *Dünnschliffanalysen an Proben des „Breiten Berges“ im Tagebau Lüptitz*.- [unveröffentlicht].
- [MÜ 71] MÜLLER, B. (1971): *Systemanalyse Röcknitz-Hohnstädt - Die Erarbeitung gebirgsmechanischer Kennziffern und ihre Beziehungen zum sprengtechnischen Verhalten des Gebirges*.- unveröffentlichter Bericht, 52. S.
- [MÜ 74] MÜLLER, B. (1974): Die naturgegebenen Einflussfaktoren einer Felssprengung.- *Neue Bergbautechnik*, **4**(8):602-610, Leipzig.
- [MÜ 79] MÜLLER, B. (1979): Optimale Sprengungen im Fels.- *Informationstag für Sprengtechnik 1979*, Linz, Österreich, S. 44-63.

- [MÜ 80] MÜLLER, B. (1980): *Die Optimierung der Sprengtechnologie zwecks Gewinnung von Haufwerken bestimmter Korngrößenzusammensetzung*.- F/E-Bericht, Hochschule für Verkehrswesen, WB, Geotechnik, Dresden, 30.11.1980, 72 S.
- [MÜ 88] MÜLLER, B. (1988): Projektierung von Gewinnungssprengungen in verschiedenen Festgebirgen.- *9. Int. Fachtagung Sprengwesen*, Gera, Proc. **AG 1**.
- [MÜ 90] MÜLLER, B. (1990): Erarbeitung der Sprengtechnologie für verschiedene Festgebirge und die Beurteilung des Sprengergebnisses.- *Nobel Hefte*, **5(3/4)**:92-102.
- [MÜ 91a] MÜLLER, B. (1991): Praktische Ergebnisse von Großbohrlochsprengungen mit doppelter Zündung.- *Spreng-Info*, **13(2)**:36-39.
- [MÜ 91b] MÜLLER, B. (1991): Großbohrlochsprengungen mit redundanter Zündung – Eine Möglichkeit zur Minimierung von Erschütterungen.- *22. Int. Informationstag für Sprengtechnik*, Linz, Österreich, S. 3-18.
- [MÜ 95] MÜLLER, B. & WÜSTE, U. (1995): Möglichkeiten zur Minimierung von Erschütterungen bei Großbohrlochsprengungen.- *Spreng-Info*, **17(1)**:13-22.
- [MÜ 96a] MÜLLER, B. & HOHLFELD, TH. (1996): Verbesserung der Prognose von Sprengerschütterungen.- *Spreng-Info*, **18(2)**:20-31.
- [MÜ 96b] MÜLLER, B. (1996): Minimierung von Erschütterungen bei Großbohrlochsprengungen.- *Glückauf*, **5**.
- [MÜ 97] MÜLLER, B. (1997): Adapting blasting technologies to the characteristics of rock masses in order to improve blasting results and reduce blasting vibrations.- *Int. Jour. for Blasting and Fragmentation*, **1**:361-378, Balkema, Rotterdam.
- [MÜ 98a] MÜLLER, B. (1998): Praktische Beeinflussung der Sprengwirkung vermindert Erschütterungen und vermeidet Steinflug.- *9. Int. Informationstagung für Sprengtechnik*, Linz, Österreich, 19. S.
- [MÜ 98b] MÜLLER, B. (1998): Das Phänomen der Trennflächen und ihre Bedeutung für geotechnische Aufgabenstellungen.- *Freiberger Forschungshefte*, **C 475**:173-200.
- [MÜ 99] MÜLLER, B. (1999): Grundlegende Zusammenhänge zwischen felsmechanischen Eigenschaften des Festgebirges und den sprengtechnischen Parametern.- *30. Int. Informationstagung für Sprengtechnik*, Linz, Österreich, 17. S.
- [MÜ 01a] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2001): A momentum based new theory of blast design.- *10th High Tech Seminar*, 22-26 July 2001, Nashville, USA, **V**:3-44.
- [MÜ 01b] MÜLLER, B., HOHLFELD, TH., BAUMANN, I., MEISSNER, J. & DORNBLUT, P. (2001): Die Impulstheorie – Eine neue Möglichkeit zur Modellierung und Berechnung von Sprenganlagen.- *Spreng-Info*, **24(3)**:15-22.
- [MÜ 01c] MÜLLER, B. (2001): Impulstheorie – Eine neue Berechnung und Bewertung von Sprenganlagen.- *32. Int. Informationstagung für Sprengtechnik*, Linz, Österreich, 22. S.
- [MÜ 02a] MÜLLER, B. (2002): Impulstheorie – Eine neue Berechnung von Sprenganlagen und Bewertung und Bewertung von Sprengerschütterungen.- *5. Symp. Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen*, EMPA Dübendorf, Schweiz, 17 S.

- [MÜ 02b] Müller, B. & Böhnke, R. (2002): Theoretical simulation and practical results at the optimization of blasts in rock masses based on momentum theory.- *Proc. of the FRAGBLAST 7, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2002, Beijing, China, pp. 226-235, Balkema, Rotterdam.
- [MÜ 03a] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2003): Momentum theory – A new calculation of blast design and assessment of blast vibrations.- *Proc. of the 29th Ann. Conf. on Explosives and Blasting*, ISEE, 2003, Nashville, USA, pp. 273-283.
- [MÜ 03b] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2003): Verbesserung des Sprengergebnisses und Verringerung von Erschütterungen durch Anwendung der Impulstheorie bei Gewinnungssprengungen.- *Proc. of EFEE's 2nd World Conf. on Explosives and Blasting Technique 2003*, Prague, Czech Republic, HOLMBERG, R. (ed), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 313-321.
- [MÜ 03c] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2003): Weltneuheit – Gesicherte Sprengerschütterungsprognose.- *Spreng-Info*, **26**(2):33-41.
- [MÜ 03d] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2003): Neue – statistisch gesicherte – Sprengerschütterungsprognose.- *6. Symp. Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen*, EMPA Dübendorf, Schweiz, 16. S.
- [MÜ 03e] MÜLLER, B. (2003): Fortschritte in der Felsmechanik für den Verkehrsbau.- *Proc. „40 Jahre Geotechnik an der Hochschule für Verkehrswesen (HTW) Dresden“*, S. 36-47.
- [MÜ 04a] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2004): A new method for the prediction of blast vibrations and suggestions with respect to uniform reference values for short-time vibrations.- *Proc. of 30th Ann. Conf. on Explosives and Blasting*, ISEE, 2004, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 215-231.
- [MÜ 04b] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2004): Zünden von Sprenganlagen für Gewinnungssprengungen nach der Impulstheorie.- *Spreng-Info*, **26**(3)19-25.
- [MÜ 05/06] MÜLLER, B. (2005/2006): Sprengerschütterungen sind beherrschbar – Teil 1 (2005).- *MIRO – Mineralische Rohstoffe*, **8**(2005):18-23; Teil 2.- *MIRO – Mineralische Rohstoffe*, **1**(2006):19-22.
- [MÜ 06a] MÜLLER, B., MEISSNER, J. & THIEL, T. (2006): Results of continuous in-situ stress measurement with optical strain sensors.- *Proc. In-situ Rock Stress*, LU, LI, KJØRHOLT & DAHLE (eds.), Taylor & Francis Group, London, pp. 249-256.
- [MÜ 06b] Müller, B. (2006): Empfehlungen von geotechnisch-felsmechanischen Klassifikationen des Festgesteines und Festgebirges für den Felsbau.- *35. Geomechanik Kolloquium*, November 2006, *Veröff. Des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg*, **5**:187-201.
- [MÜ 07a] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2007): The physically interpretable and statistically proved forecast and evaluation of blast vibrations.- *Proc. of the EVACES'07 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, Porto, Portugal, 24-26 October 2007, pp. 125-126.
- [MÜ 07b] MÜLLER, B., BAUMANN, I. & MEISSNER, J. (2007): The dynamic strain sensor – an optical alternative to geophone measurements.- *Proc. of the EVACES'07 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, Porto, Portugal, 24-26 October 2007, pp. 169-178.

- [MÜ 07c] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2007): Comparison of different methods of measuring and calculation blast vibrations in rock mass.- *Proc. of EFEE's 4th World Conf. on Explosives and Blasting Technique*, Vienna, Austria, 9-11 September 2007, pp. 127-138, Padstow-Loughborough (UK): Agora Partnership Ltd.
- [MÜ 08a] MÜLLER, B., DREBENSTEDT, C., HAUSMANN, J., MARTIENBEN, TH., NIEDZWIEDZ, H. & ORTUTA, J. (2008): Ergebnisse zur Realisierung einer umweltfreundlichen Sprengtechnik.- *Spreng-Info*, **30**(3):37-48.
- [MÜ 09a] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2009): Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Umweltfreundliche Sprengtechnik“.- *Proc. Tagebautechnisches Kolloquium 2009*, TU Bergakademie Freiberg, 6 February 2009, S. 36-56.
- [MÜ 09b] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2009): Control of rock fragmentation and muck pile geometry during production blasts (Environmentally friendly blasting technique).- *Proc. of the FRAGBLAST 9, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2009, Cranada, Spain [accepted and in press].
- [MÜ 09c] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2009): Prediction and minimisation of vibrations during production blasts Environmentally friendly blasting technique).- *Proc. of the FRAGBLAST 9, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2009, Cranada, Spain [accepted and in press].
- [ML 63] MÜLLER, L. (1963): *Der Felsbau – Band 1.*- Enke, Stuttgart, 624 S.
- [ON 06] ONEDERRA, J. & RIIHIOJA, K. (2006): An alternative approach to determine the uniformity index of ROSIN-RAMMLER based fragmentation models.- *Proc. of the FRAGBLAST 8, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2006, Santiago, Chile, pp. 193-199.
- [OR 02] ORIAD, L. L. (2002): *Explosives engineering, construction vibrations and geotechnology.*- ISEE, Cleveland, USA.
- [OU 06] OUCHTERLONY, F. & MOSER, P. (2006) : Likeness and differences in the fragmentation of fullscale and model-scale blasts.- *Proc. of the FRAGBLAST 8, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2006, Santiago, Chile.
- [PÄ 08] PÄLCHEN, W. & WALTER, H. (HRSG.) (2008): *Geologie von Sachsen – Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte.*- E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 537 S.
- [PE 94] PERSSON, P.-A., HOLMBERG, R. & LEE, J. (1994): *Rock blasting and explosives engineering.*- CRC Press, Boca Raton, New York.
- [PES 77] PESCHEL, A. (1977): *Natursteine.*- Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 390 S.
- [PI 62] PIETZSCH, K. (1962): *Geologie von Sachsen.*- Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 870 S.
- [RO 98a] ROSSMANITH, H. P., UENISHI, K., KOUZNIAC, N. & DAEHNKE, A. (1998): Der Einfluss der Detonationsgeschwindigkeit auf das dynamische Verhalten des Gebirges und die Bruchnetzentwicklung.- *Spreng-Info*, **20**(2):27-34.
- [RO 98b] ROSSMANITH, H. P. (1998): Detonation, Bohrlochaufbruch und dynamische Rissausbreitung.- **29. Int. Informationstagung für Sprengtechnik**, Linz, Österreich, 7. S.

- [RO 99] ROSSMANITH, H. P. (1999): Einführung in die mechanischen Grundlagen der Sprengtechnik.- *30. Int. Informationstagung für Sprengtechnik*, Linz, Österreich, 11 S.
- [RO 00] ROSSMANITH, H. P. (1999): The influence of delay timing on optimal fragmentation in electronic blasting.- *Proc. of EFEE's 1st World Conf. on Explosives and Blasting Technique 2000*, Munich, Germany, HOLMBERG, R. (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 141-147.
- [RO 01] ROSSMANITH, H. P. & MÜLLER, B. (2001): A momentum and energy based new theory of blast design and assessment.- *Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Electronic Blasting*, 23-25 September 2001, Nice, France.
- [RO 04] ROSSMANITH, H. P. (2004): What you always wanted to know about blast waves in blocky benches.- *Proc. of 30th An. Conf. on Explosives and Blasting*, ISEE, 2004, New Orleans, Louisiana, USA, Vol. 3, pp. 439-454.
- [SA 02a] SANCHIDRIÁN, J. A., SEGARRA, P. & LÓPEZ, L. M. (2002): Energy balance in blasting.- *Ed. 2nd Technical Report no. 28, Less Fines Project*, E.U. contract GIRD-CT-2000-00438, Madrid, Spain, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- [SA 02b] SANCHIDRIÁN, J. A., SEGARRA, P. & LÓPEZ, L. M. (2002): Blasting performance in El Alto quarry (Cementos Portland).- *Technical Report no. 43, Less Fines Project*, E.U. contract GIRD-CT-2000-00438, Madrid, Spain, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- [SÄ 93] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1993/94): *Geologische Karte Erzgebirge/Vogtland 1 : 100.000.- 2. Blatt-Kartenwerk*, Dresden.
- [SC 09] SCHILLINGER, R. (2009): *Sprengtechnik und Umwelt in der Praxis.- Carl Hauser, München-Wien*.
- [SH 08] SCHMÜCKER, G. (1998): Die Messung der Detonationsgeschwindigkeit in Bohrlöchern.- *Spreng-Info*, **20**(3):19-25.
- [SCH 08] SCHWAB, M. (2008): *Harz.* – In: BACHMANN, G.H.; EHLING, B.-C.; EICHNER, R. & SCHWAB, M. (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt.- E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart*, S. 408-457.
- [SE 03] SEGARRA, P., SANCHIDRIÁN, J. A., LÓPEZ, L. M., PASCUAL, J. A., ORTIZ, R., GÓMEZ, A. & SMOECH, B. (2003): Analysis of benchface movement in quarry blasting.- *Proc. of EFEE's 2nd World Conf. on Explosives and Blasting Technique 2003*, Prague, Czech Republic, HOLMBERG, R. (ed), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 485-495.
- [SI 00] SISKIND, D. E. (2000): *Vibrations from blasting.- ISEE, Cleveland, USA*.
- [SP 99] SPATHIS, A. T. (1999): On the energy efficiency of blasting.- *Proc. of the FRAGBLAST 6, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 1999, Johannesburg, South Africa, pp. 81-89.
- [SP 06] SPATHIS, A. T. (2006): A scaled charge weight superposition model for rapid vibration estimation.- *Proc. of the FRAGBLAST 8, Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, 2006, Santiago, Chile, pp. 9-31
- [TH 78] THUM, W. (1978): *Sprengtechnik im Steinbruch und Baubetrieb.- Bauverlag, Wiesbaden-Berlin*, 400 S.
- [TH 92] THUM, W. (1992): Stand und Entwicklungstendenzen in der Gewinnungssprengtechnik über Tage.- *Spreng-Info*, **14**(1):26-34.

- [TI 02] TICHOMIROWA, M. (2002): *Die Gneise des Erzgebirges - hochmetamorphe Äquivalente von neoproterozoisch-frühpaläozoischen Grauwacken und Granitoiden der Cadomiden.*- Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg/Sa., 233 S.
- [TIE 09] TIETZ, O. (2009): Zur Geologie der Oberlausitz.- *17. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum „Junge Ingenieurgeologen“*, 6-9. Mai 2009, Zittau, S. 3-7.
- [VO 00] VOGEL, G. (2000): *Zünden von Sprenganlagen.*- L. Hartmann, Sondheim v. d. Rhön.
- [WA 06] WALTER, H. (2006): Das Rotliegend der Nordwestsächsischen Senke.- *Veröff. Museum für Naturkunde Chemnitz*, **29**:157-176, Chemnitz.
- [WA 08] WALTER, R. (2007): *Geologie von Mitteleuropa.*- 7. vollst. N. bearb. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 511 S.
- [WI 06] WITKE, W. (HRSG.) (2006): *Statik und Konstruktion maschineller Vortriebe – Geotechnik in Forschung und Praxis.*- WBI-Print 6, Glückauf, Essen.
- [ZI 05] ZIEGLER, K. ET AL. (2005): Systematische Körnungsanalyse an gesprengtem Haufwerk einer Großbohrlochsprengung in einem Basalt-Tagebau.- *Sprengmittel – Mitteilungsblatt der Anhaltinischen Chemischen Fabriken GmbH Schönebeck und dessen Sprengstoffwerk Gnaschwitz GmbH*, **2005**:3-16.

Anhang

Bilder 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 und 5.11