

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

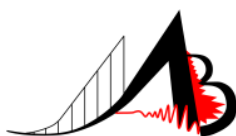
Umsetzung der sonischen Wirkung bei Gewinnungssprengungen in die Praxis zwecks Reduzierung von Umwelteinwirkungen

Abschlussbericht über das Projekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen: 29049-21/0
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von
Doz. Dr.-Ing. habil., Dipl.-Geol. Bernd Müller
Dipl.-Geol. Phillipp Lange
Dipl.-Geol. Benjamin Litschko
Dipl.-Geoph. Uwe Pippig

und unter Mitwirkung seitens
Prof. Dr. Ing. Carsten Drebenstedt
Dipl.-Ing. Juraj Ortuta
Dr.-Ing. Thomas Martienßen

Leipzig, 31. 01. 2013



Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr.-Ing. habil. Bernd Müller
- Movement and Blasting Consulting -

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	29049	Referat	21/0	Fördersumme	123.500,00 €
Antragstitel		Umsetzung der sonischen Wirkung bei Gewinnungssprengungen in die Praxis zwecks Reduzierung von Umwelteinwirkungen			
Stichworte		Sonische Wirkung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	02. 05. 2011	30.10.2012/31.01.2013 (Verl.)	1		
Zwischenberichte	ein Ergebnis- und Abschlussbericht = Forschungsbericht				
November 2011, Mai 2012	Januar 2013				
Bewilligungsempfänger	Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr. Müller - Movement and Blasting Consulting - < Doz. Dr. Ing. habil., Dipl.-Geol. B. Müller > Wiesenring 2 <u>04159 Leipzig</u>			Tel	0341/3587030
				Fax	0341/3588869
				Projektleitung	Dr. B. Müller
				Bearbeiter	Dr. Müller, B. Litschko, U. Pippig
Kooperationspartner	Technische Universität Bergakademie Freiberg Institut für Bergbau/Spezialtiefbau Prof. Dr. Ing. C. Drebenstedt Gustav-Zeuner-Straße 1 A <u>09596 Freiberg/Sa.</u>				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Beim Abbau von Festgestein in Tagebauen und dem sprengtechnischen Lösen im Festgebirge treten zwangsläufig deutliche Umwelteinwirkungen wie Lärm-, Staub-, Erschütterungsimmissionen sowie selten Steinflug auf. Es ist daher gegenüber der bisher empirischen Vorgehensweise erforderlich, eine gezielte Beeinflussung der Umwelteinwirkungen auf der Grundlage der Kenntnis nachgewiesener physikalischer Zusammenhänge der Zerkleinerungs- und Erschütterungsauswirkungen von Sprengungen vorzunehmen. Es ist das Ziel der Forschungsarbeiten, die sonischen Wirkungen bei der detonativen Umsetzung von Sprengstoffen und ein physikalisch gestütztes Sprengmodell hinsichtlich seiner entscheidenden Auswirkungen einer energiesparenden, optimalen Zertrümmerung und erschütterungsmindernder Umsetzung statistisch gesichert in unterschiedlichen Festgebirgen über und unter Tage durch Sprengungen in situ nachzuweisen. Die zu erarbeitenden Erkenntnisse stellen die Grundlage für eine <u>praxisbezogene</u>, realistische und verständliche Vorgehensweise zur Bemessung von Sprenganlagen mit unterschiedlichen Zielen dar. Die physikalisch begründete Dimensionierung von Sprengungen im Festgebirge soll die Rahmenbedingungen für eine gesteuerte Umweltentlastung enthalten, die insbesondere die Erschütterungsminimierung und bessere energetische Ausnutzung des Zertrümmerungsprozesses betreffen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Nachdem die sonische Wirkung der detonativen Umsetzung des Sprengstoffes auf die Stückigkeit und Erschütterungsimmissionen prinzipiell bekannt ist, sollen in den Versuchsbetrieben und auf den Baustellen über und unter Tage bei der Bemessung sowie Auslegung der Sprenganlagen diese physikalischen Zusammenhänge bewusst angewendet werden. Auf der Grundlage einer umfassenden Nachauswertung bisheriger Sprengungen sowie der Kennzeichnung der Sprengbarkeit in den Versuchsbetrieben, werden mindestens 340 Sprengungen in 10 Natursteintagebauen, auf 2 Fels- und 2 Tunnelbaustellen mit unterschiedlichem Festgebirge vorbereitet, durchgeführt und umfassend messtechnisch begleitet. Es werden vor, während und nach der Sprengung folgende Messverfahren eingesetzt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vermessung der Sprenganlagen mit einem 3-D-Laserscanner und einem 3-D-Laserentfernungsmessgerät - Messung des Ausbruches der Sprengungen mit einem Radarsensor METEK - Erfassung der Detonationsgeschwindigkeit mit dem Micro Trap™ - Messung der Erschütterungsimmissionen mit FBG-Dehnungssensoren und 3-Komponenten-Geophonen - digitale Erfassung der Auflockerung und Stückigkeit des Haufwerkes mit einem 3-D-Laserscanner - fotogestützte Korngrößenanalyse der Stückigkeit gesprengter Haufwerke <p>Die erfassten Messwerte und Eingangsgrößen werden statistisch ausgewertet, interpretiert und physikalisch analysiert, um die sonischen Effekte tatsächlich nachzuweisen.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Die sonische Wirkung einer detonativen Sprengstoffumsetzung mit dem wichtigen Grundprinzip des Zusammenhanges von Zertrümmerung und Erschütterung wurde auf verschiedene Art und Weise nachgewiesen. Die Zertrümmerungseffekte können über und unter Tage vom Füllungsgrad, der Sprengstoffdichte, der Detonationsgeschwindigkeit, des Sprengstoffvolumens im Bohrloch, der gezündeten Vorgabe, des Winkels α der Machfronten, der P- und S-Wellengeschwindigkeit sowie durch die Zündfolge bewusst beeinflusst werden, um nahezu jedes Sprengziel zu erreichen. Die supersonische Auslegung erzielt nachweisbar eine gute Zerkleinerung und geringe Erschütterung. Eine subsonische Sprengung bewirkt bei gleichem Detonationsdruck eine geringe Zertrümmerung und sehr hohe Erschütterungen. Je häufiger die Trennflächen im zu sprengenden Festgebirge auftreten, umso stärker wird die sonische Wirkung geschwächt. Die unterschiedlichen Sprengziele werden als Quasi-1-D-Spaltsprengung und 2-D-Zertrümmerungssprengung über Tage sowie als 3-D-Tunnel- oder Streckensprengung unter Tage definiert. Für jede dieser Sprengungen wurden allgemeingültige Grundsätze aufgeführt. Für das Umfeld aller 1-D- bis 3-D-Sprenganlagen können nach einer einheitlichen Vorgehensweise auf der Grundlage entsprechender Erschütterungsmessungen statistisch gesicherte fiktive Energie-Abstandsbeziehungen erarbeitet werden. Es werden neue zulässige Anhaltswerte für die DIN 4150, Teil 1 und 3 sowie sechs definierte Erschütterungszonen abgeleitet. Die Einführung der empfohlenen zulässigen Anhaltswerte werden für die Tagebaubetriebe, Felsbaustellen und unter Tage Vorhaben eine wesentliche Erleichterung zur Behandlung von Erschütterungsproblemen sein. Mit den erzielten Ergebnissen können umweltfreundliche Sprengerschütterungen beeinflusst sowie verringert werden, die Häufigkeit der Sprengungen gesenkt und die Zertrümmerung des Festgesteines mit Einsparung von Sprengstoff deutlich erhöht werden. Auf diese Weise kann wegen der guten Stückigkeit im nachfolgenden Förder- und Aufbereitungsprozess eine erhebliche Größenordnung an Energie eingespart werden. Die Umsetzung der neuen Grundsätze der Bohr- und Sprengtechnik verspricht eine Reduzierung von Beschwerden durch Verringerung der Erschütterungsimmissionen und weniger Sprengungen pro Zeiteinheit.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die erwarteten Ergebnisse sind für die gesamte Natursteinindustrie Deutschlands und Europas von großer Bedeutung. Nach erfolgreichem Abschluss wurden und werden folgende Veröffentlichungen und Präsentationen vorgenommen:

Workshop 10. FRAGBLAST 2012 in New Delhi

Vortrag zur EFEE-Weltkonferenz 2011 in Lissabon

Veröffentlichung im Felsbaumagazin 2011

4 Veröffentlichungen in der Spreng-Info 2011, 2012 und 2 x 2013

Veröffentlichung 18. Kolloquium Bohr- und Sprengtechnik 2013 in Clausthal-Zellerfeld

Vorschlag an den NA 005-51-05 AA „Schwingungsfragen im Bauwesen; Einwirkungen auf Bauwerke und Bauteile“ zur Änderung der DIN 4150, Teil 3

2 Veröffentlichungen in der Zeitschrift „Blasting and Fragmentation“ 2013

Fazit

Das Forschungsziel wurde durch die Erweiterung auf die 1-D- bis 3-D-Sprengungen im Festgebirge weit übertroffen. Auf der Grundlage von mehr als 340 messtechnisch begleiteten Sprengungen in situ unter besonderer Beachtung der sonischen Wirkung werden verallgemeinerte, physikalisch belegbare Bemessungsgrundsätze von Sprengungen und statistisch gesicherte Erschütterungsprognosen erarbeitet. Die gesicherte Dimensionierung der Sprengungen verbessert die Sicherheit in den Tagebaubetrieben, wird die Stückigkeit verarbeitungsgerecht gestalten und gestattet eine ausgewogene Prognose sowie Beeinflussung der Sprengerschütterungsimmissionen. Mit der Umsetzung der Ergebnisse wird die Wirtschaftlichkeit der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik sowie der nachgeschalteten Prozesse erhöht und die Umweltbeeinflussung deutlich verringert. Die Umweltakzeptanz der Betriebe wird verbessert. Die umfassende Wirksamkeit des sonischen Effektes wird die Sprengtechnik nachhaltig beeinflussen. Die Auswirkungen der Verzögerungszeit auf die Stückigkeit und den Abwurf sind statistisch noch nicht geklärt.

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER BILDER.....	5
VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	18
LISTE VON BEGRIFFEN UND SYMBOLEN	20
GRIECHISCHE SYMBOLE.....	23
ZUSAMMENFASSUNG	24
1 VERANLASSUNG UND EINLEITUNG.....	25
2 STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNGSZIEL.....	26
2.1 Bisherige Vorgehensweise zur Bemessung von Sprenganlagen über und unter Tage	26
2.2 Forschungsziel als Beitrag zur Umweltentlastung	28
3 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN.....	30
3.1 Die sonische Wirkung	30
3.2 Das physikalisch begründete Sprengmodell	41
4 NATÜRLICHE GEGEBENHEITEN IN DEN VERSUCHSOBJEKTEN UND AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE DER SPRENGVERSUCHE.....	44
4.1 Auswahl der Versuchsobjekte.....	44
4.2 Tagebau Oßling/Sachsen	46
4.2.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge.....	46
4.2.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter	48
4.2.3 Ausgewählte Sprengergebnisse.....	54
4.3 Tagebau Großsteinberg/Sachsen	55
4.3.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge.....	55
4.3.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter	58
4.3.3 Ausgewählte Sprengergebnisse.....	61
4.4 Tagebau Nieder-Beerbach/Hessen.....	64
4.4.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge.....	64
4.4.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter	66
4.4.3 Ausgewählte Sprengergebnisse.....	68

4.5	Tagebau Burgbernheim/Bayern	72
4.5.1	Sprengbarkeit und Trennflächengefüge	72
4.5.2	Bohr-, Spreng- und Zündparameter	75
4.5.3	Ausgewählte Sprengergebnisse.....	76
4.6	Felsbaumaßnahme Ortsumgehung B 173 Flöha/Sachsen.....	79
4.6.1	Sprengbarkeit und Trennflächengefüge	79
4.6.2	Bohr-, Spreng- und Zündparameter	81
4.6.3	Ausgewählte Sprengergebnisse.....	82
4.7	Felsbaumaßnahme Westtangente Bautzen/Sachsen	85
4.7.1	Sprengbarkeit und Trennflächengefüge	85
4.7.2	Bohr-, Spreng- und Zündparameter	87
4.7.3	Ausgewählte Sprengergebnisse.....	88
4.8	Eisenbahntunnel Ramholz/Hessen	92
4.8.1	Sprengbarkeit, Ausbruchfestigkeit und Trennflächengefüge	92
4.8.2	Bohr-, Spreng- und Zündparameter	94
4.8.3	Ausgewählte Sprengergebnisse.....	96
4.9	Autobahntunnel Markovec/Slowenien	98
4.9.1	Sprengbarkeit und Ausbruchfestigkeit	98
4.9.2	Bohr-, Spreng- und Zündparameter	100
4.9.3	Ausgewählte Sprengergebnisse.....	101
5	NACHWEIS DER SONISCHEN WIRKUNG IN DER SPRENGTECHNIK	105
5.1	Der Zusammenhang von Zertrümmerung des Sprengmediums und den ausgelösten Erschütterungen	105
5.2	Praktische Auswirkungen der sonischen Wirkung auf die Sprengtechnik.....	124
6	GRUNDSÄTZE FÜR DIE DIMENSIONIERUNG VON SPRENGUNGEN ÜBER UND UNTER TAGE	129
6.1	Wichtige Definitionen	129
6.2	Sprengungen über Tage als Spaltsprengungen (1-D-Sprengungen).....	132
6.3	Sprengungen über Tage als Zertrümmerungssprengungen (2-D-Sprengungen).....	134
6.4	Sprengvortrieb unter Tage (3-D-Sprengungen).....	141
7	GESICHERTE ERSCHÜTTERUNGSPROGNOSE.....	145
7.1	Erarbeitung von statistisch gesicherten Prognose-Beziehungen.....	145
7.2	Erschütterungszonen und Vorschlag von zulässigen Anhaltswerten.....	152

8 EMPFEHLUNGEN UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	160
DANKSAGUNG	165
FAZIT	166
ANHANG MIT ANLAGENVERZEICHNIS	167
LITERATURVERZEICHNIS	168

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1:	Vergleich des gesprengten Trichters mit dem numerisch vorherberechneten [ST 11 - S. 149].....	27
Bild 3.1:	Die Herausbildung eines Machkegels nach dem Erreichen der Machzahl von 1 = Durchbruch der Schallmauer; der Überschallknall bzw. die Schockwelle produzierte eine „Wolke“ [Aufnahme von John Gay 1999 von „Sports Illustrated“ des Fluges von Lieutenant Ron Candilore/US Navy].....	31
Bild 3.2:	Theoretischer Machkonus der Stoßwelle im Festgestein bei einer supersonischen Umsetzung des Sprengstoffes ($c_S < c_P < c_d < \infty$) [MÜ 13].....	32
Bild 3.3:	Prinzipdarstellung der sonischen Wirkungen in Beziehung zu den Geschwindigkeiten c_S , c_P und c_d im vereinfachten WEG-ZEIT-LAGRANGE-DIAGRAMM	33
Bild 3.4:	Zusammenhang der P- und S-Wellengeschwindigkeit der verschiedensten Festgesteine mit schematisierter Angabe der Detonationsgeschwindigkeitsbereiche wichtiger Sprengstoffe.....	34
Bild 3.5:	Statistisch gesicherte Einteilungsmöglichkeiten aller Festgesteine hinsichtlich der akustischen Impedanz (P) [$10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$] - (akustische Impedanz (P) = Rohdichte · P-Wellengeschwindigkeit) und deren Zusammenhänge mit der Porosität [Vol.-%] und Wasseraufnahme [M.-%] [aus MÜ 11a].....	35
Bild 3.6:	Diagramm zur Bewertung der sonischen Wirkungen von Sprengungen im Festgebirge beispielhaft für Granodiorit und verschiedene Sprengstoffe berechnet.....	36
Bild 3.7:	Beziehung zwischen der Machzahl der P-Welle und dem Winkel α der Mach oder Stoßwellenfront	37
Bild 3.8:	Die sonische Wirkung einer Hohlladung erzeugt einen Schneidstrahl von $2,5 - 3,4^\circ$	38
Bild 3.9:	Grundsätzliche Auswirkungen von trans- und supersonisch ausgelegten Sprengungen bei gleichzeitiger Zündung einer Reihe von Einzelladungen	39
Bild 3.10:	Die transsonische Wirkung erzielte infolge der großen Klufthäufigkeit eine mäßige Zertrümmerung (Meta-Grauwacke Koschenberg).....	40
Bild 3.11:	Die transsonische Wirkung verursachte eine größere Zertrümmerung infolge der geringen bis sehr geringen Klufthäufigkeit (Kalkstein Elbingerode)	40
Bild 3.12:	Das physikalische Sprengmodell der Wirkungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung im Festgebirge [MÜ 09a].....	41
Bild 3.13:	Der Zusammenhang zwischen fiktivem, wirksamen Detonationsdruck und den Erschütterungen durch die Beziehungen (5) und (6)	42

Bild 3.14: Beziehung zwischen der gemessenen Schwinggeschwindigkeit und fiktivem, wirksamen Detonationsdruck	43
Bild 4.1.1: Klassifikation von Festgesteinen und Festgebirgen zur Einstufung der Gewinnungsfestigkeit, Ausbruchfestigkeit bzw. Sprengbarkeit über und unter Tage sowie zur Erschütterungsempfindlichkeit des Gebirges mittels der Festigkeit (F) und der Trennflächenhäufigkeit (T) [MÜ 11a].....	45

Bilder im Bildband

Bild 4.2.1: Tagebauriss Oßling mit Eintragung der messtechnisch begleiteten Sprengungen und der schematisierten Trennflächenscharen	
Bild 4.2.2: Trennflächengefüge der Meta-Grauwacke	
Bild 4.2.2.1: Poldarstellung der Trennflächen	
Bild 4.2.2.2: Linien gleicher Flächenprozentage 0 - 1 - 2 - 3 - > 4 %	
Bild 4.2.3: Trennflächenabstandsverteilung im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4: Bohr- und Zündpläne im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.1: Beispiel eines Bohr- und Zündplanes vor dem 16. 03. 2010 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.2: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 16. 03. 2010 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.3: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 20. 04. 2010 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.4: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 19. 05. 2010 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.5: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 10. 08. 2012 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.6: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 30. 08. 2012 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.7: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 28. 09. 2012 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.4.8: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 30. 10. 2012 im Tagebau Oßling	
Bild 4.2.5: Beispielhafte Erfassung der Sprenganlagen vor und der Haufwerkslage nach der Sprengung mit dem 3-D-Laserscanner	
Bild 4.2.5.1: Sprengung O4	
Bild 4.2.5.2: Sprengung O10	
Bild 4.2.5.3: Sprengung O12	
Bild 4.2.6: Ergebnisse der Dehnungsmessungen der Sprengungen O1 bis O13	
Bild 4.2.6.1: Protokoll Dehnungsmessung Sprengung O1; MP 2	
Bild 4.2.6.2: Dehnungskurve Sprengung O1; MP 2	
Bild 4.2.6.3: Protokoll Dehnungsmessung Sprengung O2; MP 1	
Bild 4.2.6.4: Dehnungskurve Sprengung O2; MP 1	
Bild 4.2.6.5: Protokoll Dehnungsmessung Sprengung O2; MP 2	
Bild 4.2.6.6: Dehnungskurve Sprengung O2; MP2	

- Bild 4.2.6.7: Protokoll Dehnungsmessung O4; MP 1
- Bild 4.2.6.8: Dehnungskurve Sprengung O4; MP 1
- Bild 4.2.6.9: Protokoll Dehnungsmessung O4; MP 2
- Bild 4.2.6.10: Dehnungskurve Sprengung O4; MP 2
- Bild 4.2.6.11: Protokoll Dehnungsmessung O5; MP 1
- Bild 4.2.6.12: Dehnungskurve Sprengung O5; MP 1
- Bild 4.2.6.13: Protokoll Dehnungsmessung O5; MP 2
- Bild 4.2.6.14: Dehnungskurve Sprengung O5; MP 2
- Bild 4.2.6.15: Protokoll Dehnungsmessung O6a; MP 1
- Bild 4.2.6.16: Dehnungskurve Sprengung O6a; MP 1
- Bild 4.2.6.17: Protokoll Dehnungsmessung O6a; MP 2
- Bild 4.2.6.18: Dehnungskurve Sprengung O6a; MP 2
- Bild 4.2.6.19: Protokoll Dehnungsmessung O7a; MP 1
- Bild 4.2.6.20: Dehnungskurve Sprengung O7a; MP 1
- Bild 4.2.6.21: Protokoll Dehnungsmessung O7a; MP 2
- Bild 4.2.6.22: Dehnungskurve Sprengung O7a; MP 2
- Bild 4.2.6.23: Protokoll Dehnungsmessung O8; MP 1
- Bild 4.2.6.24: Dehnungskurve Sprengung O8; MP 1
- Bild 4.2.6.25: Protokoll Dehnungsmessung O8; MP 2
- Bild 4.2.5.26: Dehnungskurve Sprengung O8; MP 2
- Bild 4.2.5.27: Protokoll Dehnungsmessung O10; MP 1
- Bild 4.2.5.28: Dehnungskurve Sprengung O10; MP 1
- Bild 4.2.5.29: Protokoll Dehnungsmessung O10; MP 2
- Bild 4.2.5.30: Dehnungskurve Sprengung O10; MP 2
- Bild 4.2.5.31: Protokoll Dehnungsmessung O11; MP 1
- Bild 4.2.5.32: Dehnungskurve Sprengung O11; MP 1
- Bild 4.2.5.33: Protokoll Dehnungsmessung O11; MP 2
- Bild 4.2.5.34: Dehnungskurve Sprengung O11; MP 2
- Bild 4.2.5.35: Protokoll Dehnungsmessung O12; MP 1
- Bild 4.2.5.36: Dehnungskurve Sprengung O12; MP 1
- Bild 4.2.5.37: Protokoll Dehnungsmessung O12; MP 2
- Bild 4.2.5.38: Dehnungskurve Sprengung O12; MP 2
- Bild 4.2.5.39: Protokoll Dehnungsmessung O13; MP 2
- Bild 4.2.5.40: Dehnungskurve Sprengung O13; MP 2
- Bild 4.2.7: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernung (r) - Diagramm der maximalen Werte ohne Berücksichtigung der Anisotropie des Festgebirges

- Bild 4.2.8: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung (verallgemeinert von allen Messwerten)
- Bild 4.3.1: Tagebauriss Großsteinberg mit Eintragung der messtechnisch begleiteten Sprengungen und der schematisierten Trennflächenscharen
- Bild 4.3.2: Trennflächengefüge des Rhyolithes
- Bild 4.3.2.1: Poldarstellung der Trennflächen
- Bild 4.3.2.2: Linien gleicher Flächenprozentage 0 - 1 - 2 - 3 - > 4 %
- Bild 4.3.3: Trennflächenabstandsverteilung im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4: Bohr- und Zündpläne im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.1: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 06. 07. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.2: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 23. 07. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.3: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 07. 08. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.4: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 17. 08. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.5: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 24. 08. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.6: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 20. 09. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.4.7: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 04. 10. 2012 im Tagebau Großsteinberg
- Bild 4.3.5: Beispielhafte Erfassung der Sprenganlagen vor und der Haufwerkslage nach der Sprengung mit dem 3-D-Laserscanner
- Bild 4.3.5.1: Sprengung G2
- Bild 4.3.5.2: Sprengung G7
- Bild 4.3.5.3: Sprengung G8
- Bild 4.3.6: Ergebnisse der Dehnungsmessungen der Sprengungen G1 bis G9
- Bild 4.3.6.1: Protokoll Dehnungsmessung G1; MP 1
- Bild 4.3.6.2: Dehnungskurve Sprengung G1; MP 1
- Bild 4.3.6.3: Protokoll Dehnungsmessung G1; MP 2
- Bild 4.3.6.4: Dehnungskurve Sprengung G1; MP 2
- Bild 4.3.6.5: Protokoll Dehnungsmessung G2a; MP 2
- Bild 4.3.6.6: Dehnungskurve Sprengung G2a; MP 2
- Bild 4.3.6.7: Protokoll Dehnungsmessung G2b; MP 2
- Bild 4.3.6.8: Dehnungskurve Sprengung G2b; MP 2

- Bild 4.3.6.9: Protokoll Dehnungsmessung G3; MP 1
- Bild 4.3.6.10: Dehnungskurve Sprengung G3; MP 1
- Bild 4.3.6.11: Protokoll Dehnungsmessung G4; MP 1
- Bild 4.3.6.12: Dehnungskurve Sprengung G4; MP 1
- Bild 4.3.6.13: Protokoll Dehnungsmessung G4; MP 2
- Bild 4.3.6.14: Dehnungskurve Sprengung G4; MP 2
- Bild 4.3.6.15: Protokoll Dehnungsmessung G5; MP 1
- Bild 4.3.6.16: Dehnungskurve Sprengung G5; MP 1
- Bild 4.3.6.17: Protokoll Dehnungsmessung G5; MP 2
- Bild 4.3.6.18: Dehnungskurve Sprengung G5; MP 2
- Bild 4.3.6.19: Protokoll Dehnungsmessung G6; MP 1
- Bild 4.3.6.20: Dehnungskurve Sprengung G6; MP 1
- Bild 4.3.6.21: Protokoll Dehnungsmessung G6; MP 2
- Bild 4.3.6.22: Dehnungskurve Sprengung G6; MP 2
- Bild 4.3.6.23: Protokoll Dehnungsmessung G7; MP 1
- Bild 4.3.6.24: Dehnungskurve Sprengung G7; MP 1
- Bild 4.3.6.25: Protokoll Dehnungsmessung G7; MP 2
- Bild 4.3.6.26: Dehnungskurve Sprengung G7; MP 2
- Bild 4.3.6.27: Protokoll Dehnungsmessung G8; MP 1
- Bild 4.3.6.28: Dehnungskurve Sprengung G8; MP 1
- Bild 4.3.6.29: Protokoll Dehnungsmessung G8; MP 2
- Bild 4.3.6.30: Dehnungskurve Sprengung G8; MP 2
- Bild 4.3.6.31: Protokoll Dehnungsmessung G9; MP 1
- Bild 4.3.6.32: Dehnungskurve Sprengung G9; MP 1
- Bild 4.3.6.33: Protokoll Dehnungsmessung G9; MP 2
- Bild 4.3.6.34: Dehnungskurve Sprengung G9; MP 2
- Bild 4.3.7: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernung (r) - Diagramm der maximalen Werte
- Bild 4.3.8: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung
- Bild 4.4.1: Tagebauriss Nieder-Beerbach mit Eintragung der messtechnisch begleiteten Sprengungen und der schematisierten Trennflächenscharen
- Bild 4.4.2: Trennflächengefüge des Gabbros
- Bild 4.4.2.1: Poldarstellung der Trennflächen
- Bild 4.4.2.2: Linien gleicher Flächenprozente 0 - 1 - 2 - 3 - > 4 %
- Bild 4.4.3: Trennflächenabstandsverteilung im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.3.1: Gesamter Tagebau
- Bild 4.4.3.2: Störungszone im Nordbereich der Sprengung N5

- Bild 4.4.4: Bohr- und Zündpläne im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.4.1: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 09. 08. 2012 im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.4.2: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 05. 09. 2012 im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.4.3: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 21. 09. 2012 im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.4.4: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 05. 10. 2012 im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.4.5: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 26. 10. 2012 im Tagebau Nieder-Beerbach
- Bild 4.4.5: Beispielhafte Erfassung der Sprenganlagen vor und der Haufwerkslage nach der Sprengung mit dem 3-D-Laserscanner
- Bild 4.4.5.1: Sprengung N2 und nach der Beräumung
- Bild 4.4.5.2: Sprengung N4
- Bild 4.4.6: Ergebnisse der Dehnungsmessungen der Sprengungen N1 bis N5
- Bild 4.4.6.1: Protokoll Dehnungsmessung N1; MP 1
- Bild 4.4.6.2: Dehnungskurve Sprengung N1; MP 1
- Bild 4.4.6.3: Protokoll Dehnungsmessung N1; MP 2
- Bild 4.4.6.4: Dehnungskurve Sprengung N1; MP 2
- Bild 4.4.6.5: Protokoll Dehnungsmessung N2; MP 1
- Bild 4.4.6.6: Dehnungskurve Sprengung N2; MP 1
- Bild 4.4.6.7: Protokoll Dehnungsmessung N2; MP 2
- Bild 4.4.6.8: Dehnungskurve Sprengung N2; MP 2
- Bild 4.4.6.9: Protokoll Dehnungsmessung N3; MP 1
- Bild 4.4.6.10: Dehnungskurve Sprengung N3; MP 1
- Bild 4.4.6.11: Protokoll Dehnungsmessung N3; MP 2
- Bild 4.4.6.12: Dehnungskurve Sprengung N3; MP 2
- Bild 4.4.6.13: Protokoll Dehnungsmessung N4; MP 1
- Bild 4.4.6.14: Dehnungskurve Sprengung N4; MP 1
- Bild 4.4.6.15: Protokoll Dehnungsmessung N5a; MP 1
- Bild 4.4.6.16: Dehnungskurve Sprengung N5a; MP 1
- Bild 4.4.6.17: Protokoll Dehnungsmessung N5b; MP 1
- Bild 4.4.6.18: Dehnungskurve Sprengung N5b; MP 1
- Bild 4.4.7: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernung (r) - Diagramm der maximalen Werte
- Bild 4.4.8: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung

- Bild 4.5.1: Tagebauriss Habermühle/Burgbernheim mit Eintragung der messtechnisch begleiteten Sprengungen und der schematisierten Trennflächenscharen
- Bild 4.5.2: Trennflächengefüge der Karbonatgesteinsfolge
- Bild 4.5.2.1: Poldarstellung der Trennflächen
- Bild 4.5.2.2: Linien gleicher Flächenprocente 0 - 1 - 2 - 3 - > 4 %
- Bild 4.5.3: Trennflächenabstandsverteilung im Tagebau Habermühle/Burgbernheim
- Bild 4.5.4: Bohr- und Zündpläne im Tagebau Habermühle/Burgbernheim
- Bild 4.5.4.1: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 13. 08. 2012 im Tagebau Habermühle/Burgbernheim
- Bild 4.5.4.2: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 03. 09. 2012 im Tagebau Habermühle/Burgbernheim
- Bild 4.5.4.3: Bohr- und Zündplan der Sprengung vom 16. 10. 2012 im Tagebau Habermühle/Burgbernheim
- Bild 4.5.5: Beispielhafte Erfassung der Sprenganlagen vor und der Haufwerkslage nach der Sprengung mit dem 3-D-Laserscanner
- Bild 4.5.5.1: Sprengung B2
- Bild 4.5.5.2: Sprengung B3
- Bild 4.5.6: Ergebnisse der Dehnungsmessungen der Sprengungen B1 - B3
- Bild 4.5.6.1: Protokoll Dehnungsmessung B1; MP 2
- Bild 4.5.6.2: Dehnungskurve Sprengung B1; MP 2
- Bild 4.5.6.3: Protokoll Dehnungsmessung B2; MP 1
- Bild 4.5.6.4: Dehnungskurve Sprengung B2; MP 1
- Bild 4.5.6.5: Protokoll Dehnungsmessung B2; MP 2
- Bild 4.5.6.6: Dehnungskurve Sprengung B2; MP 2
- Bild 4.5.6.7: Protokoll Dehnungsmessung B3; MP 1
- Bild 4.5.6.8: Dehnungskurve Sprengung B3; MP 1
- Bild 4.5.6.9: Protokoll Dehnungsmessung B3; MP 2
- Bild 4.5.6.10: Dehnungskurve Sprengung B3; MP 2
- Bild 4.5.7: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernung (r) - Diagramm der maximalen Werte im Vergleich mit Ergebnissen einer Altsprengung
- Bild 4.5.8: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung im Vergleich vor und nach der Umstellung auf die neuen Bohr-, Spreng- und Zündparameter
- Bild 4.6.1: Lageskizze Flöha mit Eintragung der Erschütterungsmesspunkte für die Sprengversuche
- Bild 4.6.2: Trennflächengefüge des Rhyolith-Pyroklastites
- Bild 4.6.2.1: Poldarstellung der Trennflächen
- Bild 4.6.2.2: Linien gleicher Flächenprocente 0 - 1 - 2 - 3 - > 4 %

- Bild 4.6.3: Kinematische Analyse der zu sprengenden Böschung im Bahneinschnitt Flöha
- Bild 4.6.4: Bohrpläne der Spalt- und Auflockerungssprengungen
- Bild 4.6.4.1: Projekt der Sprengarbeiten im Bahneinschnitt (B 173 Flöha)
- Bild 4.6.4.2: Beispielhafte Profilschnitte durch die Sprenganlage
- Bild 4.6.5: Beispiel einer Dehnungsmessung
- Bild 4.6.5.1: Protokoll Dehnungsmessung am 30. 08. 2010
- Bild 4.6.5.2: Dehnungs-Stauchungskurve am 30. 08. 2010
- Bild 4.6.6: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernung (r) - Diagramm der maximalen Werte von zwei Spaltsprengungen
- Bild 4.6.7: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung der Spaltsprengungen im Rhyolith-Pyroklastit
- Bild 4.7.1: Beispielhafte Sprenganlagen vom Tunneleinschnitt Westtangente Bautzen mit Eintragung der Messpunkte
- Bild 4.7.2: Trennflächengefüge des Granodiorites
- Bild 4.7.2.1: Poldarstellung der Trennflächen
- Bild 4.7.2.2: Linien gleicher Flächenprozentage 0 - 1 - 2 - 3 - > 4 %
- Bild 4.7.3: Statistische Auswertung der Trennflächenabstände im Granodioritmassiv westlich von Bautzen
- Bild 4.7.4: Ausgewählte Bohr- und Zündpläne der Spalt- und Gewinnungssprengungen Westtangente Bautzen
- Bild 4.7.4.1: Beispielhaftes Bohr- und Zündschema der Spaltsprengung in der 1. Phase
- Bild 4.7.4.2: Beispielhaftes Bohr- und Zündschema der Gewinnungssprengungen der 2. Phase
- Bild 4.7.5: Beispielhafte Ergebnisse von Dehnungsmessungen
- Bild 4.7.5.1: Protokoll Dehnungsmessung am 11. 03. 2011
- Bild 4.7.5.2: Dehnungs-Stauchungskurve am 11. 03. 2011
- Bild 4.7.5.3: Protokoll Dehnungsmessung am 16. 03. 2011
- Bild 4.7.5.4: Dehnungs-Stauchungskurve am 16. 03. 2011
- Bild 4.7.5.5: Protokoll Dehnungsmessung am 23. 03. 2011
- Bild 4.7.5.6: Dehnungs-Stauchungskurve am 23. 03. 2011
- Bild 4.7.5.7: Protokoll Dehnungsmessung am 01. 07. 2011
- Bild 4.7.5.8: Dehnungs-Stauchungskurve am 01. 07. 2011
- Bild 4.7.5.9: Protokoll Dehnungsmessung am 27. 06. 2011
- Bild 4.7.5.10: Dehnungs-Stauchungskurve am 27. 06. 2011
- Bild 4.7.6: Dehnungs- (ϵ_{\max}) Entfernungs-Diagramm Westtangente Bautzen
- Bild 4.7.7: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernungs- (r) Diagramm der 1. Phase Spaltsprengungen mit Sprengschnur

- Bild 4.7.8: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Impuls-Beziehungen der 1. Phase Spalt-sprengungen mit Sprengschnur (blau) und der 2. Phase Gewinnungs-sprengungen mit gelatinösem Sprengstoff (rot)
- Bild 4.8.1: Grundriss des Alten und Neuen Ramholz - Tunnels mit Angabe des Trennflächengefüges
- Bild 4.8.2: Trennflächengefüge der Ton- und Plattensandsteinschichten des Oberen Buntsandsteins im Ramholz - Tunnel
- Bild 4.8.3: Fotodokumentation aus dem Bereich des Sprengvortriebes in der Kalotte
- Bild 4.8.3.1: Ausbruchprofil Kalotte bei TM 179; Maßstab = 3 m
- Bild 4.8.3.2: Ausbruchprofil Kalotte bei TM 303; Maßstab = 3 m
- Bild 4.8.4: Bohr- und Zündplan der Versuchssprengung Kalotte vom Ramholz - Tunnel
- Bild 4.8.5: Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernungs-Diagramm einer Testsprengung
- Bild 4.8.6: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung der Testsprengung
- Bild 4.9.1: Ausschnitt aus dem Grundriss der Tunneltrasse Markovec mit Eintragung des untersuchten Abschnittes und der Versuchssprengungen
- Bild 4.9.2: Verallgemeinertes Trennflächengefüge der Kalkstein-, Kalk-, Mergelstein und Tonmergelstein-Wechselagerung
- Bild 4.9.3: Bohr- und Zündschema der Versuchssprengungen
- Bild 4.9.3.1: Bohrschema des Paralleleinbruches mit 4 Großbohrlöchern für eine Abschlagtiefe von 1,3 m - Variante 1 - Tunnel Markovec -
- Bild 4.9.3.2: Bohrschema des Paralleleinbruches mit 4 Großbohrlöchern für eine Abschlagtiefe von 2,25 m - Variante 2 - Tunnel Markovec -
- Bild 4.9.3.3: Zündschema des Paralleleinbruches - Tunnel Markovec -
- Bild 4.9.4: Vergleich von Schwinggeschwindigkeitsmessungen der Fa. IRGO - Ljubljana - MBC Leipzig mit unterschiedlichen Geophonen
- Bild 4.9.5: Maximale Schwinggeschwindigkeit - Entfernungs- (r) Diagramm der Versuchssprengungen 1 - 6
- Bild 4.9.6: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung der Versuchssprengungen 1 - 6

Ende Bildband

- Bild 5.1: Beispielhafte Ermittlung des Exponenten P (vergleiche Beziehung (10)) für die Berechnung des fiktiven Detonationsdruckes (B3 - Tagebau Habermühle)..... 106
- Bild 5.2: Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Tagebau Görsdorf..... 107

Bild 5.3:	Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Tagebau Nieder-Beerbach.....	107
Bild 5.4:	Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Tagebau Habermühle/Burgbernheim.....	108
Bild 5.5:	Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Vergleich zwischen Sprengungen mit Einzellochzündung und solchen mit Impulszündung (Tagebau Winterberg und Großsteinberg).....	108
Bild 5.6:	Vergleich der Korngrößenverteilung Festgebirge - Haufwerk von Sprengungen mit Einzellochzündung und Zündung nach der Impulstheorie im ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET-DIAGRAMM.....	110
Bild 5.7:	Die colorierte Fläche zwischen Korngrößenverteilung des Festgebirges und gesprengten Haufwerkes ist ein gewähltes, indirektes Maß für die Zerklüftungswirkung einer Sprengung = fiktive Zertrümmerungswirkung am Beispiel der 5. Sprengung Nieder-Beerbach	110
Bild 5.8 ff:	Haufwerkszusammensetzung und Kluftkörperkornverteilung des Festgebirges zwecks Beurteilung der fiktiven Zertrümmerungswirkung im RRSB-Diagramm	
Bild 5.8.1:	Tagebau Elbingerode - Kalkstein	111
Bild 5.8.2:	Tagebau Koschenberg - Meta - Grauwacke	111
Bild 5.8.3:	Tagebau Oßling - Meta - Grauwacke	112
Bild 5.8.4:	Tagebau Lüptitz - Rhyolith	112
Bild 5.8.5:	Tagebau Habermühle/Burgbernheim - Kalkmergelstein	113
Bild 5.8.6:	Tagebau Großsteinberg - Rhyolith	113
Bild 5.8.7:	Tagebau Nieder-Beerbach - Gabbro, extrem schwer sprengbar	114
Bild 5.9:	Beziehung zwischen der fiktiven Zertrümmerungswirkung und dem fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ für die Sprengungen im Tagebau Habermühle/Burgbernheim	114
Bild 5.10:	Zusammenhang der Größe der fiktiven Zertrümmerungswirkung mit dem durchschnittlichen Trennflächenkörper als Festgebirgskennwert.....	115
Bild 5.11:	Die verallgemeinerte Darstellung der verschiedenen 1-D-, 2-D- und 3-D-Sprengungen und deren Bezug zum spezifischen Sprengstoffverbrauch über und unter Tage [MÜ 11b]	116
Bild 5.12:	Schwinggeschwindigkeits-fiktive Impuls-Abstandsbeziehungen von Spaltsprengungen mit deutlich unterschiedlichen Ergebnissen durch die sonische Wirkung.....	117

Bild 5.13: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in den Versuchsbetrieben Oßling, Großsteinberg, Burgbernheim und Nieder-Beerbach	119
Bild 5.14: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in verschiedenen Tagebauen und Festgebirgen	119
Bild 5.15: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in vergleichbaren Festgebirgen aus Meta-Grauwacke mit vorherrschender K ₃ -Schichttrennflächenschar	120
Bild 5.16: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von 3-D-unter-Tage-Sprengungen	120
Bild 5.17: Zusammenfassendes Schwinggeschwindigkeits-fiktives Energie-Abstandsbeziehungsdiagramm verfügbarer, statistisch gesicherter Regressionsgleichungen von allen Sprengungen mit unterschiedlicher Zielstellung	122
Bild 5.18: Schwinggeschwindigkeits-fiktiver, wirksamer Detonationsdruck-Abstandsdiagramm der Versuchsbetriebe mit den Tagebauen Oßling, Großsteinberg, Burgbernheim und Nieder-Beerbach	122
Bild 5.19: Zusammenfassendes Schwinggeschwindigkeits-fiktiver, wirksamer Detonationsdruck-Abstandsdiagramm der Messergebnisse aus den Versuchsbetrieben	123
Bild 5.20: Die Auswertung der Sonizität der wichtigsten, beurteilten Sprengungen im M _S - M _P - Diagramm	124
Bild 5.21: Zusammenhang zwischen durchschnittlichen Trennflächenkörpern, dem spezifischen Sprengstoffverbrauch und Füllungsgrad ξ [nach MÜ 09a] für Zertrümmerungssprengungen (2-D-Sprengungen).....	126
Bild 5.22: Abhängigkeit des spezifischen Sprengstoffverbrauches vom Ausbruchquerschnitt und der Ausbruchfestigkeit für 3-D-Sprengungen unter Tage	126
Bild 6.1: Das Wirkungsprisma einer Sprenganlage ist ein bohrlochbezogenes Volumenelement	130
Bild 6.2: Wichtige geometrische Parameter von 1-D- und 2-D-Sprenganlagen über Tage	130
Bild 6.3: Bohrschema einer 3-D-unter-Tage-Sprengung einer Kalotte mit wichtigen Bezeichnungen	131
Bild 6.4: Festlegung der jeweiligen Seitenverhältnisse $\lambda_s = \frac{a_B}{w}$ nach dem Sprengziel unter Beachtung der sonischen Wirkung für 1-, 2- und 3-D-Sprengungen.....	131
Bild 6.5: Spaltsprengung mit Bruchbildung durch Überlagerung der Machkonusse und den sich sekundär auf der Spaltfläche ausgebreiteten Schwaden	134

Bild 6.6:	Prinzip der Auslegung einer progressiven, simultanen Zündfolge einer Mehrreihensprengung nach der Impulstheorie mit Öffnung/Einbruch der Sprengung auf einer Seite und Ausbruch im stumpfen Winkel	136
Bild 6.7:	Variationen der Zündfolge am Beispiel der elektrischen Zündung mit gleichem Bohrloch- und Reihenabstand.....	136
Bild 6.8:	4-Reihensprengung nichtelektrisch gezündet nach der Impulstheorie im Tagebau Görzdorf/Gneis a) Bohr- und Ladeschema b) Zündschema c) 3-D-Laserscanner-Aufnahme nach der Sprengung	137
Bild 6.9:	Beispiel einer nichtelektrischen Zündung nach der Impulstheorie mit Vergrößerung des gezündeten Seitenverhältnisses λ_s von $\frac{a_B}{w}$ (gebohrt) 1,39 auf $\frac{a'_B}{w}$ (gezündet) mit 7,65.....	138
Bild 6.10:	Beispiel einer elektronisch gezündeten 4-Reihen-Sprengung nach der Impulstheorie mit optimaler Zertrümmerung im extrem schwer sprengbaren Festgebirge.....	138
Bild 6.11:	Die verschiedenen Positionen von Zündern am Bohrlochmund (linke Seite) und im Bohrloch Tiefsten mit einem redundanten Zünder am Bohrlochmund (rechte Seite)	141
Bild 6.12:	Paralleleinbruch mit spiralförmiger Zündfolge (nichtelektrisch) unter Beachtung der Impulstheorie; im Einbruch sind 4 Großbohrlöcher (Freilöcher).....	142
Bild 6.13:	Bohrschema eines Paralleleinbruches mit spiralförmiger Zündfolge für ein mittelschwer sprengbares/sehr gebräches Festgebirge	143
Bild 6.14:	Bohrschema eines Paralleleinbruches mit spiralförmiger Zündfolge für ein schwer sprengbares/gebräches Festgebirge.....	143
Bild 6.15:	Beispielhaftes Bohrschema eines Kegeleinbruches	144
Bild 6.16:	Beispielhaftes Bohrschema eines Keileinbruches	144
Bild 7.1:	Beispiel einer statistischen Auswertung der Erschütterungsmessungen im Schwinggeschwindigkeits-Abstandsdiagramm (Basalt-Tagebau Unter-Widdersheim)	147
Bild 7.2:	Beispiel der multiplen Regressionsanalyse unter Verwendung des Exponenten -1,8847 vom Bild 7.1 zur Ermittlung der statistisch gesicherten, fiktiven Impuls-Abstandsbeziehung (Basalt-Tagebau Unter-Widdersheim)	147
Bild 7.3:	Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Oßling.....	149
Bild 7.4:	Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Koschenberg	149
Bild 7.5:	Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Görzdorf	150
Bild 7.6:	Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Großsteinberg.....	150

Bild 7.7:	Beispielhafte Dehnungs-fiktive Energie-Abstandsbeziehung für die Erschütterungsprognose im Tagebau Großsteinberg	151
Bild 7.8:	Zusammenhang zwischen Schwinggeschwindigkeit und Dehnung (Maximalwerte) - Messergebnisse aus drei Tagebauen Großsteinberg, Koschenberg und Oßling	155
Bild 7.9:	Die ermittelte bleibende Verformung ϵ_{if} bei den Dehnungssensoren in Beziehung zur Entfernung r von der maximalen Sprengladung zum Messpunkt; die rot markierte $1 \mu\text{m}/\text{m}$ Linie ist der festgelegte Grenzbereich; bei Werten $< 1 \mu\text{m}/\text{m}$ kann in einem Festgestein/Baustoff auch bei zig-facher Belastung kein Bruch/Riss entstehen	155
Bild 7.10:	Die Zonen der Verformung und Erschütterungen um eine Sprengung über Tage mit Bohrlochdurchmesser $\leq 110 \text{ mm}$ (die angegebenen Werte von ϵ_{if} , ϵ und ppv sind als Anhaltswerte zu verstehen)	156
Bild 7.11:	Vorschlag einer Änderung der DIN 4150, Teil 3 für die zulässigen Anhaltswerte der Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Frequenz der Messwerte in/auf den jeweiligen Bauwerken	158

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4.2.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der Varietäten der Meta-Grauwacke im Bereich des Tagebaues Oßling	46
Tabelle 4.2.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch be- gleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Oßling im Vergleich mit der bisherigen Vorgehensweise.....	49
Tabelle 4.2.3: Erschütterungsmessungen im Tagebau Oßling	51
Tabelle 4.3.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des pyroxenhaltigen Rhyolithes im Bereich des Tagebaues Großsteinberg	56
Tabelle 4.3.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Großsteinberg.....	59
Tabelle 4.3.3: Erschütterungsmessungen im Tagebau Großsteinberg	62
Tabelle 4.4.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des Gabbros im Bereich des Tagebaues Nieder-Beerbach.....	65
Tabelle 4.4.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Nieder-Beerbach	67
Tabelle 4.4.3: Erschütterungsmessungen im Tagebau Nieder-Beerbach.....	70
Tabelle 4.5.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der Karbonatgesteine im Bereich des Tagebaues Habermühle/Burgbernheim (1. und 2. Sohle)	73
Tabelle 4.5.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Habermühle/ Burgbernheim.....	76
Tabelle 4.5.3: Erschütterungsmessungen im Tagebau Habermühle/Burgbernheim	78
Tabelle 4.6.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des Rhyolith- Pyroklastites im Bahneinschnitt der Erzgebirgsbahn Flöha.....	80
Tabelle 4.6.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Spaltsprengungen im Bahneinschnitt der Erzgebirgsbahn Flöha	82
Tabelle 4.6.3: Erschütterungsmessungen an der B 173 in Flöha	84
Tabelle 4.7.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des Biotit-Granodiorites	85
Tabelle 4.7.2: Zusammengefasste bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der Felsbaustelle Westtangente Bautzen.....	88
Tabelle 4.7.3 Ausgewählte Erschütterungsmessungen der I. und II. Phase der a und b: Sprengarbeiten auf der Felsbaustelle Westtangente Bautzen.....	90

Tabelle 4.8.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der Ton-, Schluff- Feinsandsteinwechsellagerung des Oberen Buntsandsteines vom neuen Ramholz-Tunnel.....	93
Tabelle 4.8.2: Bohr-, Spreng- und Zündparameter der Versuchssprengung.....	96
Tabelle 4.8.3: Erschütterungsmessungen der Versuchssprengung im Ramholz-Tunnel	97
Tabelle 4.9.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der tertiären Karbonat- gesteine im Bereich des Markovec Tunnels.....	98
Tabelle 4.9.2: Bohr-, Spreng- und Zündparameter der Versuchssprengungen.....	101
Tabelle 4.9.3: Erschütterungsmessungen der Versuchssprengungen im Markovec Tunnel über und unter Tage gemessen.....	103
Tabelle 5.1: Vorschlag zur Einteilung der Sprengungen im Festgebirge nach dem Sprengziel	116
Tabelle 5.2: Vergleich der Korrelationskoeffizienten der Regressionsgleichungen von der Schwinggeschwindigkeit zu den fiktiven Energie-Abstands- und fiktiven, wirksamen Detonationsdruck-Abstandsbeziehungen.....	123
Tabelle 6.1: Vor- und Nachteile der Zündverfahren.....	139
Tabelle 7.1: Vorschlag für die zulässigen Anhaltswerte der Dehnung und der Schwinggeschwindigkeit in Beziehung zur Frequenz für Bauwerke nach Zeile 1 bis 5	159

Liste von Begriffen und Symbolen

<i>AGSM</i>	average grain size mass	[kg]
<i>a_B</i>	Bohrlochabstand	[m]
<i>a_B'</i>	Bohrlochabstand, gezündet.....	[m]
<i>a_{Bkrit}</i>	kritischer Bohrlochabstand für den Machkonus	[m]
<i>a_{BS}</i>	Bohrlochabstand Spaltsprengrung.....	[m]
<i>a_{BZ}</i>	Bohrlochabstand Zertrümmerungssprengung	[m]
<i>a_{RS}</i>	Reihenabstand, söhlig.....	[m]
<i>a_R</i>	Reihenabstand (echt).....	[m]
<i>a_R'</i>	Reihenabstand, gezündet	[m]
<i>AN</i>	ANFO - pulverförmiger Sprengstoff	[-]
<i>Bm_{Ges}</i>	Gesamtbohrmeter	[m]
<i>c_d</i>	Detonationsgeschwindigkeit.....	$[\frac{m}{s}]$
<i>c_c</i>	Rissgeschwindigkeit.....	$[\frac{m}{s}]$
<i>c_F</i>	Geschwindigkeit eines Flugkörpers.....	[m/s]
<i>c_L</i>	Schall- oder P-Wellengeschwindigkeit der Luft.....	[m/s]
<i>c_M</i>	Ausbruchgeschwindigkeit des Haufwerkes / der Sprengmasse.....	$[\frac{m}{s}]$
<i>c_P</i>	P-Wellengeschwindigkeit, Gestein (Druck-).....	$[\frac{m}{s}]$
<i>c_R</i>	R-Wellengeschwindigkeit, Gestein (Rayleigh-).....	$[\frac{m}{s}]$
<i>c_S</i>	S-Wellengeschwindigkeit, Gestein (Scher-).....	$[\frac{m}{s}]$
<i>d_B</i>	Bohrlochdurchmesser	[mm]
<i>E_{dyn}</i>	dynamischer Elastizitätsmodul	$[\frac{kN}{mm^2}]$
<i>E_{kinM}</i>	kinetische Energie der ausbrechenden Festgebirgsmasse (Haufwerk).....	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$ bzw. Nm]
<i>E_{potM}</i>	potentielle Energie der ausbrechenden Festgebirgsmasse (Haufwerk).....	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$ bzw. Nm]
<i>E_{dyn}</i>	fiktive, dynamische Energie einer Sprenganlage	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$ bzw. Nm]
<i>E_B</i>	fiktive, dynamische Energie der Bohrlochladung	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$ bzw. Nm]
<i>E_S</i>	fiktive, dynamische Energie der gesamten Sprengladung	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$ bzw. Nm]
<i>EM</i>	Emulsionssprengstoffe	[-]
<i>g</i>	Normalfallbeschleunigung	$[9,81 \frac{m}{s^2}]$
<i>G</i>	G-Schubmodul	[kN/mm ²]
<i>GE</i>	gelatinöse Sprengstoffe.....	[-]
<i>h_w</i>	Wandhöhe.....	[m]
<i>HA</i>	Heavy ANFO.....	[-]
<i>I_M</i>	Impulsmoment des ausbrechenden Haufwerkes	$[\frac{kgm}{s}]$ bzw. Ns]

k, k', n, n'	
m, m'	Exponenten und Faktoren, die durch Regressionsanalyse statistisch ermittelt werden (Erschütterungsprognosebeziehungen) [-]
L_Z	Lademenge pro Zündzeitstufe (zur Dimensionsbereinigung muss durch 1 kg gerechnet werden) [kg]
l_B	Bohrlochlänge [m]
l_{B0}	Einheitslänge Bohrloch [1 m]
l_{UB}	Länge der Unterbohrung unter die Sohle [m]
l_{Bes}, l_{ZBes}	Länge des Besatzes, des Zwischenbesatzes [m]
Ma	1 Mach = Verhältnis einwirkender, bewegter Geschwindigkeit zur P- oder S-Wellengeschwindigkeit des Mediums [-]
M_P	Machzahl des Verhältnisses Detonationsgeschwindigkeit (einwirkende Geschwindigkeit) / P-Wellengeschwindigkeit [-]
M_S	Machzahl des Verhältnisses Detonationsgeschwindigkeit (einwirkende Geschwindigkeit) / S-Wellengeschwindigkeit [-]
m_M	Sprengmasse (Sprengvolumen x Gebirgsdichte) [kg]
n_B	Anzahl der Bohrlöcher [-]
n_{BZ}	Anzahl der Bohrlöcher je Zeitstufe [-]
n_R	Anzahl der Bohrlochreihen [-]
ppv	Schwinggeschwindigkeit [$\frac{mm}{s}$]
ppv_{max}	maximale Schwinggeschwindigkeit [$\frac{mm}{s}$]
P	Exponent P des Produktes ($\sin_{\alpha P} \cdot \sin_{\alpha S}$) mit dem Wert von 1, 1,5 und 2 je nach Zündung (Bild 5.1) [-]
P_0	fiktiver Detonationsdruck des Sprengstoffes [MPa bzw. N/mm ²]
P_{Z0}	fiktiver, wirksamer Detonationsdruck je Einheitsvolumen ohne sonische Wirkung [MPa bzw. N/mm ²]
$P_{Z0\alpha}$	fiktiver, wirksamer Detonationsdruck je Einheitsvolumen unter Einbeziehung der sonischen Wirkung [MPa bzw. N/mm ²]
$P_{Z0\alpha(Spalt)}$	Detonationsdruck für Spaltsprengungen [N/mm ²]
q	spezifischer Sprengstoffverbrauch (allgemein) [kg/m ³]
q_B	spezifischer Sprengstoffverbrauch für Sprengungen im Bergbau (3-D-Sprengungen) [kg/m ³]
q_S	spezifischer Sprengstoffverbrauch für Spaltsprengungen (1-D-Sprengungen) [kg/m ²]
q_T	spezifischer Sprengstoffverbrauch für Tunnelsprengungen (3-D-Sprengungen) [kg/m ³]
q_Z	spezifischer Sprengstoffverbrauch für Zertrümmerungssprengungen (2-D-Sprengungen) [kg/m ³]
r	Entfernung maximale Bohrlochladung einer Sprenganlage zum Messpunkt bei Erschütterungsmessungen [m]
r_0	Korrekturfaktor für die Dimensionsbereinigung von 1 m [1 m]
TNT	Trinitrotoluol [-]
t_V	Verzögerungszeit zwischen den Ladungen [ms]
t_Z	Dauer der Zündfolge [ms]
V_B	Sprengvolumen um ein Bohrloch ($a_B \cdot w \cdot l_B$) [m ³]
V_K	Volumen des durchschnittlichen Trennflächenkörpers [m ³]
V_0	Einheitsvolumen ($a_B' \cdot w' \cdot l_{B0}$) [m ³]
V_{SB}	Volumen Sprengstoff im Bohrloch [m ³]
V_{S0}	Volumen Sprengstoffmenge pro Einheitsvolumen [m ³]
V_W	Wirkungsprisma ($a_B \cdot w \cdot l_B$) [m ³]
w'	Vorgabe, gezündet [m]
w	Vorgabe (echt) [m]
w_s	söhlige Vorgabe [m]

W_B	maximale Lademenge pro Bohrloch	[kg]
Z_P	akustische Impedanz (P) (Rohdichte x P-Wellengeschwindigkeit des Mediums)	10^6 [kg(m ² s)]
Z_S	akustische Impedanz (S) (Rohdichte x S-Wellengeschwindigkeit des Mediums)	10^6 [kg(m ² s)]

Griechische Symbole

α	Winkel der Stoßwellen oder Machfront..... [°]
α_P	Winkel der Machfront durch die P-Wellengeschwindigkeit des Festgesteines [°]
α_S	Winkel der Machfront durch die S-Wellengeschwindigkeit des Festgesteines [°]
β_B	Bohrlochneigung [°]
γ_B	Böschungsneigung..... [°]
Δt_z	Verzögerungsintervall..... [m/s]
ε	Dehnung/Stauchung [$\frac{\text{mm}}{\text{m}}$] oder [$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$]
ε_{max}	maximale Dehnung [$\frac{\text{mm}}{\text{m}}$] oder [$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$]
ε_{if}	Verformung, bleibend [mm/m]
λ_{SB}	Seitenverhältnis, gebohrt..... [-]
λ_s	Seitenverhältnis, gezündet [-]
ν	Poissonzahl..... [-]
ξ	Füllungsgrad [-]
ρ_s	Sprengstoffdichte [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
ρ_G	Rohdichte, Gestein..... [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$]
σ_D	einaxiale Druckfestigkeit..... [N/mm ²] oder [MPa]
σ_Z	Zugfestigkeit..... [N/mm ²]

Zusammenfassung

In zehn Natursteintagebauen, auf zwei Felsbaustellen und von zwei Tunnelbauobjekten wurden insgesamt 340 Sprengungen in-situ nach dem neuen Sprengmodell unter Beachtung der sonischen Wirkung dimensioniert, umfassend messtechnisch begleitet und analysiert. Trotz des naturgegebenen Hintergrundes recht unterschiedlicher Festgebirge sind alle Sprengverfahren mit den gleichen Parametern beeinflussbar. Es wird nach den Ergebnissen die Sprengtechnik im Festgebirge unterschieden in quasi-1-dimensionale Spaltsprengungen und 2-dimensionale Zertrümmerungssprengungen über Tage sowie in 3-dimensionale Tunnel- und Streckensprengungen unter Tage mit jeweils wechselnden Sprengzielen. Die sonische Wirkung einer Sprengstoffumsetzung ist ein universelles Phänomen, mit dem die Explosion, Zertrümmerung und Erschütterung physikalisch neu erklärbar ist. Der Zusammenhang von Zerkleinerung und Erschütterungen als wesentlichstes Grundprinzip des sonischen Effektes wurde mit den Untersuchungen auf vielfältige Art und Weise nachgewiesen. Die sonische Wirkung wird infolge zunehmender Trennflächenhäufigkeit des Festgebirges geschwächt und durch Anisotropien wie dominanter Gesteinswechsel gestört. Die Zerstörung des Sprengmediums wird durch die Steuerung des fiktiven, wirksamen Detonationsdruckes günstig beeinflusst. Diese Einflussnahme ist mit den Parametern Füllungsgrad, Sprengstoffdichte, Detonationsgeschwindigkeit, Sprengstoffvolumen pro Einheitsvolumen bzw. pro Bohrloch, gezündete Vorgabe, Winkel α der Machfronten der P- und S-Wellengeschwindigkeit sowie durch die Zündfolge über und unter Tage zu erreichen. Die supersonische Auslegung des Sprengstoffes zur P- und S-Wellengeschwindigkeit des Festgesteines erzielt statistisch nachweisbar eine sehr große Zerkleinerung und geringe Erschütterungen. Jede Abnahme der Sonizität verursacht eine geringere Zertrümmerung und die Erschütterungen steigen an. Subsonisch umgesetzte Sprengungen erzeugen eine geringe Zerkleinerung und haben vergleichsweise die höchsten Erschütterungen. Die komplex nachgewiesenen Zusammenhänge erlauben es, verallgemeinerte, sichere, verständliche Grundsätze für die Bemessung von 1-, 2- und 3-D-Sprengungen abzuleiten, die die Bohr- und Sprengarbeiten in der Praxis grundlegend verändern werden. Für das Umfeld aller Sprengungen im Festgebirge wird auf der Grundlage entsprechender Messergebnisse aufgezeigt, wie man nach einer einheitlichen Vorgehensweise objektiv eine statistisch gesicherte, fiktive Energie-Abstandsbeziehung bzw. Prognosebeziehung für die Erschütterungseinwirkung erarbeitet. Mit diesen Beziehungen, den aufgeführten Parametern und der strikten Anwendung der sonischen Wirkung können Erschütterungen und die Zertrümmerung gezielt beeinflusst werden. Es werden neue Erschütterungszonen eindeutig durch Kennwerte der Dehnung und Schwinggeschwindigkeit abgegrenzt sowie statistisch genau abgeleitete zulässige Anhaltswerte für Erschütterungsimmissionen übergeben. Die Ergebnisse werden ein neues Verständnis für die Sprengtechnik und die verursachten Umweltbeeinflussungen ermöglichen, d. h. die Erschütterungen sind beeinflussbar zu verringern und die Häufigkeit der Sprengungen ist deutlich reduzierbar. Die energetische Ausnutzung der Sprengstoffe wird erhöht und der nachgeschaltete Aufbereitungsprozess energiesparender gestaltet. Das Projekt „Sonische Wirkung“ wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az. 29049/21/0 dankenswerter Weise gefördert.

1 Veranlassung und Einleitung

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsthema „Entwicklung eines Verfahrens zur definierten Berechnung von Gewinnungssprengungen und der Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit“ (Az. 24578-21/0) wurde zusammen mit der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau und dem Geotechnischen Sachverständigenbüro Dr. Ing. habil. B. Müller 2009 abgeschlossen. Im Ergebnis der zweijährigen Forschungsarbeiten wurde u. a. ein neues physikalisch begründbares Sprengmodell entwickelt, in dem die bisher nur theoretisch und experimentell bekannte sonische Wirkung der Sprengstoffe einen ersten physikalischen Nachweis fand. Diese seinerzeit zufällige Entdeckung sollte wegen ihrer großen Bedeutung für die Sprengtechnik in einem weiteren Forschungsthema bewusst in der Sprengpraxis angewandt und umfassend für verschiedene Sprengziele über und unter Tage nachgewiesen werden.

Mit den seinerzeit unter in-situ Bedingungen erzielten Sprengergebnissen konnten die genannten neuen, physikalisch begründbaren Zusammenhänge abgeleitet werden, von denen insbesondere die sonische Wirkung als Interaktion zwischen der Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes und der P- sowie S-Wellengeschwindigkeit der Festgesteine hervorzuheben ist. Die sonische Umsetzung der vom Sprengstoff erzeugten Stoßwellenfront im jeweiligen Medium Luft, Wasser und Festgestein wird die bisherigen Ansichten in der Sprengtechnik erheblich verändern sowie viele Vorgänge besser erklären helfen.

Dazu ist es notwendig, die noch bestehenden Fragen bei der Berechnung und Beurteilung der Vorgänge während sowie nach der detonativen Sprengstoffumsetzung durch weitere Untersuchungen zu beantworten. Auf diese Weise können die physikalisch definierbaren Zusammenhänge gesichert dargestellt werden.

Durch die Bohr- und Sprengarbeiten werden insbesondere im Nahbereich von Siedlungen, lokalen Bebauungen, Denkmälern, Hochdruckleitungen, Industrie- und anderen wichtigen Anlagen teilweise beträchtliche und vielschichtige Umweltbelastungen in Form von Lärm-, Staub- und Erschütterungen bewirkt. Jede Möglichkeit, derartige Umweltprobleme bewusst und sicher zu verringern, ist daher ein grundsätzliches Anliegen dieses Forschungsthemas „Sonische Wirkung“ zur Optimierung der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik.

Es ist die allgemeine Zielstellung der durchgeführten Forschungsarbeiten, die Wirkungsweise der sonischen Effekte in die Praxis umzusetzen und die umweltrelevanten Auswirkungen herauszuarbeiten und messtechnisch zu belegen. Nicht zuletzt sollten folgende, offene Fragestellungen beantwortet werden:

- Mit welchen bohr-, spreng- und zündtechnischen Parametern kann man unter Einbeziehung der physikalischen Zusammenhänge die Stückigkeit des Haufwerkes verkleinern?
- Lassen sich durch die sonische Wirkung der Sprengstoffe Erschütterungsimmissionen beeinflussen?
- Wie groß kann man eine Sprenganlage auslegen, ohne dass die zulässigen Erschütterungen ansteigen?
- Mit welchen neuen, innovativen Messtechniken können physikalische Zusammenhänge des Sprengmodells nachgewiesen werden?

Das bearbeitete Projekt hat sich diesen offenen Fragen durch komplexes Vorgehen gewidmet und letztlich den Modernisierungsprozess der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik vorangetrieben. Die praktischen Sprengversuche waren ursprünglich in zwei Natursteintagebauten vorgesehen und wurden auf vier Objekte erweitert. Dazu wurden zwei Tunnelprojekte unter Tage und zwei besondere Felsbaumaßnahmen in die Untersuchungen einbezogen, um möglichst umfassende, universelle Aussagen zur sonischen Wirkung ableiten zu können.

2 Stand der Technik und Forschungsziel

2.1 Bisherige Vorgehensweise zur Bemessung von Sprenganlagen über und unter Tage

Die Bemessung und Berechnung von Sprenganlagen, die Festlegung wichtiger Bohr-, Spreng- sowie Zündparameter über und unter Tage erfolgt auf der Grundlage von langjährigen Erfahrungen, empirischen Zusammenhängen, wirtschaftlichen Überlegungen sowie neuerdings durch eine spielerische Software ohne Bezug zur physikalischen Realität [HE 93, HU 99, JE 81, MÜ 09a, PE 94, ST 11, TH 78]. Im Ergebnis des abgeschlossenen Forschungsthemas „Umweltfreundliche Sprengtechnik“ konnte nachgewiesen werden, dass man Sprengungen auf der Grundlage der weiterentwickelten Modellvorstellung der Impulstheorie durch gefundene, physikalisch erklärbare Wirksamkeiten hinsichtlich der Zertrümmerung des Haufwerkes und der abgestrahlten Erschütterungen beeinflussen kann [BO 03, MÜ 01a, MÜ 03b, MÜ 09a, MÜ 10a].

Durch numerische Simulation und Sprengversuche an Plexiglasmodellen von im Bohrloch tiefsten gezündeten Kleinladungen fanden ROSSMANITH und Mitarbeiter heraus [RO 98a, RO 98b], dass sich je nach Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes und P- bzw. S-Wellengeschwindigkeit der Festgesteine verschiedene sonische Wirkungen einstellen. Das sich diese Wirkungsweise im Festgebirge zu recht aufbaut und umsetzt,

konnte in [MÜ 09b] eindeutig nachgewiesen werden. Für den Ablauf der Sprengung und die wirkungsvolle, erschütterungsarme Umsetzung des Sprengstoffes ist es von entscheidender Bedeutung, die Abstimmung der Detonations- mit den Gesteinsgeschwindigkeiten herbeizuführen, um die sonischen Wirkungen bewusst auszunutzen.

Der statistisch gesicherte Nachweis der sonischen Wirkungen im Festgebirge durch den Wechsel von Sprengstoffen, verschiedenen Zündfolgen und die ausgewogene Anpassung der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik nach dem gefundenen Sprengmodell steht noch aus [MÜ 09a]. Diese praktische Nachweisführung ist erforderlich, um die bisher noch ausschließlich verbreitete, empirische Vorgehensweise durch bewusste Anwendung der neuen Erkenntnisse zu verdrängen und mit neuen Bemessungsgrundlagen für Sprenganlagen verschiedener Sprengziele umzusetzen.

Wie bereits in [MÜ 09a] ausgeführt, werden nach wie vor zur Berechnung von Sprenganlagen und zur Beurteilung des Sprengergebnisses über sowie unter Tage nicht eindeutig erklärbare Theorien oder empirische Zusammenhänge zu Grunde gelegt [HE 93, HU 99, JE 81, JI 95, PE 94, RU 07, ST 11, TH 78].

In der neuesten Ausgabe des „ISEE Blaster’s Handbook™“ ist das bereits veraltete Trichtermodell durch moderne, numerische Berechnungen theoretisch aufgewertet worden. Der nach der Sprengung sich einstellende Trichter konnte durch Simulation der Vorgänge weitestgehend vorhergesagt werden (Bild 2.1). Auf diese Weise erhält man den Eindruck, dass diese Vorgänge eine „realitätsnahe“ Wirkung haben. Die Theorie der Trichterwirkung wird somit weiter für die Ladungsberechnungen verwendet [MÜ 09a, S. 17 - 19].

Es fehlt nach wie vor in der Sprengtechnik eine komplexe theoretische, durch physikalische Zusammenhänge und Messungen gestützte Analyse des Sprengvorganges, die universell für die wichtigsten Bohr- und Sprengverfahren über und unter Tage anwendbar ist.

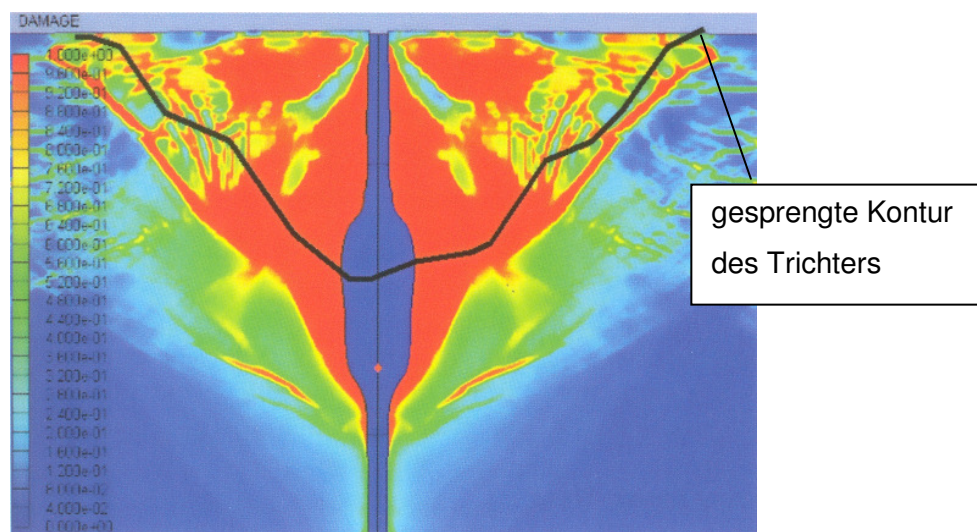


Bild 2.1: Vergleich des gesprengten Trichters mit dem numerisch vorherberechneten [ST 11 - S. 149]

Dazu gibt es bisher keine eindeutigen Hinweise zur Gestaltung von Zündanlagen. Über Tage beherrscht die Einzellochzündung mit den verschiedenen Verzögerungen zwischen den Ladungen die gegenwärtige Vorgehensweise. Eine simultane Zündung von mehr als zwei geladenen Bohrlöchern je Zeitstufe wird nur in den Betrieben umgesetzt, die durch das Geotechnische Sachverständigenbüro Dr. Müller gutachterlich betreut worden sind [z. B. FI 06]. Unter Tage werden verschiedene Einbrüche realisiert und der umliegende Hilfslochbereich gegenläufig gleichzeitig gezündet, ohne ein einheitliches, harmonisches Lösen des Festgebirges bewusst umzusetzen. Felsmechanische Zusammenhänge werden bei der Planung von Sprengarbeiten nicht beachtet. Die Tiefe des Abschlages wird unter Tage insbesondere durch die Standfestigkeit des Festgebirges und weniger wegen der Stückigkeit des Schuttermaterials oder der Sprengerschütterungen beeinflusst. Die Bewertung der Prognosebeziehungen zur Beurteilung der Sprengerschütterungen hat sich ebenfalls trotz der neuen Erkenntnisse in der Praxis nicht weiterentwickelt [MÜ 09a], so dass nach wie vor wenig umweltrelevante, emissionsarme und wirtschaftliche sprengtechnische Lösungen umgesetzt werden [MÜ 11b].

2.2 Forschungsziel als Beitrag zur Umweltentlastung

Die Erkenntnisse aus der bisherigen Vorgehensweise haben gezeigt, dass es notwendig ist, die noch bestehenden Fragen bei der Berechnung und Beurteilung der Vorgänge nach einer detonativen Sprengstoffumsetzung durch weitere Untersuchungen aufzuklären. Nur so können die physikalisch definierbaren Zusammenhänge gesichert dargestellt werden. Das Ziel der Forschungsarbeiten ist es, die sonischen Wirkungen und das physikalisch gestützte Sprengmodell hinsichtlich seiner entscheidenden Wirkungen einer energiesparenden Zertrümmerung und erschütterungsmindernder Umsetzung statistisch gesichert vorerst in zwei deutlich unterschiedlichen Festgebirgen durch mindestens je zehn Sprengungen nachzuweisen. Während der laufenden Forschungsarbeiten war das Geotechnische Sachverständigenbüro Dr. Müller zufällig mit zwei größeren Tunnelbauprojekten über und unter Tage beschäftigt. Die dort ausgeführten und unsererseits projektierten Sprengungen wurden in die Bearbeitung einbezogen, damit sich die neuen Erkenntnisse auch unter anderen Randbedingungen nachweisen lassen. Zudem wurde die Palette der Versuchsbetriebe auf vier erweitert, weil sich die dortigen Sprengziele in das Forschungsprogramm optimal einfügen ließen und die Ergebnisse umfassend für weitere Bedingungen abgesichert werden konnten.

Es ist die Zielstellung der Arbeit, die unter Praxisbedingungen angewandte Bohr-, Spreng- und Zündtechnik nach dem neuen Sprengmodell unter genereller Beachtung der sonischen Wirkung zu bemessen sowie für verschiedene Sprengziele auszulegen. Vor, während und

nach den Sprengungen sind die wichtigsten Parameter und Ergebnisse durch 3-Komponenten-Geophone, Dehnungssensoren, einen Radarsensor, einen 3-D-Laserscanner sowie durch andere geeignete Techniken zu erfassen.

Aus der komplexen, physikalischen Interpretation der Eingangsparameter und Messergebnisse ist eine Verbesserung des physikalisch begründbaren Sprengmodells und der Auslegung der bohr-, spreng- und zündtechnischen Parameter vorzunehmen, um insbesondere die Umwelteinwirkungen im weitesten Sinne zu verringern, bewusst zu beeinflussen und sicher zu prognostizieren.

Die neuen Erkenntnisse sollen die Grundlage für eine praxisbezogene, realistische, verallgemeinerungswürdige, verständliche und programmierbare Vorgehensweise zur Bemessung sowie Anpassung von Sprengungen mit verschiedenen Sprengzielen über Tage darstellen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Bewusste Bemessung, Vorbereitung und Auslegung der Sprenganlagen nach den Wirkprinzipien des neuen Sprengmodells unter Beachtung der sonischen Wirkung der Sprengstoffumsetzung.
- Komplexe messtechnische Begleitung von Sprengarbeiten vor, während und nach der Zündung mit den modernsten Verfahren und Geräten wie Dehnungssensoren, Geophone, Radarsensor, Einsatz eines 3-D-Laserscanners, fotogestützte Haufwerksanalyse, Messung der Detonationsgeschwindigkeit usw.
 - in 4 Natursteintagebauen
 - auf 2 Felsbaustellen und
 - bei 2 Tunnelbauobjektenmit unterschiedlichen Sprengzielen und Randbedingungen.
- Kontrolle der Stückigkeit, Haufwerkslage und der Auflockerung mit den 3-D-Laserscannererfassungen vor und nach der Sprengung in den Festgesteinstagebauen einschließlich Vergleich der Ergebnisse mit den Radarmessungen und deren Kalibrierung.
- Die Aufnahme der 2 Felsbaustellen und Tunnelbauobjekte in das Forschungsprogramm diene dem Nachweis der sonischen Wirkung bei Spaltsprengungen und dem unterirdischen Sprengvortrieb.
- Die komplexe Auswertung aller Messergebnisse und Eingangsparameter der in-situ Sprengungen wird zur Verbesserung des physikalischen Sprengmodells genutzt.
- Das eigentliche Ziel der vorgenannten Schwerpunkte besteht darin, mit den nachgewiesenen Ergebnissen umsetzbare, praktische Grundsätze zur Dimensionierung und Bemessung von Sprenganlagen über und unter Tage unter

Beachtung der energetischen Ausnutzung der Sprengstoffe, der optimalen, zulässigen Erschütterungsimmissionen und weiterer Umweltentlastungen zu erarbeiten. Diese Vorgehensweise wird die bisherige empirische Betrachtung der Vorgänge ablösen und eine sichere Handhabung der Sprengtechnik für verschiedene Sprengziele über und unter Tage garantieren.

- Die Grundsätze werden für folgende Sprengungen erarbeitet:
 - Spaltsprengungen über Tage
 - Zertrümmerungs- oder Gewinnungssprengungen über Tage
 - Sprengungen im Vortrieb unter Tage.
- Infolge des während der Forschungsarbeiten gefundenen sowie nachgewiesenen Zusammenhanges zwischen der Zertrümmerung und Erschütterung wurde letztlich die Erfassung, Bewertung, Prognose und Abgrenzung neuer zulässiger Anhaltswerte von Sprengerschütterungsimmissionen in die Zielstellung aufgenommen.

Das bisher erarbeitete Sprengmodell wird durch weitere Messungen und gezielte Ausführungen von Sprenganlagen nach den physikalischen Prinzipien weiter verbessert, statistisch gesichert und verifiziert. Dazu werden erforderlichenfalls auch andere messtechnisch begleitete, aktuelle Sprengungen aus anderen Bereichen ergänzend einbezogen, die nach den Prinzipien der Impulstheorie und sonischen Wirkungen durchgeführt worden sind.

Es wird letztlich erwartet, dass die theoretischen Grundlagen gesichert nachgewiesen und in praktikablen Lösungsgrundsätzen für die Praxis vereinfacht aufbereitet werden.

3 Physikalische Grundlagen

3.1 Die sonische Wirkung

Der österreichische Physiker ERNST MACH fand 1886 heraus, dass sich durch einen Körper, der sich mit der (P-) Wellengeschwindigkeit der Luft bewegt der sogenannte „Überschallknall“ - die sonische Wirkung - eine explosionsartige Reaktion mit spürbaren Effekten eines Knalles und einer Luftdruckwelle entsteht. Das Verhältnis der sich bewegenden, einwirkenden Geschwindigkeit zur (P-) Wellengeschwindigkeit der Luft wird nach dem Physiker mit Mach (Ma) bezeichnet (1):

$$1\text{Mach} = 1\text{Ma} = \frac{\text{Geschwindigkeit eines Flugzeuges (340 m/s)}}{\text{(P-) Schallwellengeschwindigkeit der Luft (340 m/s)}} = \frac{c_F}{c_L} \quad (1)$$



Bild 3.1: Die Herausbildung eines Machkegels nach dem Erreichen der Machzahl von 1 = Durchbruch der Schallmauer; der Überschallknall bzw. die Schockwelle produzierte eine Wolke [Aufnahme von John Gay 1999 in „Sports Illustrated“ des Fluges von Lieutenant Ron Condilore/US Navy]

Durch die zunehmende Fluggeschwindigkeit wird vor dem Flugzeug die Luft stark komprimiert und entspannt sich nach Erreichen der Schallmauer (= 1 Mach) hinter dem Flugobjekt explosionsartig durch Ausdehnung. Die vom Flugzeug zu diesem Zeitpunkt ausgehenden Drucksprünge werden am Erdboden als „sonic boom“/Überschallknall vernommen.

Im Bild 3.1 wurde ein entstandener Machkegel im Moment des Erreichens der Überschallgeschwindigkeit fotografisch erfasst.

Man glaubte lange Zeit, dass dieser Vorgang ausschließlich im gasförmigen Medium stattfindet.

H. P. ROSSMANITH und seine Mitarbeiter an der TU Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik fanden durch numerische Modellrechnungen und sprengtechnische Laborversuche an Plexiglasmodellen heraus, dass die Interaktion von Geschwindigkeiten auch in Flüssigkeiten und festen Medien stattfindet [RO 98a, RO 98b, RO 99]. Um eine detonierende Ladung entsteht die sonische Wirkung durch die Reaktion der Stoßwelle mit der P- oder Druck- bzw. S- oder Scherwellengeschwindigkeit des Festgesteines bzw. jeweiligen Mediums (Bild 3.2). Nach den Arbeiten von ROSSMANITH wurden die

nachfolgenden, grundsätzlichen Auswirkungen und möglichen Fälle beschrieben [RO 98b] (Bild 3.3):

Subsonischer Fall bei $c_d < c_s < c_p \Rightarrow$ es entsteht keine Machfront;

führt zu geringer Neubruchentwicklung um die Ladung und zu vergleichsweise sehr hohen Erschütterungen

Transsonischer Fall bei $c_s < c_d < c_p \Rightarrow$ es entsteht die S-Machfront;

bewirkt eine mittlere bis gute Zertrümmerung in der Zone um die detonierende Ladung und löst mittlere Erschütterungen aus

Supersonischer Fall bei $c_s < c_p < c_d \Rightarrow$ es bilden sich die P- und S-Machfronten;

erzielt eine optimale bis sehr gute Zertrümmerung und regt vergleichsweise die geringsten Erschütterungen an

Zum besseren Verständnis dieser Zusammenhänge dient das WEG-ZEIT-LAGRANGE-DIAGRAMM des Bildes 3.3.

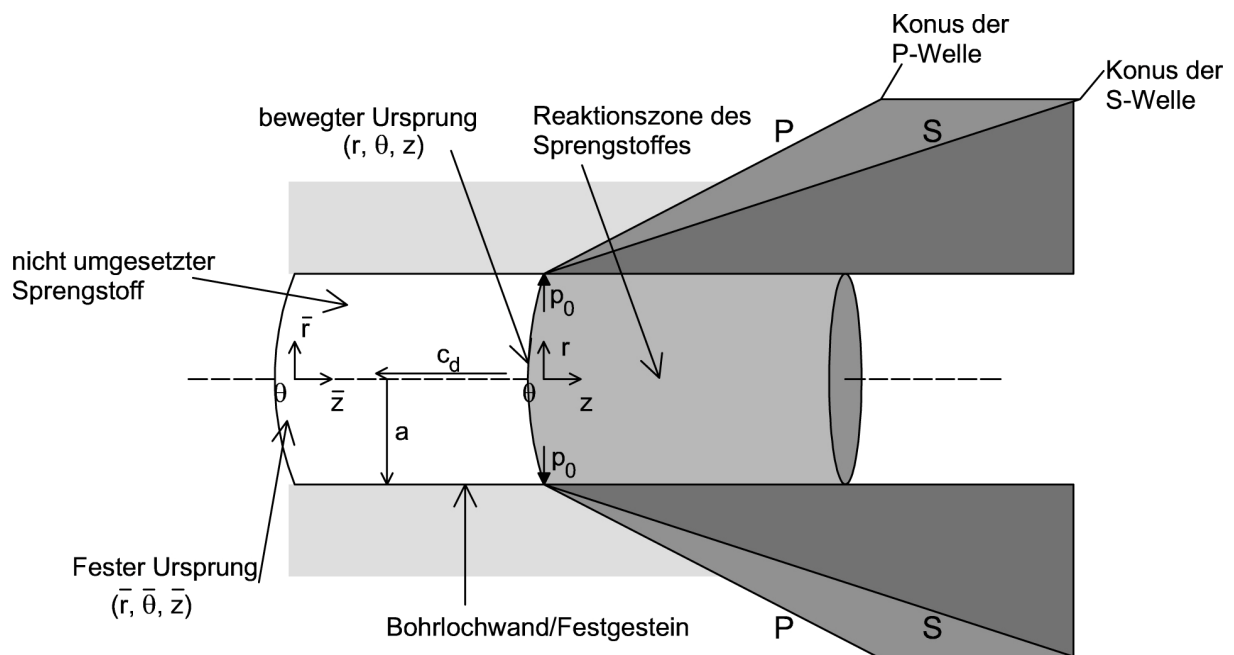


Bild 3.2: Theoretischer Machkonus der Stoßwelle im Festgestein bei einer supersonischen Umsetzung des Sprengstoffes ($c_s < c_p < c_d < \infty$) [MÜ 13]

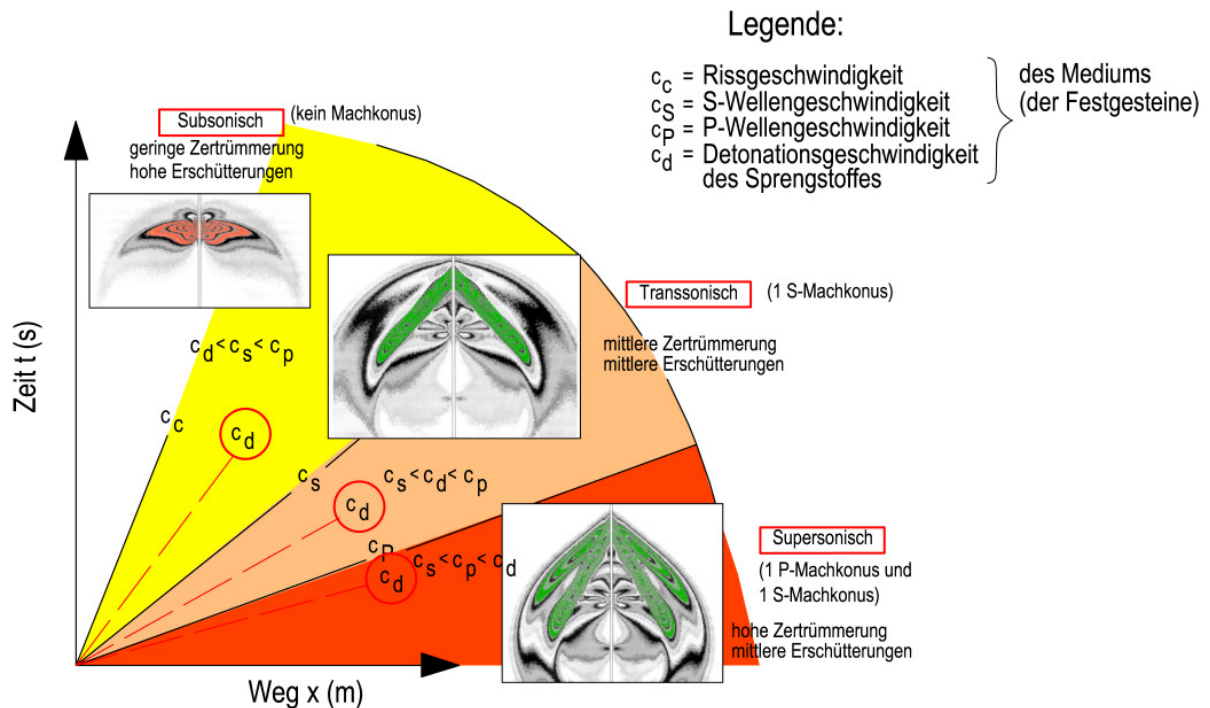


Bild 3.3: Prinzipdarstellung der sonischen Wirkungen in Beziehung zu den Geschwindigkeiten c_s , c_p und c_d im vereinfachten WEG-ZEIT-LAGRANGE-DIAGRAMM

Damit sich die sonischen Effekte optimal umsetzen können, sollten die Sprengstoffe direkt an der Bohrlochwandung resp. am Festgestein anliegen (Bild 3.2).

Phänomenologisch kann man die wahrnehmbare Explosion durch die detonative Sprengstoffumsetzung mit einer extremen Entspannung des infolge der Stoßwelle stark unter Spannung gesetzten Sprengmediums hinter dem Machkonus vergleichen. Die in das Festgebirge entsandte restliche Stoßwelle erzeugt die messbaren Sprengerschütterungsimmissionen im zurückbleibenden Medium. Die Erschütterungen werden durch die Rückstoßwirkung der Detonation erzeugt.

Es entstehen auch bei Erdbeben explosionsartige Vorgänge, die nicht durch Sprengstoffe sondern durch sehr große Spannungen bzw. Entspannungen in den Erdkrustenteilen erzeugt werden. Die Vorgänge der Sprengstoffumsetzung im Festgebirge erhalten auf diese Weise eine neue Erklärung, die sich naturwissenschaftlich durch Vergleiche mit ähnlichen Phänomenen in das bisherige Wissen besser einzufügen scheint.

Zur richtigen Umsetzung der sonischen Wirkung in die Sprengpraxis ist es somit erforderlich, die P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Festgesteine bzw. des Sprengmediums zu kennen [MÜ 09]. Inzwischen liegen die Wellengeschwindigkeiten der verschiedensten

Festgesteine vor, die im Labor des Geotechnischen Sachverständigenbüros Dr. Müller ermittelt wurden. Im Bild 3.4 ist der Zusammenhang der P- und S-Wellengeschwindigkeit von Festgesteinen jeder Entstehung eingetragen und die schematisierte Angabe der Detonationsgeschwindigkeitsbereiche der wichtigsten Sprengstoffgruppen wie ANFO-Gemisch, Heavy ANFO (Gemisch aus ANFO und Emulsions Sprengstoff), Emulsions Sprengstoffe, gelatinöse Sprengstoffe, Nitropenta und TNT vermerkt. Mit diesem Diagramm kann je nach Gesteinseigenschaften die richtige Wahl des Sprengstoffes erfolgen, um mindestens eine transsonische oder besser eine supersonische Wirkung zu erreichen. Für die Abschätzung der P-Wellengeschwindigkeiten der Gesteine kann das Bild 3.5 genutzt werden. Die akustische Impedanz (P) nimmt mit der Größe der P-Wellengeschwindigkeit bei allen Gesteinsarten gleichermaßen zu. Über die Größe der P-Wellengeschwindigkeit darf mit dem Bild 3.4 die S-Wellengeschwindigkeit abgeschätzt werden.

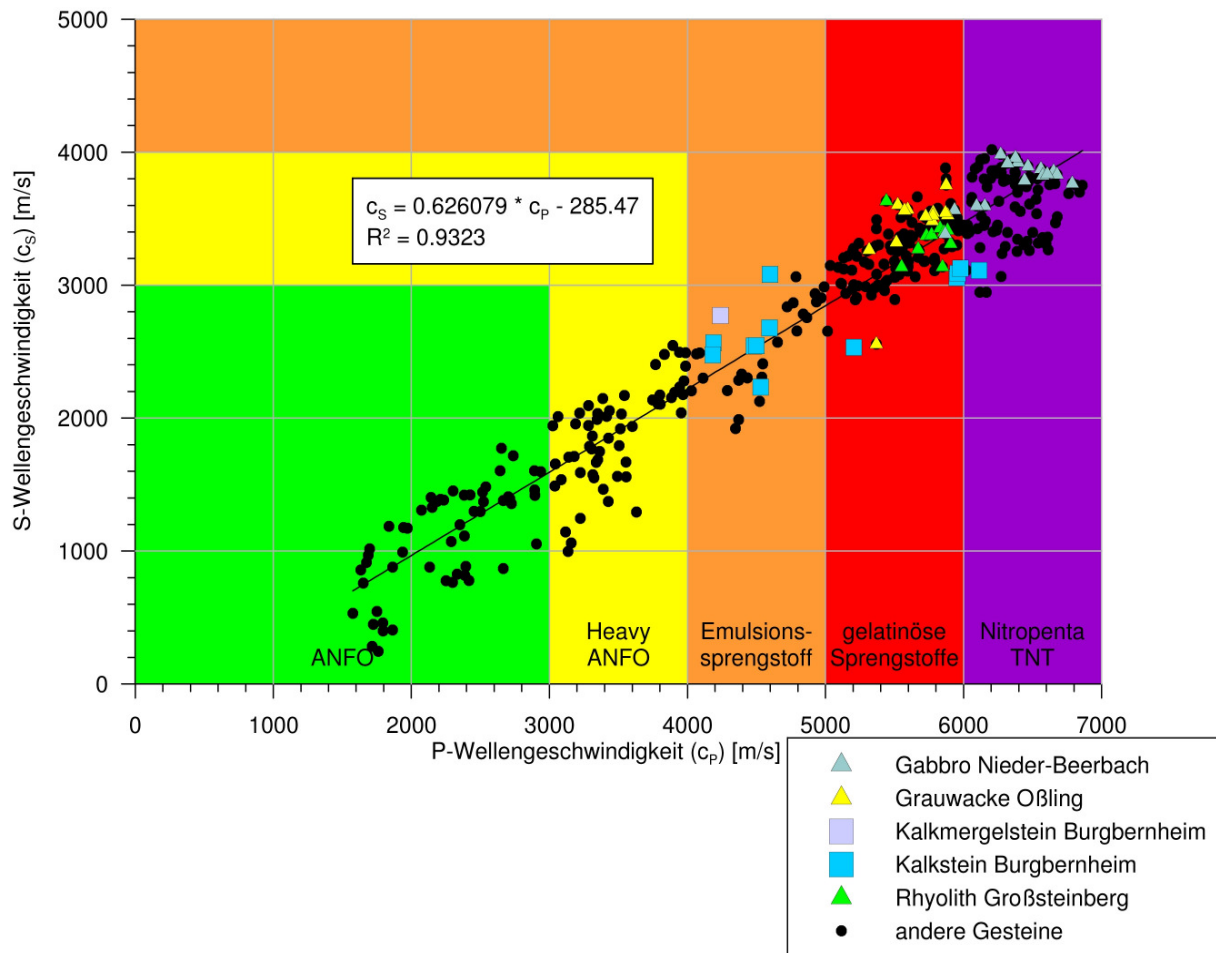


Bild 3.4: Zusammenhang der P- und S-Wellengeschwindigkeit der verschiedensten Festgesteine mit schematisierter Angabe der Detonationsgeschwindigkeitsbereiche wichtiger Sprengstoffe

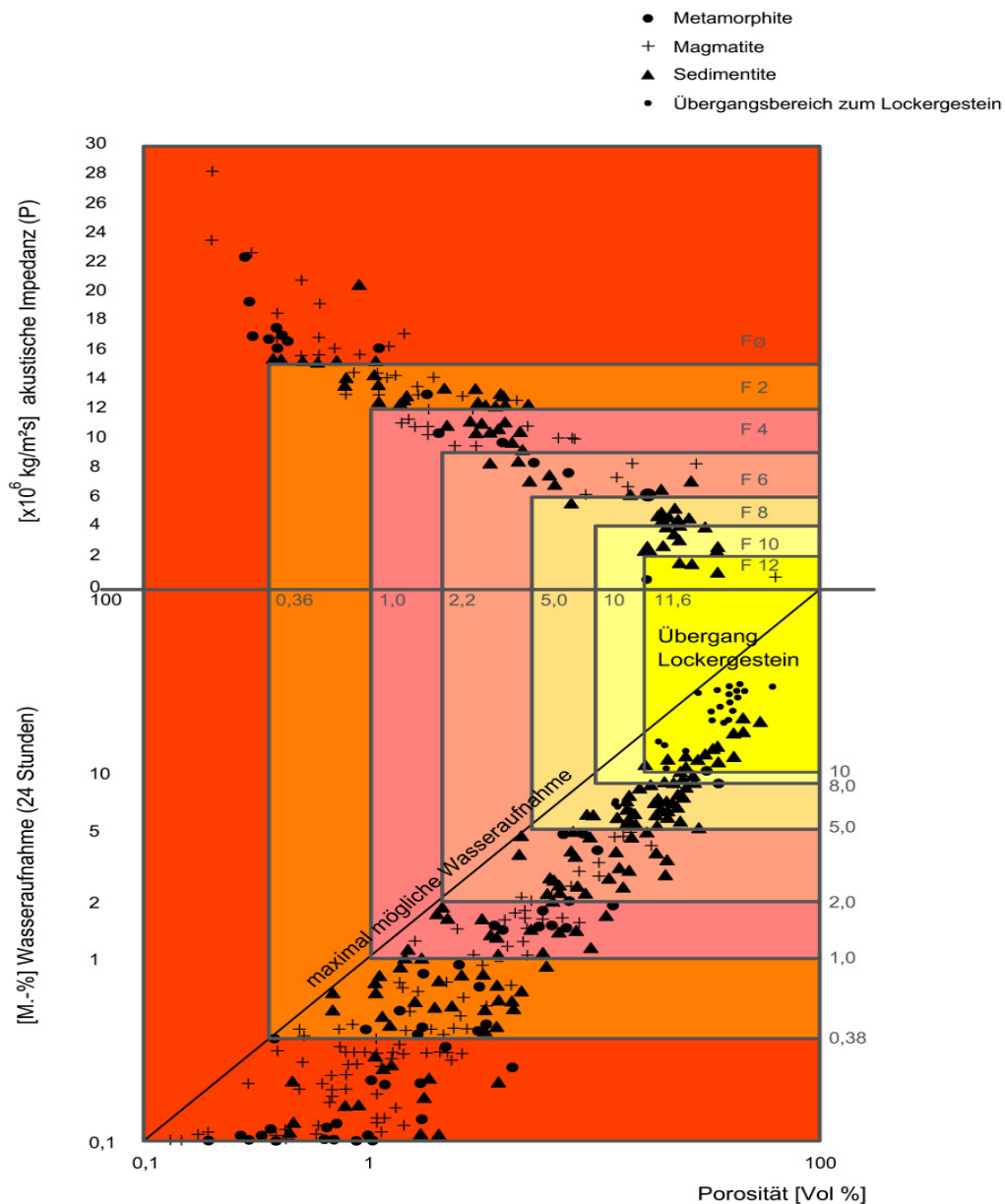


Bild 3.5: Statistisch gesicherte Einteilungsmöglichkeiten aller Festgesteine hinsichtlich der akustischen Impedanz (P) [10⁶ kg/(m²s)] (akustische Impedanz (P) = Rohdichte · P-Wellengeschwindigkeit) und deren Zusammenhänge mit der Porosität [Vol.-%] und Wasseraufnahme [M.-%] [aus MÜ 11a]

Mit dem Diagramm des Bildes 3.6 kann die erreichbare Sonizität einer Sprengung berechnet werden. Wie später noch nachgewiesen wird, steigen mit zunehmender Machzahl die zerstörenden Kräfte der entstehenden Stoßwelle an. Je größer die Machzahl, umso kleiner wird der Winkel der Machfront oder Stoßwelle [YO 04]:

$$\sin \alpha = \frac{c_L}{c_F} \quad (2)$$

Mit der Verkleinerung des Winkels α nimmt die zertrümmernde, schneidende Wirkung der Stoßwelle zu (Bild 3.7). Das Bild 3.7 zeigt den bedeutenden Einfluss der Machzahl bzw. des Winkels α auf die Sprengwirkung und belegt durch die Einbeziehung des Fluges der Meteoriten, dass die sonischen Effekte auch in der Natur verbreitet sind. Die Vorgänge bei Erdbeben müssten in dieser Hinsicht ebenfalls analysiert werden, weil Bewegungen und Brüche mit Wellenausbreitungen im Zusammenhang stehen. Dieses Prinzip ist empirisch, ohne Kenntnis des sonischen Effektes der Machfront bei der Entwicklung der Hohl- oder Schneidladung verwirklicht worden (Bild 3.8). Die Schneidwirkung entsteht nur dann, wenn zwischen den Ladungskörpern und dem zu trennenden Bauteil ein genügend breiter Luftspalt belassen wird. Der Schneidstrahl bildet sich je nach der supersonischen Umsetzung des Sprengstoffes im Luftspalt mit $\alpha = 2,5 - 3,4^\circ$ aus, wobei die Machzahl von 17 - 24 entsteht (Bild 3.7 und 3.8).

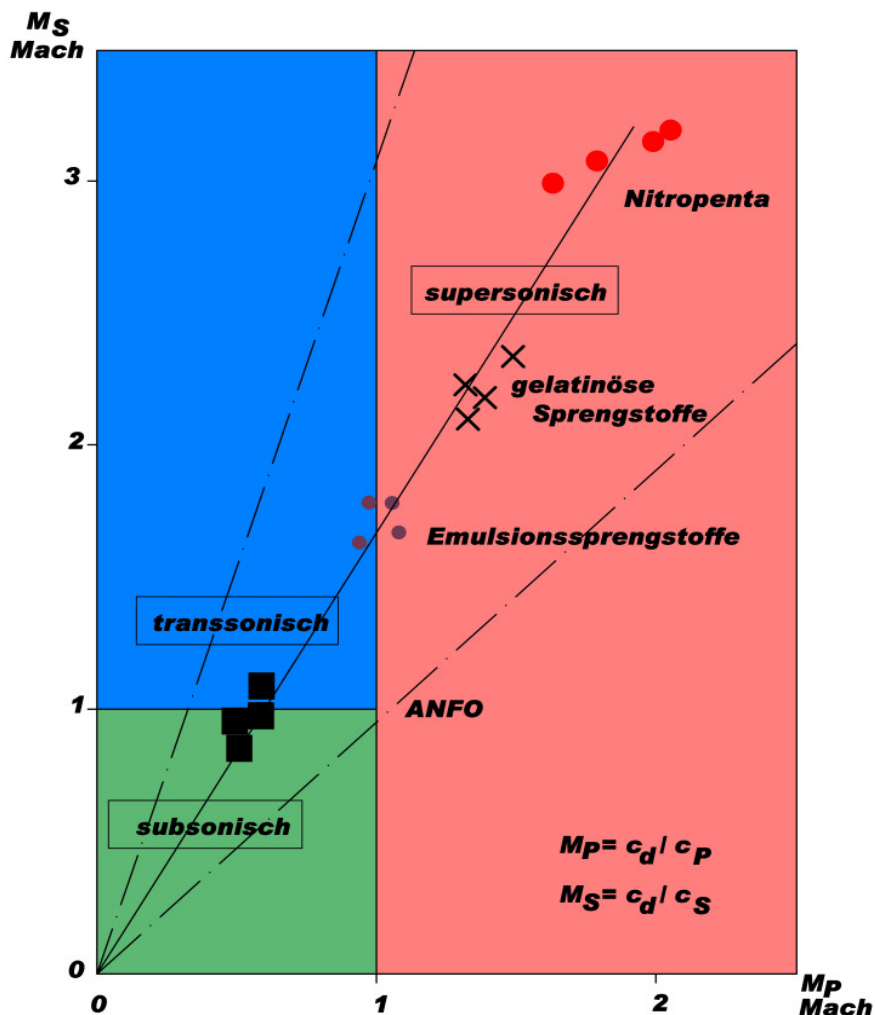


Bild 3.6: Diagramm zur Bewertung der sonischen Wirkungen von Sprengungen im Festgebirge beispielhaft für Granodiorit und verschiedene Sprengstoffe berechnet

Aus der hohen Machzahl und dem kleinen Winkel α der Machfront kann die zerstörerische Kraft des Strahles abgeleitet und die eigentliche Wirkungsweise der Hohlladung verstanden werden.

Bei Sprengungen von Festgebirgen unter Wasser wird je nach Detonationsgeschwindigkeit der eingesetzten Sprengstoffgemische eine supersonische Wirkung von 3,5 - 5,5 Mach erzeugt (Bild 3.7). Die von der Sprengstoffumsetzung ausgehenden Stoßwellen reichen aus, die in unmittelbarer Nähe der initiierten Ladung befindlichen Zünder zu zerstören. Aus diesem Grunde müssen die Einzelladungen gleichzeitig gezündet werden.

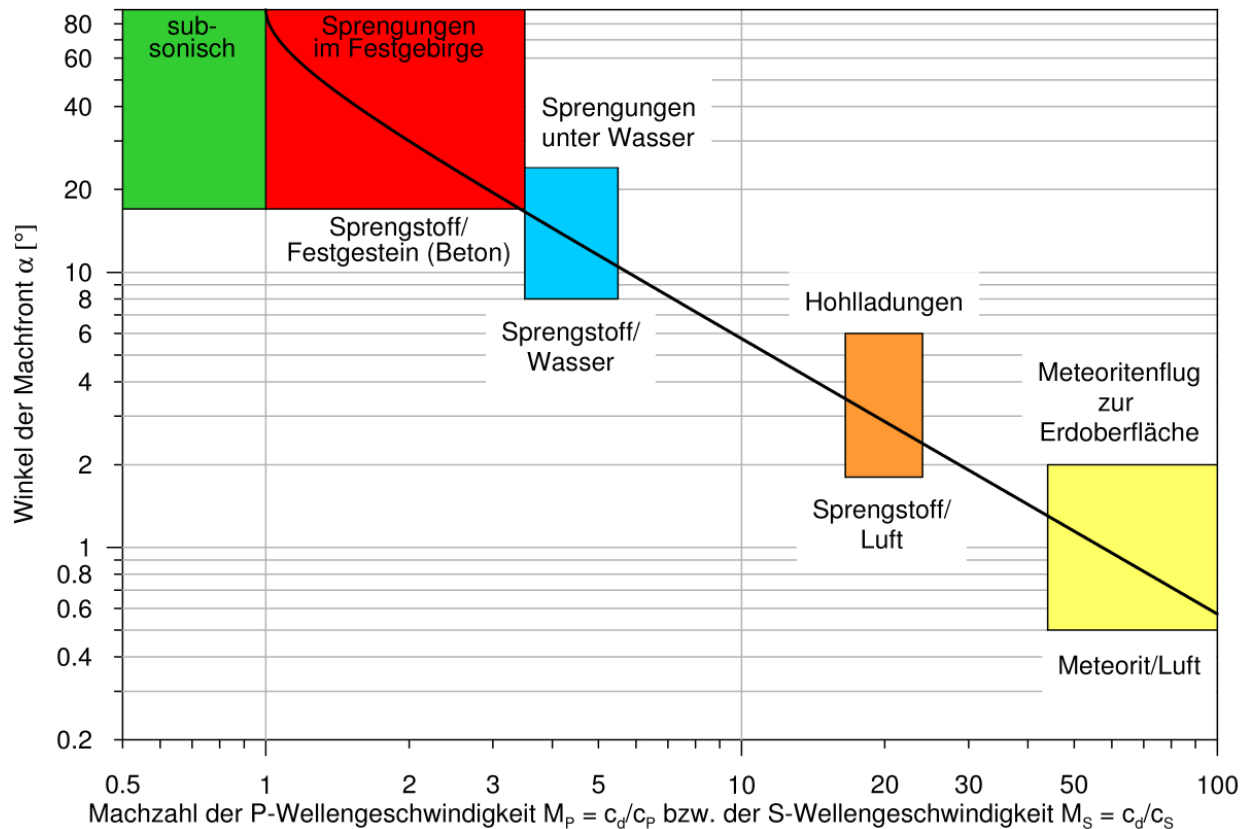


Bild 3.7: Beziehung zwischen der Machzahl für P- und S-Wellengeschwindigkeiten sowie dem Winkel α der Mach- oder Stoßwellenfront; für c_d kann auch c_F eines Flugkörpers stehen; die möglichen Winkel α für die einzelnen Wirkungsbereiche bis zum Flug von Meteoriten sind farbig gekennzeichnet

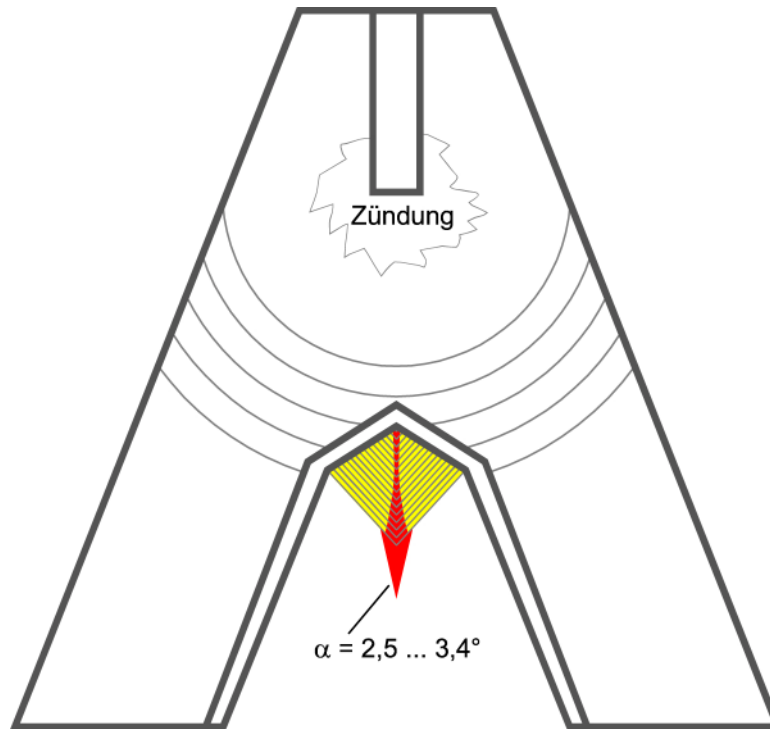


Bild 3.8: Die sonische Wirkung einer Hohlladung erzeugt einen Schneidstrahl von 2,5 - 3,4°

Dazu muss ferner zwingend auf die vorhandene Umgebung unter Wasser geachtet werden, weil Zerstörungen entstehen können und Fischbestände gefährdet werden [HE 93]. Unterwassersprengungen erfordern infolge der sonischen Effekte erhebliche Sicherheitsvorkehrungen.

Aus den Modellversuchen von ROSSMANITH et al. [RO 98a] und aus Bild 3.1 geht hervor, dass der effektive Machkegel, in dem sich die Vorgänge abspielen, nur einen begrenzten Durchmesser hat. Die Größe und der Winkel α des Machkegels hängt vom Sprengstoff, seiner Mischungshomogenität, vom Sprengmedium, dem Ladungsdurchmesser, den Einschlussbedingungen im Bohrloch und von der Häufigkeit der Trennflächen ab. Die praktischen Schlussfolgerungen zu dieser Wirkungsweise enthält das Bild 3.9, wenn das

$$\text{Seitenverhältnis } \lambda_s = \frac{\text{Bohrlochabstand } (a_B)}{\text{Vorgabe } (w)} \quad (3)$$

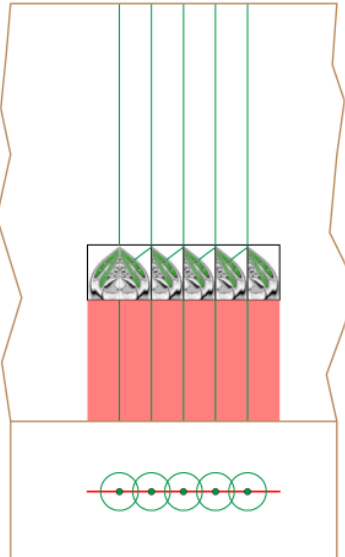
bewusst entsprechend dem jeweiligen Sprengziel einer zertrümmernden Gewinnungssprengung oder Zertrümmerungssprengung bzw. einer flächenhaften Spaltsprengung ausgelegt wird. Das Bemerkenswerte an dieser Darstellung ist die Problematik der Überlagerung der Machkegel der Ladungen.

- Überlagerung der Machfronten der Bohrlochladungen
- flächenhaft spaltende Wirkung
- Erschütterungen werden von der Lademenge aller Bohrlöcher einer Reihe beeinflusst
- a_{BS} = Bohrlochabstand bei Spaltsprengungen

$$a_{BS} < a_{Bkrit} < a_{BZ}$$

- keine Überlagerung der Machfronten der einzelnen Bohrlochladungen
- räumliche Zertrümmerung
- Erschütterungen werden von der Lademenge W_B eines Bohrloches beeinflusst
- a_{BZ} = Bohrlochabstand bei Zertrümmerungssprengung

Schnitt durch eine Spaltsprengung (gleichzeitige Zündung)



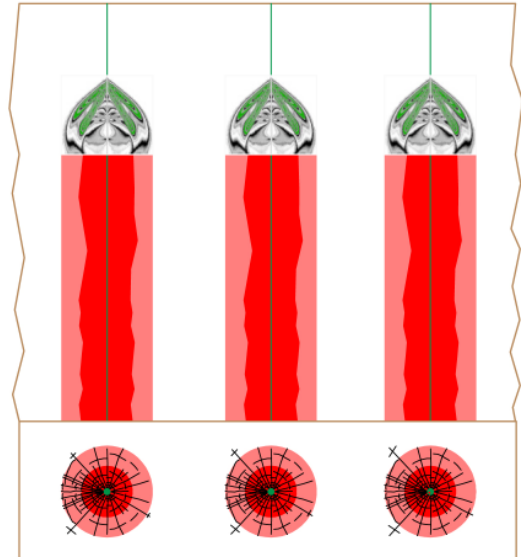
supersonische Auslegung

a_{Bkrit} ist abhängig von

- Bohrlochdurchmesser
- Lademenge pro Meter
- Sprengstoff
- P-, S-Wellengeschwindigkeit des Festgesteines

← Grundriss →

Schnitt durch eine Gewinnungssprengung (gleichzeitige Zündung)



trans- oder supersonische Auslegung

Bild 3.9: Grundsätzliche Auswirkungen von trans- und supersonisch ausgelegten Sprengungen bei gleichzeitiger Zündung einer Reihe von Einzelladungen

Werden durch die gleichzeitige Zündung einer Bohrlochreihe mit geringen Bohrlochabständen die Machkegel überlagert, entsteht ein durchgängiger flächenhafter Bruch = Spaltsprengung (Bild 3.9 - linker Teil). In diesem speziellen Fall muss für die Bewertung der Sprengerschütterungen die Sprengstoffmenge der gesamten Spaltsprengung zugrunde gelegt werden. Überschreiten die Bohrlochabstände die kritische Größe können sich die Machkegel nicht überlagern und es muss für die Beurteilung der Erschütterung die einzelne Ladung der Bohrlöcher berücksichtigt werden. Damit wird die bisherige Vorgehensweise der Erschütterungsbewertung mit der Lademenge pro Zündzeitstufe auf eine andere Art und Weise ad absurdum geführt [MÜ 09a].

Nicht zuletzt muss bei der Bewertung des sonischen Effektes beachtet werden, dass vorhandene Risse, Brüche, Spalten, Materialwechsel usw. den Durchgang der Stoßwelle beeinflussen oder schwächen. Je weniger der Wellengang behindert wird, umso stärker kann sich die sonische Wirkung umsetzen. Insbesondere die Trennflächen schwächen die Möglichkeit der Wellenübertragung und den Wirkungsradius des Machkegels. Die Zertrümmerungswirkung und damit der sonische Effekt sind in weniger geklüfteten Festgebirgen erheblich größer als in stark klüftigen (Bilder 3.10 und 3.11).

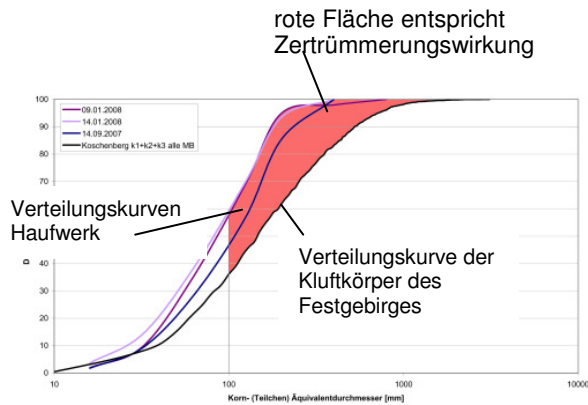


Bild 3.10: Die transsonische Wirkung erzielte infolge der großen Klufthäufigkeit eine mäßige Zertrümmerung (Meta-Grauwacke Koschenberg)

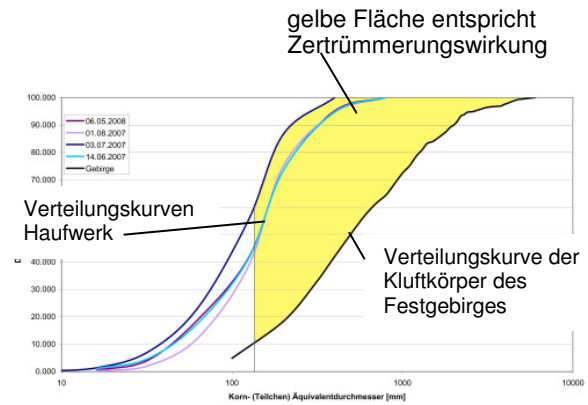


Bild 3.11: Die transsonische Wirkung verursachte eine größere Zertrümmerung infolge der geringen bis sehr geringen Klufthäufigkeit (Kalkstein Elbingerode)

Praktische Schlussfolgerungen:

- Die sonische Wirkung hat für die Sprengtechnik in allen festen, flüssigen und gasförmigen Medien eine fundamentale sowie universelle Bedeutung.
- Der Sprengstoff ist bei Sprengungen über und unter Tage hinsichtlich der Detonationsgeschwindigkeit an die P- und S-Wellengeschwindigkeiten der zu sprengenden Festgesteine anzupassen.
- Die Sprengstoffe sollten einheitlich sein und möglichst bündig am zu sprengenden Medium anliegen und das Bohrloch bis zum Endbesatz voll ausfüllen. Patronierte Sprengstoffe liegen nur teilweise an der Bohrlochwandung an und ergeben einen Füllungsgrad von $\leq 0,75$.
- Bei Spaltsprengungen geht zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen die gesamte Lademenge der Sprengung ein; die Sprengung muss supersonisch ausgelegt sein.
- Wenn der kritische Bohrlochabstand größer als der des Machkegels ist, darf trotz simultaner Zündung lediglich die Lademenge eines Bohrloches in die Erschütterungsbewertung einbezogen werden. Danach ist die Lademenge pro Zündzeitstufe für die Erarbeitung einer Erschütterungsprognose von Gewinnungs- oder Zertrümmerungssprengungen ungeeignet.
- Ein hoher, spezifischer Sprengstoffverbrauch in stark klüftigen Festgebirgen zeigt infolge hoher Energieverluste eine abgeminderte Wirkung. Die Trennflächen und häufiger Materialwechsel schwächen den sonischen Effekt der Wellenausbreitung.

3.2 Das physikalisch begründete Sprengmodell

Das im Rahmen und Ergebnis der Forschungstätigkeit „Umweltfreundliche Sprengtechnik“ erarbeitete, physikalisch begründete Sprengmodell wurde auf der Grundlage von komplex erfassten Messergebnissen vor, während und nach den unter Praxisbedingungen ausgeführten Sprengungen über und unter Tage mit dem theoretischen Ansatz der Impulstheorie entwickelt (Bild 3.12).

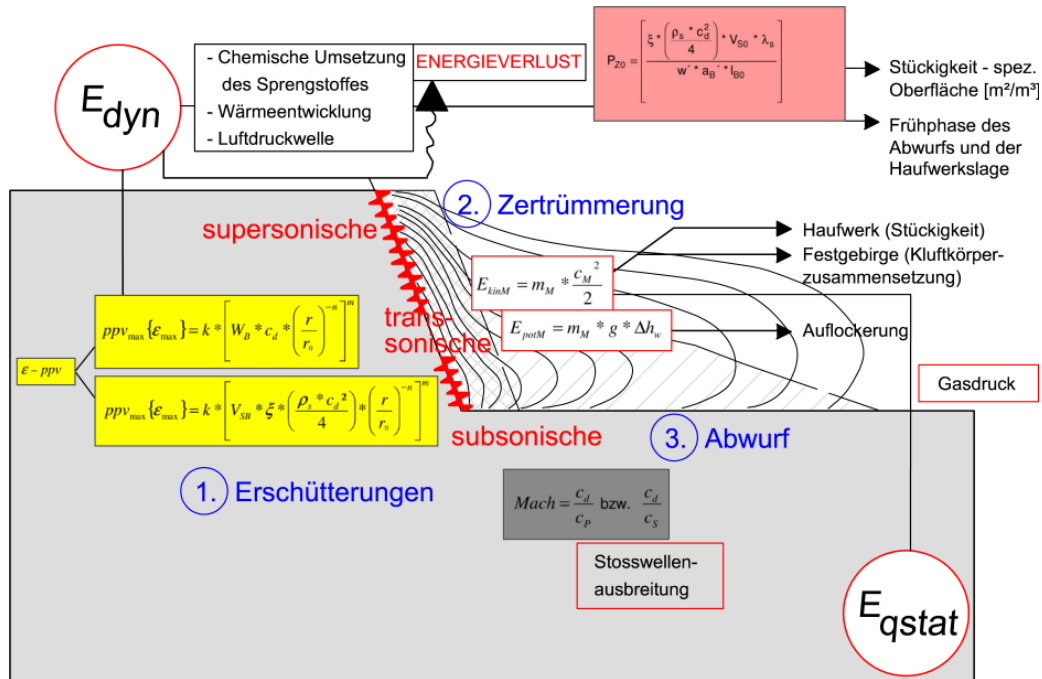


Bild 3.12: Das physikalische Sprengmodell der Wirkungen einer detonativen Sprengstoffumsetzung im Festgebirge [MÜ 09a]

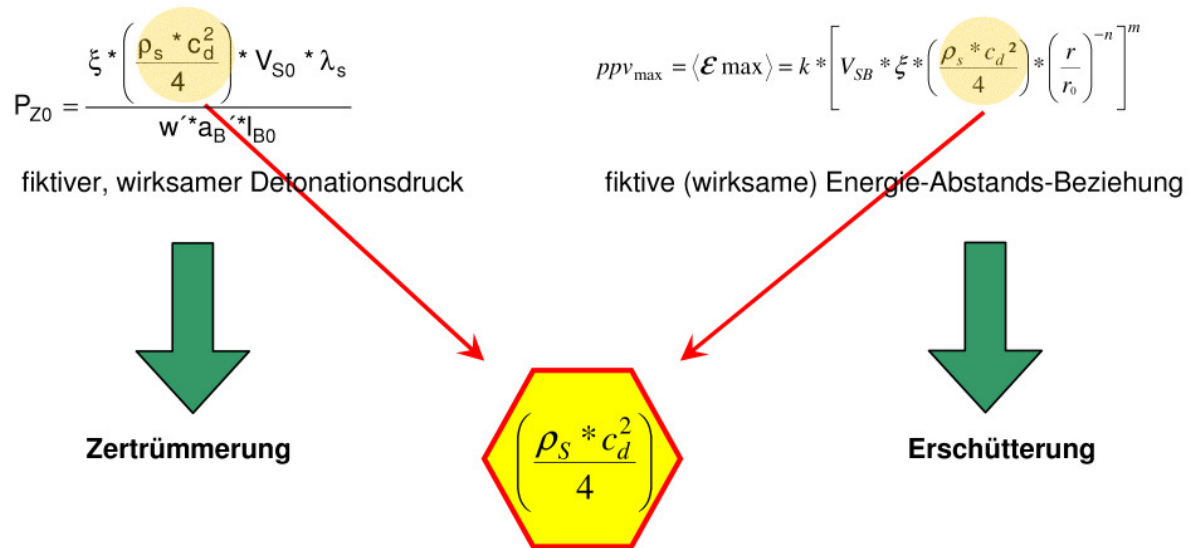
Während der laufenden Arbeiten zur Thematik „Sonische Wirkung“ bestätigte sich das Modell und erhielt inhaltliche Erweiterungen, die im wesentlichen die im Kapitel 3.1 dargestellten Effekte und Prinzipien der Sonizität betragen. Die auffälligsten Einflüsse gehen in diesem Modell von der sonischen Wirkung aus.

Es bestehen komplexe Zusammenhänge zwischen der Stückigkeit des gesprengten Haufwerkes, dem Abwurf und den ausgelösten Erschütterungen, die durch den Nachweis der sonischen Wechselwirkungen und der Modellvorstellung von der Impulstheorie in der Praxis bestätigt wurden [MA 12, MÜ 01, MÜ 09a, MÜ 10a, MÜ 11b, MÜ 11c, MÜ 13]. In jedem Bohrloch wird um eine detonierende Ladung der fiktive, wirksame Detonationsdruck P_{Z0} erzeugt, der letztlich im Wesentlichen für die Zertrümmerung des zu sprengenden Festgebirges verantwortlich ist. Die Größe des fiktiven, wirksamen Detonationsdruckes P_{Z0} kann zur Steuerung der Stückigkeit herangezogen werden, wenn diese auf das zu sprengende Einheitsvolumen bezogen wird.

Mit dem Modell von Bild 3.12 wird die Postulation des Zusammenhanges zwischen Erschütterungen und Zertrümmerung gemäß Bild 3.3 überprüft. Im Bild 3.13 wird durch die Gegenüberstellung des fiktiven, wirksamen Detonationsdruckes zur fiktiven Energie-Abstandsbeziehung deutlich, dass über die Größe des Detonationsdruckes

$$\left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \quad (4)$$

zwischen Zertrümmerung und Erschütterung die vorerst erwarteten Beziehungen bestehen: Je größer der Detonationsdruck, umso höher sind die Erschütterungen (Bild 3.14).



Zertrümmerung und Erschütterungen hängen in ihrer Wirkung zusammen

Bild 3.13: Der Zusammenhang zwischen fiktivem, wirksamen Detonationsdruck und den Erschütterungen durch die Beziehungen (5) und (6)

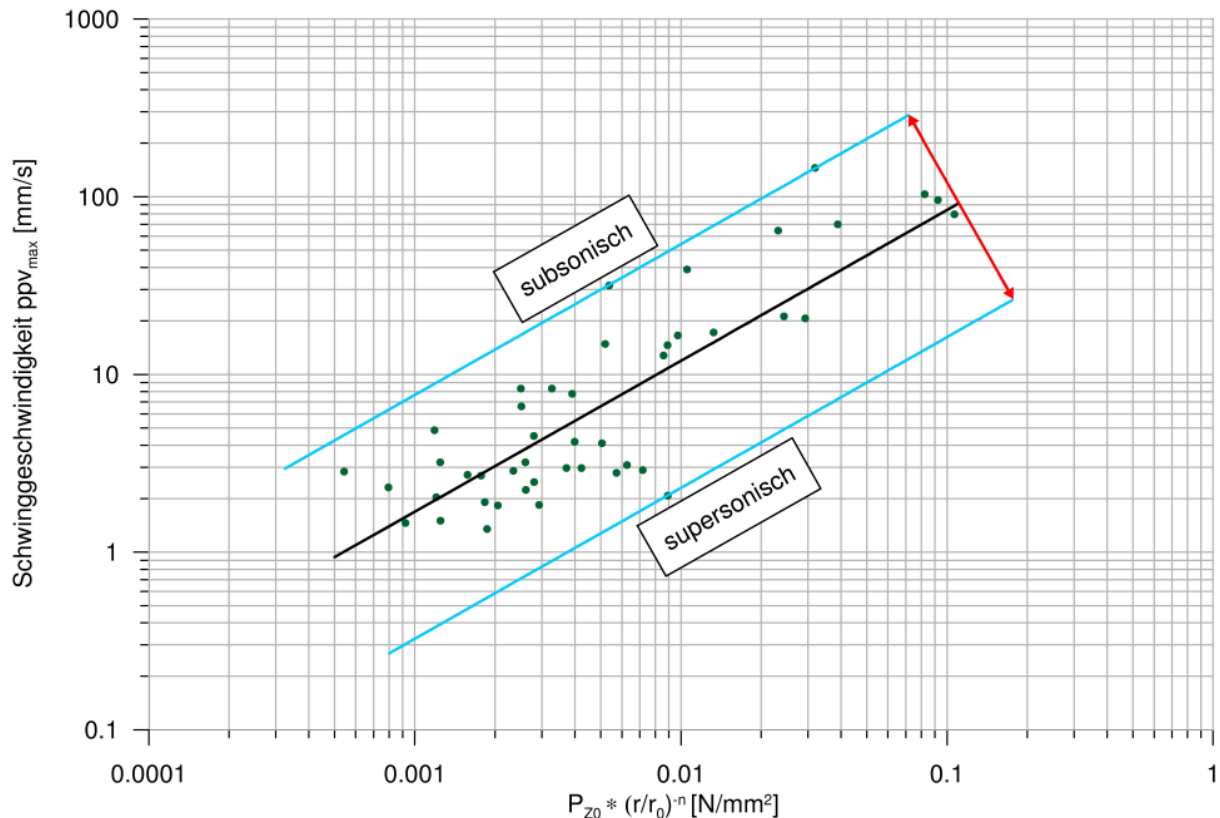


Bild 3.14: Beziehung zwischen der gemessenen Schwingungsgeschwindigkeit ppv und fiktiven,

wirksamen Detonationsdruck - Abstandsgröße $P_{z_0} \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-n}$

Die Streuungen der Schwingungsgeschwindigkeitswerte werden durch die Sonizität der Sprengungen verursacht. Je größer die Machzahl und je kleiner der Winkel α der Stoßwelle, desto geringer werden die Erschütterungen bei gleichen fiktiven, wirksamen Detonationsdruck.

Praktische Schlussfolgerungen:

- Mit den Eingangsgrößen von P_{z_0} kann die Sprenganlage zwecks Verbesserung der Stückigkeit bewusst gesteuert und optimiert werden. Je größer P_{z_0} , um so kleinstückiger wird das Haufwerk.
- Eine weitere Steuerungsmöglichkeit für die Erhöhung der Zertrümmerung ist der sonische Effekt. Mit zunehmender Machzahl nehmen die zerstörende Sprengwirkung zu und die Erschütterungsimmissionen ab.
- Die wichtigsten Vorgänge beim Sprengen können durch die Eingangsgrößen in den erarbeiteten Beziehungen bewusst beeinflusst werden (Bild 3.12).
- Die Umsetzung der nachgewiesenen Zusammenhänge in die sprengtechnische Praxis über und unter Tage verspricht eine umweltfreundliche Vorgehensweise infolge der großen Flexibilität der Möglichkeiten.

4 Natürliche Gegebenheiten in den Versuchsubjekten und ausgewählte Ergebnisse der Sprengversuche

4.1 Auswahl der Versuchsubjekte

Aus den ursprünglich vorgesehenen zwei Tagebauen mit unterschiedlichen Festgebirgen wurde nach Auswertung der ersten Ergebnisse erkannt, dass die Arbeiten auf verschiedene Sprengverfahren wie

- Zertrümmerungs- oder Großbohrlochsprengungen zur Gewinnung von Rohaufwerk für die Baustoffindustrie
- Spaltsprengungen zur Herstellung von glattwandigen Böschungen, Baugruben oder Tunnelkonturen
- Sprengungen im bergmännischen oder Tunnelvortrieb

über und unter Tage ausgedehnt werden sollte.

Aus diesem Grunde wurden die folgenden Tagebaubetriebe mit den dazu erforderlichen Sprengzielen und Problemen ausgewählt:

- Tagebau Oßling

häufige Gewinnungssprengungen im Nahbereich zur bestehenden Bebauung ab 150 m und Einhaltung der zulässigen Erschütterungen

- Tagebau Großsteinberg

Gewinnungssprengungen mit Nahbereich zur Lokotrakanlage und Einhaltung der zulässigen Erschütterungen

- Tagebau Nieder-Beerbach

Verbesserung der Stückigkeit des Haufwerkes und Einhaltung der zulässigen Erschütterungen

- Tagebau Burgbernheim

Sprengungen im Nahbereich einer DB-Strecke und Einhaltung der zulässigen Erschütterungen

In den Tagebauen wurde das volle Messprogramm weitestgehend umgesetzt.

Zur Überprüfung der Wirksamkeit von Spaltsprengungen und deren Erschütterungsimmissionen im unmittelbaren Nahbereich der vorhandenen Bebauung dienten die Baustellen an der Ortsumgehung der B 173 in Flöha/Sachsen und der Westtangente B 6/B 96 Bautzen.

Als Untertageobjekte wurden die Tunnelbaustellen Ramholz und Markovec genutzt, um die dort erzielten Sprengergebnisse nach den neuen Vorgehensweisen zu bewerten. Sowohl auf den Felsbaustellen als auch bei den Tunnelbauobjekten konnte der vorgesehene

umfangreiche messtechnische Aufwand nur teilweise zum Einsatz gebracht werden. Alle messtechnisch begleiteten Sprengungen und ausgewerteten Sprengergebnisse sind unter in-situ Bedingungen durchgeführt worden bzw. waren in den normalen Produktions- bzw. Bauprozess einbezogen.

Zur Beurteilung der Sprengbarkeit des Festgebirges über Tage und bzw. der Ausbruchfestigkeit unter Tage dient die einheitliche Klassifikation nach Bild 4.4.1. Auf diese Weise konnte erreicht werden, dass eine objektive Vergleichbarkeit zwischen den zu sprengenden Festgebirgen in allen Tagebauen sowie Baustellen über und unter Tage besteht.

Die Klassifikationsparameter Festigkeit (F) und Trennflächenhäufigkeit (T) wurden für die jeweiligen Gesteine und Gebirge erfasst. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln zusammengestellt.

Die Darstellung des Trennflächengefüges erfolgte in der unteren Halbkugel der Projektion des SCHMIDT'schen Netzes. Das SCHMIDT'sche Netz ist eine flächentreue, stereographische Projektion der unteren Lagenkugel mit Längen- und Breitenkreisen, in das die Normale einer Fläche wie Trennflächen, Störungs- und Schichtflächen als projizierter Durchstoßungspunkt eingetragen wird. Die Verteilung der Punkte wird entweder so ausgezählt, dass man Linien gleicher Flächenprozent ableiten kann oder generell nur die Punkte als Poldarstellung einträgt. Die Darstellung im SCHMIDT'schen Netz ist eine 3-D-Darstellung des Trennflächengefüges.

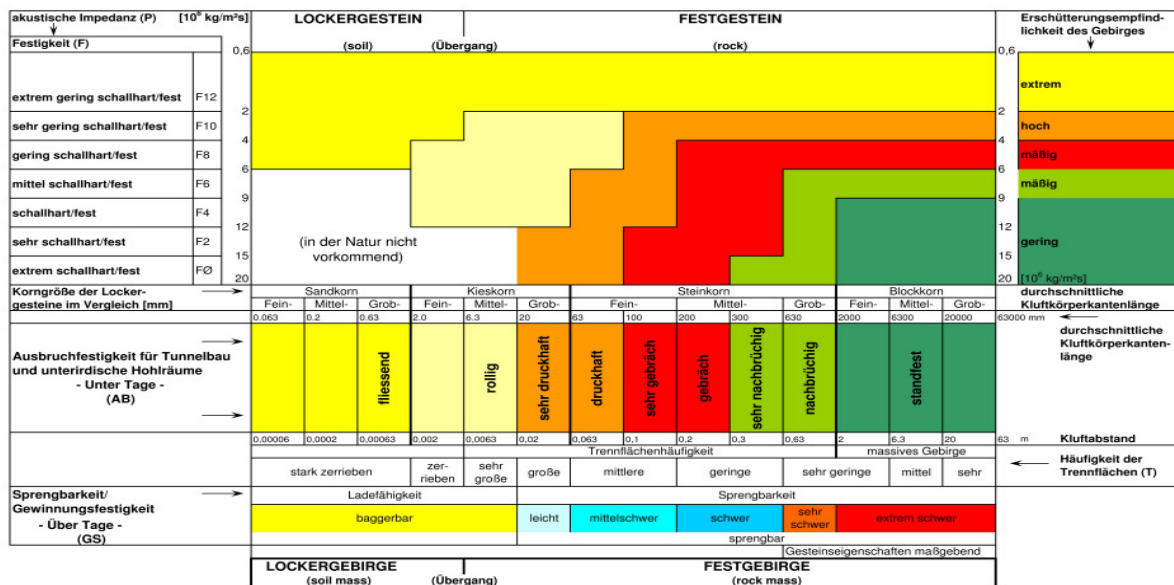


Bild 4.1.1: Klassifikation von Festgesteinen und Festgebirgen zur Einstufung der Gewinnungsfestigkeit, Ausbruchfestigkeit bzw. Sprengbarkeit über und unter Tage sowie der Erschütterungsempfindlichkeit des Gebirges mittels der Festigkeit (F) und der Trennflächenhäufigkeit (T) [MÜ 011a]

4.2 Tagebau Oßling/Sachsen

4.2.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge

Die Natursteinlagerstätte von Oßling besteht aus gefalteten Metagrauwacken mit eingeschalteten Tonschiefern des oberen Proterozoikums. Regionalgeologisch gehört die Metagrauwacke zum Niederlausitzer Antiklinalbereich, der der mittlere Teil der Lausitzer Antiklinalzone ist.

Die schwach kontaktmetamorph und durchweg regionalmetamorph überprägten Metagrauwacken stellen eine innige Wechsellagerung von ehemals tonig-schluffigen, feinsandigen, selten mittelsandigen klastischen Sedimenten dar, die gelegentlich organische Reste in Form von feinen Kohlenstoffpartikeln enthalten.

An entnommenen 13 Gesteinsproben der verschiedensten Metagrauwackenvarietäten und Wechsellagerungen von feinsandigen, schluffigen bis tonigen Korngrößen wurden die in Tabelle 4.2.1 zusammengestellten gesteinsphysikalisch-dynamischen Kennwerte mit dem Ultraschallgenerator USG 40 und dem PG-Oszilloskop Pico Scope® 3224 der Fa. GEOTRON ELEKTRONIK im Labor des Geotechnischen Sachverständigenbüros Dr. Müller ermittelt.

Tabelle 4.2.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der Varietäten der Metagrauwacke im Bereich des Tagebaues Oßling

Gesteinsphysikalischer dynamischer Kennwert	Dimension	Metagrauwacke ton-, schluffkörnig ... > zunehmend feinsandkörnig		
Rohdichte	g/cm ³	2,64 - 2,66	2,66 - 2,68	2,68 - 2,70
Poisson-Zahl	-	0,153 - 0,22 Ø 0,199	0,129 - 0,352 Ø 0,219	0,155 - 0,157 Ø 0,156
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	4513 - 5886 Ø 5559	5317 - 5779 Ø 5553	5592 - 5874 Ø 5735
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	3321 - 3563 Ø 3503	2556 - 3604 Ø 3286	3569 - 3754 Ø 3662
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	70,81 - 80,62 Ø 77,93	47,07 - 79,33 Ø 70,24	79,18 - 87,70 Ø 83,44
G-Modul	kN/m ²	29,14 - 33,68 Ø 32,51	17,41 - 34,51 Ø 29,15	34,22 - 37,98 Ø 36,10
akustische Impedanz (P)	10 ⁶ kg/(m ² s)	14,60 - 15,60 Ø 15,17	14,10 - 15,50 Ø 14,76	15,0 - 15,20 Ø 15,10
Festigkeit (F) [Bild 4.1.1]	-	sehr schallhart sehr fest	sehr schallhart sehr fest	sehr schallhart sehr fest

Die gesteinsdynamischen Eigenschaften lassen infolge der metamorphen Überprägung vergleichsweise geringe Unterschiede erkennen. Stärker abweichend sind schiefrige Zonen, die messtechnisch wegen des seltenen Auftretens nicht erfasst worden sind.

Im Bild 4.2.1 ist im Ausschnitt des Tagebaurisses von Oßling das erfasste Trennflächengefüge schematisch in Form der Hauptklüftscharen K_1 bis K_3 eingetragen. Das in den Bereichen der messtechnisch begleiteten Sprengungen erfasste Trennflächengefüge ist in den Bildern 4.2.2.1 und 4.2.2.2 dokumentiert.

Die gefaltete, bruchtektonisch überprägte und kontaktmetamorph zusätzlich beeinflusste Metagrauwacken-Tonschiefer-Wechsellagerung weist folgendes Trennflächengefüge auf (Bild 4.2.2.2):

- *K_1 -ac-Trennflächenschar*

NNW- SSE streichend und meist steil bis mittelsteil nach WSW bzw. teilweise nach ENE einfallend, durchsetzende Trennflächen teilweise mit Quarz, Markasit und Kalkspat mineralisiert; durch bruchtektonische Überprägung ist eine Diagonalschar mit einem Streichen von etwa NW - SE sowie steilem Einfallen nach SW und NE entstanden (K_1'), die die Trennflächen breit streuend mit hohem Durchtrennungsgrad erscheinen lässt.

- *K_2 -bc-Trennflächenschar*

Infolge der Faltung streut diese Schar mit der K_3 -Schichtflächenschar stark hinsichtlich ihrer Raumstellung und weist flaches bis mittelsteiles Einfallen auf; die schieferungsartigen Trennflächen stehen etwa senkrecht auf der K_3 -Klüftung; durch die genannte bruchtektonische Beeinflussung ist diese Schar ebenso überprägt worden wie die K_1 -Richtung; der Durchtrennungsgrad ist hoch; nicht selten ist eine Mineralisation von Kalkspat, Markasit und Quarz vorhanden.

- *K_3 -ab-Schichtflächen bzw. Trennflächenschar*

Die Schichten verlaufen faltenachsenparallel WSE - ENE und fallen nördlich der im Bild 4.2.1 eingetragenen, schematisierten Faltenachse steil nach NNW und südlich davon nach SSE ein. Die Schichtflächen stellen die wichtigste Trennflächenschar mit dem höchsten Durchtrennungsgrad dar.

Die im Bild 4.2.1 eingetragene, durch den Tagebau beobachtbare Faltenachse ist für die Lagerungsverhältnisse des sprengtechnischen Versuchsfeldes von Bedeutung.

Das Bild 4.2.3 vermittelt die Trennflächenabstandsverteilung der drei Hauptklüftscharen. Die Sprengbarkeit ist nach Bild 4.1.1 als überwiegend

mittelschwer

und bei größerer Bankmächtigkeit der Metaugrauwacke als schwer einzustufen. Die mittleren Trennflächenabstände sind für die Hauptklufscharen

K_1	-	0,127 m
K_2	-	0,165 m
K_3	-	0,103 m

und ergeben einen durchschnittlichen Klufkörper von

$$2,158365 \cdot 10^{-3} m^3.$$

4.2.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die zur Anwendung gebrachten und beeinflussten Bohr-, Spreng- und Zündparameter sind im Vergleich zu den vorherigen in Tabelle 4.2.2 zusammengestellt. Auf Grund der vormals angewandten recht kleinen Sprenganlagen von 10 - 20 Bohrlöchern mussten aller 1 bis 2 Tage Gewinnungssprengungen durchgeführt werden, die das Umfeld und die Anwohner somit hinsichtlich der häufigen Erschütterungsimmissionen ständig beeinträchtigten (Bild 4.2.4.1).

Es galt daher für den Tagebau Oßling eine besondere Zielstellung, die Sprenganlagen möglichst erheblich zu vergrößern, ohne dass die zulässigen Erschütterungseinwirkungen überschritten wurden. Die Vergrößerung der Sprenganlage sollte allerdings nicht zu Lasten einer zeitlich drastisch verlängerten Zündanlage erfolgen, sondern möglichst eine kurzzeitige Einwirkung für die Bewohner in der Umgebung des Tagebaues ergeben.

Ferner ist aus der Tabelle 4.2.2 ableitbar, dass man durch den früheren Einsatz von Sprengstoffgemischen mit ANFO-Anteilen teilweise eine ungünstige subsonische Wellenbeeinflussung erzielt hat, die ihrerseits höhere Erschütterungen ausgelöst hat.

Tabelle 4.2.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Oßling im Vergleich mit der bisherigen Vorgehensweise

Parameter	Sprengungen vor 2011	Sprengungen der Forschungsphase/Datum														
		24.11.11	02.12.12	10.04.12	16.05.12	21.05.12	01.06.12		08.06.12		20.06.12	19.07.12	10.08.12	30.08.12	28.09.12	30.10.12
		1	2	3	4	5	6b	6a	7a	7b	8	9	10	11	12	13
Geometrische Parameter																
Wandhöhe (m)	9 - 12/16 - 20															
söhlige Vorgabe (m)	4 ... 4,5 ... 5,0	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	2,5-4,3	4,3	4,3	2,5-4,3	2 - 4,3	4,3	4,3	3 - 4,3	4,3	4,3
söhliger Reihenabstand (m)	3,5 ... 4 ... 5,0	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Bohrlochabstand (m)	2,0 ... 4,0	1,5 - 4,3	4,3	2 - 4,3	2 - 4,3	4,3	4,3	4,3	2-4,3	4,3	4,3	4,3	2 - 4,3	2 - 4,3	2 - 4,3	2 - 4,3
Bohrlochneigung (°)	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Länge des Bohrloches (m)	9,5 - 12/16 - 22	10-10,1	9,5-10	9-10,5	3-10,5	9,5-11	3-12,3	3-10	3-11	3-9,5	9-11	3-10,5	3-10,5	9,5-10	3-10,5	3-10,5
Bohrlochdurchmesser (mm)	≥ 95 (89 - 110)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Besatzlänge (m)	3 - 4	3,5...4	3,5...4	3,5...4	3,5...4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Anzahl der Reihen	1 - 2	3 - 4	3	4	6	4	3	7	3	4	3	4 - 8	6	3 - 4	6	4 - 8
Anzahl der Bohrlöcher	15 - 30 (selten 40)	107	150	75	74	94	51	84	99	32	74	127	146	132	149	154
Haufwerksvolumen (m³)	> 2500 - 7000	19191	26348	11770	12176	18249	5346	13036	16680	3262	13682	20903	23538	22132	26365	26006
Sprengtechnische Parameter																
Füllungsgrad	0,65 ... 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
eingesetzte Sprengstoffe	Su- pergel 30/80	40- 60% Booster	TNT Booster	TNT Booster	TNT Booster	TNT Booster	TNT Booster	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito
	Deka- mon	30- 60% Em 22 P	Riomex SM 7000	Riomex SM 7000	Riomex SM 7000	Riomex SM 7000	Riomex SM 7000	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito
	Emul- git 42G	0-25% Em 42 G	Riohit St/65	Riohit St/65	Riohit St/65	Riohit St/65	Riohit St/65	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito	dito

Fortsetzung Tabelle 4.2.2

Parameter	Sprengungen vor 2011	Sprengungen der Forschungsphase/Datum															
		24.11.11	02.12.12	10.04.12	16.05.12	21.05.12	01.06.12		08.06.12		20.06.12	19.07.12	10.08.12	30.08.12	28.09.12	30.10.12	
		1	2	3	4	5	6b	6a	7a	7b	8	9	10	11	12	13	
Sprengtechnische Parameter																	
Detonationsgeschwindigkeit	Sprengstoffmischung	4510,1	4802,5	-	-	-	4503,8	4197,6	4994	-	-	-	4627,9	-	-	4596,8	
Gesamtladmenge (kg)	800 - 2500	7049,46	9831,75	4063,415	3893,435	5702,03	1241,165	4197,65	5485,785	999,92	4437,13	6593,155	7611,8	6929,36	7917,015	8299,505	
max. Lademenge Bohrloch (kg)	50 - 78	69,34	66,245 (71,245)	63,75	61,5	61,245	66,245	61,245	58,745	53,745	61,245	56,245	61,24	56,245	61,245	61,245	
spez. Sprengstoffverbrauch (kg/m³)	0,3 - 0,400	0,367	0,373	0,345	0,319	0,312	0,232	0,322	0,329	0,307	0,324	0,315	0,323	0,313	0,300	0,319	
Zündtechnische Parameter																	
Zündung	Bohrlochmund, teilweise redundant (re), Einzelloch, nichtelektrisch (ne)	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	ne red	elektronisch	elektronisch	ne red	ne red
Lademenge/Zündzeitstufe (kg/Zst.)	50 - 78	277,36	198,735	255	369	244,98	198,735	428,715	176,2	215	183,7	449,96	367,44	224,98	367,47	489,96	
Zündzeitstufen zwischen den simultan gezündeten Ladungen (ms)	25, 42, 67 progressiv	25	25 (17)	25	25	17	25	17	17	25	17	17	17	17	17	17	
Dauer der Zündfolge (ms)	420 - 1260	900	1350	575	525	459	475	306	272	275	314	450	544	518	578	424	

Tabelle 4.2.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Obfling

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
24.11.2011 15:51	O1	1	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	42,3	26,988		47,582	47,582	25,0			45,0
24.11.2011 15:51	O1	2	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	85,7	15,021	19,674	10,135	19,674	35,0		38,0	50,0
24.11.2011 15:51	O1	5	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	473,8	2,520	3,540	0,740	3,540	27,0		27,0	38,5
24.11.2011 15:51	O1	6	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	221,7	9,750	11,530	5,510	11,530	50,0		50,0	38,5
24.11.2011 15:51	O1	7	Kirche	Fundament	361,2	3,700	6,400	0,480	6,400	33,4		38,5	32,8
02.12.2011 14:00	O2	1	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	22,4	82,095	98,983	94,315	98,983	13,0		33,0	20,0
02.12.2011 14:00	O2	2	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	82,0	34,070	37,938	24,819	37,938	31,0		31,0	55,0
02.12.2011 14:00	O2	3	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	201,5	7,861	5,012		7,861	38,0		29,0	38,0
02.12.2011 14:00	O2	4	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	231,8	4,324	8,746	6,759	8,746	26,0		27,0	27,0
02.12.2011 14:00	O2	5	Tagebau, 3. Sohle	Freifeld	246,6	14,420	15,960	10,190	15,960	38,5		41,7	62,5
02.12.2011 14:00	O2	6	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	329,6	10,850	3,770	2,280	10,850	26,3		38,5	41,7
02.12.2011 14:00	O2	7	Petermann	Fundament	683,8	0,680	0,530	1,770	1,770	8,1		12,7	12,5
10.04.2012 15:45	O3	7	Kutzner	Fundament		5,900	3,300	4,600	5,900	33,0		54,0	50,0
16.05.2012 14:30	O4	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	206,2	13,083	17,505		17,505	62,0		35,0	35,0
16.05.2012 14:30	O4	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	310,6	4,036	14,529	5,861	14,529	38,0		31,0	29,0
16.05.2012 14:30	O4	5	Forch	Fundament	202,2	5,270	4,880	4,330	5,270	71,4		27,8	29,4
16.05.2012 14:30	O4	7	Kutzner	Fundament	135,6	8,300	6,300	6,600	8,300	30,0		21,0	29,0
21.05.2012 14:30	O5	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	33,0	89,114	74,991	85,513	89,114	4,0		13,0	55,0
21.05.2012 14:30	O5	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	54,6	61,171	49,028	61,122	61,171	7,0		8,0	50,0
21.05.2012 14:30	O5	5	Haus NE von Haschke	Freifeld	253,2	2,864	6,605	3,053	6,605	33,0		22,0	41,0
21.05.2012 14:30	O5	6	Haschke	Fundament	262,2	3,552	4,724		4,724	50,0		45,0	45,0
21.05.2012 14:30	O5	7	Kutzner	Fundament	181,5	4,600	2,800	2,500	4,600	35,0		49,0	40,0
01.06.2012 14:36	O6a	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	27,2	43,329	30,034	64,231	64,231	19,0		1,0	31,0
01.06.2012 14:36	O6a	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	53,2	27,592	14,740	60,076	60,076	4,0		3,0	62,0
01.06.2012 14:36	O6a	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	178,0	10,192	15,975	8,8089	15,975	33,0		41,0	45,0
01.06.2012 14:36	O6a	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	282,4	6,135	8,591	3,636	8,591	33,0		35,0	41,0
01.06.2012 14:36	O6a	6	Haschke	Fundament	222,8	3,410	3,720	2,950	3,720	27,8		76,9	62,5
01.06.2012 14:36	O6a	5	Forch	Fundament	210,2	4,700	3,350	3,650	4,700	66,7		47,6	38,5
01.06.2012 14:36	O6a	7	Kutzner	Fundament	138,8	4,600	5,900	4,100	5,900	40,0		47,0	45,0
01.06.2012 14:38	O6b	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	272,3	4,261	3,299	2,401	4,261	35,0		38,0	31,0
01.06.2012 14:38	O6b	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	243,2	3,580	4,303		4,303	41,0		33,0	33,0
01.06.2012 14:38	O6b	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	112,3	10,037	10,732	5,721	10,732	41,0		50,0	62,0
01.06.2012 14:38	O6b	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	33,3	27,276	19,330	9,616	27,276	41,0		33,0	50,0
01.06.2012 14:38	O6b	6	Haschke	Fundament	497,2	0,920	0,600	0,610	0,920	18,9		20,4	24,4
01.06.2012 14:38	O6b	5	Forch	Fundament	433,5	0,860	0,980	0,680	0,980	21,7		22,7	33,3
01.06.2012 14:38	O6b	7	Kutzner	Fundament	402,3	0,600	0,700	0,600	0,700	26,0		27,0	23,0

Fortsetzung Tabelle 4.2.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Oßling

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
08.06.2012 14:34	O7a	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	24,2	119,200	87,471	77,610	119,200	7,0	10,0	50,0	7,0
08.06.2012 14:34	O7a	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	42,1	62,898		77,385	77,385	29,0		35,0	35,0
08.06.2012 14:34	O7a	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	152,8	22,714	30,119	25,886	30,119	38,0	38,0	55,0	38,0
08.06.2012 14:34	O7a	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	248,9			6,886	6,886			38,0	38,0
08.06.2012 14:34	O7a	5	Forch	Fundament	216,7	6,130	4,530	3,820	6,130	38,5	33,3	34,5	38,5
08.06.2012 14:34	O7a	6	Haschke	Fundament	240,3	2,360	3,180	2,290	3,180	90,9	26,3	55,6	26,3
08.06.2012 14:34	O7a	7	Kutzner	Fundament	148,8	3,700	5,500	3,300	5,500	40,0	40,0	58,0	40,0
08.06.2012 14:36	O7b	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	258,7		2,232		2,232			45,0 < Trigger	45,0
08.06.2012 14:36	O7b	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	158,9	4,275	3,622		4,275	41,0	83,0		41,0
08.06.2012 14:36	O7b	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	96,5			2,127	2,127			50,0	50,0
08.06.2012 14:36	O7b	5	Forch	Fundament	487,2	0,530	0,380	0,430	0,530	20,0	26,3	28,6	20,0
08.06.2012 14:36	O7b	7	Kutzner	Fundament	449,1	0,300	0,400	0,300	0,400	26,0	21,0	29,0	21,0
20.06.2012 14:35	O8	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	29,7	123,160	63,277	150,350	150,350	15,0	55,0	4,0	4,0
20.06.2012 14:35	O8	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	76,9	34,709	55,970	41,532	55,970	16,0	2,0	55,0	2,0
20.06.2012 14:35	O8	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	139,2	22,089	29,143	23,001	29,143	6,0	9,0	100,0	9,0
20.06.2012 14:35	O8	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	235,3	20,187	13,477	11,848	20,187	38,0	35,0	35,0	38,0
20.06.2012 14:35	O8	5	Forch	Fundament	222,3	4,980	3,630	3,500	4,980	111,1	55,6	38,5	111,1
20.06.2012 14:35	O8	6	Haschke	Fundament	246,6	1,820	2,410	2,350	2,410	125,0	43,5	32,3	43,5
20.06.2012 14:35	O8	7	Kutzner	Fundament	155,8	3,100	3,500	3,000	3,500	32,0	33,0	52,0	33,0
19.07.2012 14:30	O9	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	34,9	98,189	75,757		98,189	5,0	7,0		5,0
19.07.2012 14:30	O9	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	58,9	55,787	19,309	57,711	57,711	3,0	21,0	38,0	38,0
19.07.2012 14:30	O9	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	134,2	15,716	25,598	22,215	25,598	35,0	38,0	41,0	38,0
19.07.2012 14:30	O9	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	235,0	16,677	14,944	8,648	16,677	35,0	41,0	62,0	35,0
19.07.2012 14:30	O9	6	Haschke	Fundament	272,2	3,200	3,550	2,570	3,550	76,9	76,9	52,6	76,9
19.07.2012 14:30	O9	5	Forch	Fundament	235,1	4,590	4,150	4,350	4,590	43,5	90,9	55,6	43,5
19.07.2012 14:30	O9	7	Kutzner	Fundament	177,8	3,200	2,640	3,920	3,920	41,0	55,0	45,0	45,0
10.08.2012 14:37	O10	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	12,3	136,620	72,479	188,570	188,570	0,0	1,0	19,0	19,0
10.08.2012 14:37	O10	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	43,9	89,366	80,726	61,824	89,366	6,0	17,0	18,0	6,0
10.08.2012 14:37	O10	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	128,4	25,676	27,115	33,088	33,088	6,0	35,0	62,0	62,0
10.08.2012 14:37	O10	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	215,0	6,724	10,241	3,594	10,241	83,0	62,0	62,0	62,0
10.08.2012 14:37	O10	5	Forch	Fundament	226,2	3,860	3,330	2,390	3,860	55,6	58,8	111,1	55,6
10.08.2012 14:37	O10	6	Haschke	Fundament	269,7	3,000	1,890	2,500	3,000	62,5	55,6	58,8	62,5

Fortsetzung Tabelle 4.2.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Oßling

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r m	ppv _x mm/s	ppv _y mm/s	ppv _z mm/s	ppv _{max} mm/s	f _x Hz	f _y Hz	f _z Hz	f _{max} Hz
30.08.2012 14:10	O11	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	25,4	63,059	89,717		89,717	16,0		3,0	3,0
30.08.2012 14:10	O11	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	80,3	38,352	51,758	62,785	62,785	19,0	13,0	41,0	41,0
30.08.2012 14:10	O11	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	119,7	31,965	33,607	43,132	43,132	100,0	20,0	55,0	55,0
30.08.2012 14:10	O11	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	205,8	3,671	9,146	3,713	9,146	50,0	62,0	71,0	62,0
30.08.2012 14:10	O11	5	Forch	Fundament	228,6	3,520	4,050	2,720	4,050	58,8	58,8	58,0	58,8
30.08.2012 14:10	O11	6	Haschke Carport	Freifeld	285,9	3,290	3,080	3,790	3,790	55,6	47,6	55,6	55,6
28.09.2012 14:30	O12	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	49,2	60,111	91,542	73,159	91,542	1,0	17,0	38,0	17,0
28.09.2012 14:30	O12	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	71,1	22,124	24,700	21,352	24,700	41,0	11,0	41,0	11,0
28.09.2012 14:30	O12	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	106,0	32,912	40,739	62,792	62,792	27,0	1,0	55,0	55,0
28.09.2012 14:30	O12	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	194,9	6,226	6,429	5,124	6,429	38,0	62,0	50,0	62,0
28.09.2012 14:30	O12	5	Forch	Fundament	231,0	4,380	3,540	3,660	4,380	52,6	14,9	58,8	52,6
28.09.2012 14:30	O12	6	Haschke Carport	Freifeld	292,9	5,800	6,730	4,060	6,730	35,7	19,6	37,0	19,6
28.09.2012 14:30	O12	7	Kutzner	Fundament	200,7	3,860	4,130	2,380	4,130	33,0	10,0	37,0	10,0
30.10.2012 14:30	O13	1	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	35,5	68,457	72,724	86,334	86,334	4,0	4,0	33,0	33,0
30.10.2012 14:30	O13	2	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	59,7	49,344	38,071	56,307	56,307	23,0	7,0	38,0	38,0
30.10.2012 14:30	O13	3	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	93,2	26,602	39,875	45,189	45,189	21,0	20,0	71,0	71,0
30.10.2012 14:30	O13	4	Tagebau, 4. Sohle	Freifeld	183,0	6,935	10,037	7,826	10,037	31,0	25,0	29,0	25,0
30.10.2012 14:30	O13	5	Kutzner	Fundament	202,4	5,870	4,220	4,520	5,870	35,7	33,3	41,7	35,7
30.10.2012 14:30	O13	6	Haschke	Fundament	288,5	3,470	3,300	3,130	3,470	22,2	33,3	58,8	22,2

Um diese Zielstellungen für den Tagebau Oßling zu erreichen, wurden folgende Veränderungen bei den Sprengungen vorgesehen und variantenreich umgesetzt (Tabelle 4.2.2, Bilder 4.2.4.2 - 4.2.4.8):

- Einheitliche, gleichmäßige Ausladung mit einem Emulsionssprengstoff höherer Dichte
- Auslegung von Sprenganlagen mit mehr als 100 Bohrlöchern
- Veränderung des Verzögerungsintervalls bei simultaner Zündung nach der Impulstheorie
- Beeinflussung der Erschütterungen durch Einsatz der elektronischen Zündung.

Die bis 2010 angewandte Vorgehensweise der Einzellochzündung - jede Ladung erhält eine Zeitstufe - wurde generell in die Zündung nach der Impulstheorie mit simultan gezündeten Reihen stumpfwinklig zur freien Fläche umgewandelt (Bilder 4.2.4.2 - 4.2.4.8). Aus diesen beispielhaften Bildern können sowohl die Verzögerungs- als auch die Zündzeiten entnommen werden. Die Bilder 4.2.4.5 und 4.2.4.6 vermitteln die Zündpläne der elektronischen Zündung, die dankenswerterweise trotz hoher Kosten der Zünder vom Geschäftsführer der Lausitzer Grauwacke GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Scheffler genehmigt worden sind. Auf diese Weise konnte u. a. der eindeutige Nachweis geführt werden, dass tatsächlich ms-genau - gleich gezündete Ladungen keine höheren Erschütterungen erbringen als eine einzelne Lademenge eines Bohrloches.

Neben den o. g. Veränderungen wurden weitere grundsätzliche Prinzipien bei den Sprengungen umgesetzt, die später in den verallgemeinerungswürdigen Handlungen für die Dimensionierung von Sprenganlagen ihren Niederschlag gefunden haben.

4.2.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Die während der Forschungsarbeiten messtechnisch begleiteten Sprengungen sind im Bild 4.2.1 eingetragen. Zu diesen wurden sechs weitere aus einer im Zeitraum 2010/2011 liegenden Bearbeitungsphase in die Auswertung einbezogen (vergleiche Bilder 4.2.4.1 bis 4.2.4.4).

Alle Sprenganlagen liegen in einem vergleichbaren Homogenbereich des Meta-Grauwacken-Festgebirges, der allerdings durch die dominante Schichtklüftung eine ausgeprägte WSW - ENE Anisotropie aufweist. Mit den beispielhaften 3-D-Laserscanner Erfassungen wird der gute Auswurf mit Grabenbildung durch die gewählte Zündfolge nach der Impulstheorie belegt (Bilder 4.2.5.1 bis 4.2.5.3). Besonders deutlich ist die hohe Auflockerung infolge der Wirkung der elektronisch gezündeten Anlage erkennbar (Bild 4.2.5.3).

In der Tabelle 4.2.3 sind die Ergebnisse der Schwinggeschwindigkeitsmessungen mit den dazugehörigen Frequenzen sowie den Entfernungen zusammengestellt. Die Bilder 4.2.6.1 bis 4.2.6.40 dokumentieren die wichtigsten Dehnungs-Stauchungskurven im Nahbereich um die Sprengungen mit dem FBG-Sensor. Die Streuungen der Erschütterungsmessungen ergeben sich unter anderem aus dem eingesetzten Emulsionssprengstoff Emulgit 22 P bzw. Riomex SM 7000. Dieser handhabungssichere Sprengstoff schwankt hinsichtlich der Sprengstoffdichte von 1,08 bis 1,15 g/cm³, so dass sich wechselnde Detonationsgeschwindigkeiten und damit breit streuende transsonische Wirkungen ergeben. Durch die vorhandene Anisotropie des Festgebirges in Richtung der Schichtung wird dieser Effekt noch verstärkt, obwohl das Trennflächengefüge \pm einheitlich erscheint. Die Auswertung der Schwinggeschwindigkeitsmessungen in Abhängigkeit zur Entfernung r Sprengort - Messpunkt ist im Bild 4.2.7 und die Regressionsgleichung der Schwinggeschwindigkeits- fiktive Energie-Abstandsbeziehung im Bild 4.2.8 dargestellt. Die vergleichsweise geringe Größe des Korrelationskoeffizienten wird auf die unterschiedlichen sonischen Wirkungen der Sprengungen und die Anisotropie des Festgebirges zurückgeführt.

4.3 Tagebau Großsteinberg/Sachsen

4.3.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge

Der Rhyolith von Großsteinberg liegt in der regionalgeologischen Einheit des Nordwestsächsischen Eruptivkomplexes, der aus mehreren sauren, intrusiven und effusiven Vulkanitergüssen mit mehr als 1000 m Mächtigkeit besteht.

Der pyroxenreiche Rhyolith (Quarzporphyr) von der Lagerstätte Großsteinberg gehört zum südwestlichen Teil der rotliegenden Vulkanite der Wurzten-Formation.

Die Pyroxengehalte sind unterschiedlich, so dass im Gestein rötlich-violette mit dunkelgrau-graubraunen Farbgebungen wechseln. Meist überwiegen die Anteile der Feldspateinsprenglinge gegenüber denen von Quarz, die in einer sehr feinkörnigen Grundmasse schwimmen. Häufig ist ein etwa 10° nach W bis NW einfallendes Fließgefüge vorhanden, welches allerdings starke Veränderungen aufweist und wulstige bis kugelige Verwirbelungen annehmen kann. Im Tagebau sind verschiedene Verwitterungserscheinungen zu beobachten. An zehn Gesteinsproben des mehr oder weniger recht gleichförmigen Festgesteines wurden die in Tabelle 4.3.1 aufgeführten gesteinsphysikalisch-dynamischen Kennwerte ermittelt.

Tabelle 4.3.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des pyroxenhaltigen Rhyolithes im Bereich des Tagebaues Großsteinberg

Gesteinsphysikalisch-dynamischer Kennwert	Dimension	Rhyolith, nicht verwittert	
		Streuung	Mittelwert
Rohdichte	g/cm ³	2,61 - 2,63	2,618
Poisson-Zahl	-	0,235 - 0,298	0,254
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	5441 - 5906	5749
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	3136 - 3632	3347,5
R-Wellengeschwindigkeit	m/s	2892 - 3240	3070,9
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	65,380 - 75,795	72,59
G-Modul	kN/mm ²	25,828 - 34,459	29,40
akustische Impedanz (P)	10 ⁶ kg/(m ² s)	14,22 - 15,43	15,06
Festigkeit (F) [Bild 4.1.1]	-	sehr schallhart sehr fest	sehr schallhart sehr fest

Das Bild 4.3.1 vermittelt die Tagebausituation von Großsteinberg, in welche das Hauptkluftsystem schematisiert eingetragen ist. Es fehlt die aufbereitungstechnische Besonderheit, dass keine LKW-Förderung vorhanden ist und dafür eine größere Bandanlage mit dem mobilen Vorbrecher des Lokotrak-Systems im unmittelbaren Sprengbereich installiert ist. Der Vorbrecher wird vor jeder Sprengung mit der Bandanlage aus dem direkten Abschlagsbereich 80 bis 100 m von der Sprenganlage entfernt weggefahren.

Das messtechnisch erfasste Trennflächengefüge ist in den Bildern 4.3.2.1 und 4.3.2.2. mit dem SCHMIDT'schen Netz dargestellt. Der Vulkanit zeigt infolge des effusiven Ausbruchmechanismus häufig plattige Absonderung mit kugelig bis säuligen Ausbildungen, so dass das folgende, breit streuende Trennflächeninventar festzustellen ist.

○ *K₁ - ac - Trennflächenschar*

NNW ... NW - SSE ... SE streichend und meist nach ENE ... NE einfallend; teilweise durchsetzend, große bogige Flächen, meist absetzend an der plattigen Klüftung; in kugelförmiger Ausbildung plattig bis rund und durchsetzend; breit streuend ($K_1 \dots K_1'$); meist hoher Durchtrennungsgrad der Trennflächen; nicht selten gleitflächenbildend.

○ *K₂ - bc - Trennflächenschar*

Von E - W ... NE - SW ... NNE - SSW sehr breit streuende Trennflächenschar infolge unterschiedlicher Fließrichtungen, meist plattig bis dickplattig, bereichsweise großflächig absondernd und wandbildend; steil

bis mittelsteil nach Süden, Südosten bis Ostsüdosten einfallend, an K₁-Flächen absetzend; häufiger als K₁-Schar; bei K₂-parallelem Abbau ist mit Nachbrüchen und Gleitgefährdung zu rechnen

(Beispiele: Sprengung 5 und 8 - Bild 4.3.1).

○ K₃ - ab - Trennflächenschar

Um NNE - SSW ... NE - SW streichend und je nach Lage in der Rhyolithdecke steil bzw. meist mittelsteil bis flach nach WNW ... NW und W einfallend; entsteht senkrecht zur steilen Absonderungsklüftung bzw. stellt die Bruchbildung parallel zur Fließrichtung des rhyolithischen Magmas dar, sehr unregelmäßig, an K₁ - K₂ - Flächen absetzend, selten großkluftbildend; in kugelförmigen Bereichen plattig ausgebildet.

Im Bild 4.3.3 sind die Trennflächenabstandsverteilungen der einzelnen Trennflächenscharen als Summenlinien dargestellt. Die mittleren Trennflächenabstände betragen für die Hauptklufscharen

K ₁	-	0,124 m
K ₂	-	0,170 m
K ₃	-	0,282 m

und ergeben einen durchschnittlichen Klufkörper von

$$5,94456 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3.$$

Danach ist die Sprengbarkeit als

schwer sprengbar

einzustufen. In stark plattigen Bereichen tendiert die Gebirgssituation zur mittelschweren Sprengbarkeit.

4.3.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die wichtigsten Parameter der messtechnisch begleiteten Sprengungen sind in Tabelle 4.3.2 eingetragen. Die Eingangsgrößen der ersten vier Sprengungen entsprechen den bisher durchgeführten Sprengungen. Ausnahmsweise erfolgte die Einzellochzündung der Ladungen im südlichen Tagebau wegen der Nähe des schützenswerten Leipziger Naturfreundehauses elektronisch. Leider konnten keine weiteren Versuche mit elektronischen Zündern aus Kostengründen im Tagebau Großsteinberg vorgenommen werden. Die nachfolgenden sieben Sprengungen wurden nichtelektrisch mit zwei verschiedenen Varianten 25 ms und 17 ms Verzögerungszeit nach der Impulstheorie gezündet.

Im Tagebau Großsteinberg hatten die Sprengversuche nachstehende Zielstellung:

- Einhaltung der zulässigen Sprengerschütterungsimmissionen im Umfeld des Tagebaues für die Wohnbebauung in der Ortslage Großsteinberg und im Gebäudekomplex der Leipziger Naturfreunde
- Absolut keine Gefährdung der mobilen Lokotrak-Anlage durch Steinflug oder zu weiten Auswurf
- Optimale Zertrümmerung des Haufwerkes zwecks Gewährleistung einer kontinuierlichen Bestückung des mobilen Vorbrechers.

Tabelle 4.3.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Großsteinberg

Parameter	Datum	14.10.11	28.10.11		09.11.11	06.07.12	23.07.12	07.08.12	17.08.12	24.08.12	20.09.12	04.10.12
		G1	G2a	G2b	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
<i>Geometrische Parameter</i>												
Wandhöhe (m)	20,9-21,9	19-20,6	19-20,6	20	18	18,3	18,5	17,2-18,8	18,3	19,0	19,0	
söhlige Vorgabe (m)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0	4...5	4,0	4,0	4,0	4,0	
söhliger Reihenabstand (m)	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	2...3,75	3,75	3,75	
Bohrlochabstand (m)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	
Bohrlochneigung (°)	65-80	80	80	80	80	75-80	80	75	70-80	80	80	
Länge des Bohrloches (m)	13,7-22,5	20,4-22,9	20,4-22,9	21...23,7	19,6-20,3	19,8-20,5	19,8-26,2	20,7...22,8	19,9-20,6	19,6...20	19,8...20,2	
Bohrlochdurchmesser (mm)	98-100	96...102	96...102	96...102	100...102	100	98...102	96...102	98...102	98...102	102	
Besatzlänge (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5...3	3,5	3...3,5	3,5...4	3,5	
Anzahl der Reihen	3-4	4	5	7	5	3	4-8	2-5	3	2-4	7	
Anzahl der Bohrlöcher	67	43	43	56	86	82	122 Sohle 23	45	95	60	109 (11 Heber)	
Haufwerksvolumen (m³)	20958	13492	13492	17701	24839,2	23466	35811	14574	24208	16632	31073,6	
<i>Sprengtechnische Parameter</i>												
Füllungsgrad	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
eingesetzte Sprengstoffe	Supergel Em 42G Em 85P TNT Booster	Supergel Em 42G Em 85P TNT Booster	Supergel Em 42G Em 85P TNT Booster	Supergel Em 42G Em 85P TNT Booster	Em 42G Em 22P Booster	Super Em 42G Em 85P Booster	Super Em 42G Em 85P/22 P Booster	Super Em 42G Em 22P Booster	Riodin HE Rionit St/65 Em 22P Booster	Riodin HE Em 42G Em 22P Booster	Riodin HE Em 42G Em 22P Booster	
Detonationsgeschwindigkeit	-	-	4614,7	-	-	4814,1	-	-	-	-	4802,8	
Sprengschnur (g) (m)	480 (20)	210 (40)	210 (20) 40 (40)	220 (20)	130	340	200	60	540 (20) 60 (40)	210	50 (20) 108 (40)	
Gesamtlademenge (kg)	11097,3	6856,55	6856,55	9138,4	14767,07	13043,89	20605,89	9172,225	13609,085	8988,9	19035,705	
maximale Lademenge Bohrloch (kg)	210	205	205	202	188,745	188,745	191,245	221,245	181,245	176,245	191,245	
spezifischer Sprengstoffverbrauch (kg/m³)	0,529	0,508	0,508	0,639	0,5945	0,55	0,575	0,629	0,562	0,540	0,6126	

Fortsetzung Tabelle 4.3.2												
Parameter	Datum	14.10.11	28.10.11		09.11.11	06.07.12	23.07.12	07.08.12	17.08.12	24.08.12	20.09.12	04.10.12
		G1	G2a	G2b	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
<i>Zündtechnische Parameter</i>												
Zündung		elektronisch red Einz	elek- tronisch red Einz	elek- tronisch red Einz	elek- tronisch red Einz	ne red Imp	ne red Imp	ne red Imp	ne red Imp	ne red Imp	ne red Imp	ne red Imp
Zündzeitstufen (ms)		20	20	20	20	25	25	25	25	25	17	17
Lademenge pro Zündzeitstufe		210	205	205	202	1030,26	543,735	1268,715	1081,225	543,735	528,735	1303,715
Dauer der Zündfolge		905	290	330	350	367	600	642	400	800	425	374

Als mögliche Veränderungen der Bohr-, Spreng- und Zündtechnik waren abgesprochen:

- Ausschließliche Verwendung von Emulsionssprengstoff ohne Aluminiumpulver mit der größtmöglichen Dichte
- Veränderung der Zündfolge von der Einzelzündung zur Zündung nach der Impulstheorie bei Einsatz einer 25 und 17 ms Verzögerung zwischen den simultanen Reihen
- Nutzung der Möglichkeit verschiedener Abschlagsrichtungen (Bild 4.3.1).

In den beigefügten Bildern der Bohr- und Zündpläne ist die Vorgehensweise dokumentiert (Bilder 4.3.4.1 bis 4.3.4.7). Die vergleichsweise hohe Homogenität des vulkanischen Festgebirges wurde genutzt, um die Einflüsse des Trennflächengefüges zu bewerten.

4.3.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Die messtechnisch begleiteten Sprengungen sind im Bild 4.3.1 zusammen mit den Messpunkten der Geophone (blau) und Dehnungssensoren (rot) im Tagebaubereich vermerkt. Des weiteren liegen außerhalb des Rissausschnittes die Messpunkte der Geophone im Kellergeschoss des Sozialgebäudes, auf dem Garagenfußboden der Familie Stelzer in Großsteinberg und im Kellergeschoss des Leipziger Naturfreundehauses in Grethen. Der untergrundseitige Vorteil aller Messpunkte ist, dass alle Stationen im tieferen Baugrund aus rhyolithischem Festgebirge bestehen.

Die beispielhaft ausgewählten 3-D-Laserscanneraufnahmen zeigen den Zustand der Sprenganlage vor und die Haufwerkslage nach der Sprengung (Bilder 4.3.5.1 bis 4.3.5.3). Die gute Grabenbildung des Haufwerkes muss nicht zwangsläufig einer hohen zertrümmernden Wirkung entsprechen. Der Abwurf ist mit weiteren gemessenen Parametern wie Ausbruchgeschwindigkeit und Stückigkeit zu bewerten. Die Tabelle 4.3.3 vermittelt die Messergebnisse der Schwinggeschwindigkeiten und Frequenzen. In den Bildern 4.3.6.1 bis 4.3.6.34 sind die erfassten Dehnungs-Stauchungszustände aus dem Nahbereich um die Sprenganlagen dargestellt. Es war oft schwierig, auf der Tagebausohle geeignete, intakte Festgesteinsflächen für das Aufkleben der Sensoren zu finden. Vereinzelt Ausfälle wurden durch ungünstige Bedingungen verursacht.

Tabelle 4.3.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Großsteinberg

Datum	Spreng.	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
14.10.2011 14:02	G1	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	27,3	112,150	86,468	159,330	159,330	1,0	4,0	18,0	18,0
14.10.2011 14:02	G1	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	111,9	24,040	19,471	19,822	24,040	31,0	38,0	23,0	31,0
14.10.2011 14:02	G1	5	Großsteinberg, Familie Stelzer, Garagenfußboden	Fundament	1279,1	0,340	0,550	0,350	0,550	33,3	76,9	83,3	76,9
14.10.2011 14:02	G1	6	Grethen, Leipziger Naturfreundehaus, Kellerfußboden	Fundament	498,6	2,200	2,310	3,730	3,730	20,0	38,5	45,5	45,5
28.10.2011 14:04	G2a	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	77,0	39,784	32,309	35,980	39,784	20,0	26,0	45,0	20,0
28.10.2011 14:04	G2a	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	213,8	14,543	10,325	9,258	14,543	55,0	45,0	29,0	55,0
28.10.2011 14:04	G2a	5	Großsteinberg, Familie Stelzer, Garagenfußboden	Fundament	1103,9	0,730	0,910	0,660	0,910	111,1	100,0	71,4	100,0
28.10.2011 14:04	G2a	6	Grethen, Leipziger Naturfreundehaus, Kellerfußboden	Fundament	588,9	1,610	1,880	2,120	2,120	66,7	55,6	25,6	25,6
28.10.2011 14:04	G2b	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	64,8			49,744	49,744			41,0	41,0
28.10.2011 14:04	G2b	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	106,7			31,733	31,733			29,0	29,0
28.10.2011 14:04	G2b	5	Großsteinberg, Familie Stelzer, Garagenfußboden	Fundament	1263,1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-
28.10.2011 14:04	G2b	6	Grethen, Leipziger Naturfreundehaus, Kellerfußboden	Fundament	496,2	1,400	1,800	1,770	1,800	35,7	41,7	58,8	41,7
09.11.2011 14:01	G3	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	33,5	145,120	94,911		145,120	12,0	4,0		12,0
09.11.2011 14:01	G3	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	138,0	27,634	22,770	19,085	27,634	31,0	31,0	55,0	31,0
09.11.2011 14:01	G3	3	Tagebau, beim Silo	Freifeld	271,8	9,518	7,314	5,756	9,518	33,0	21,0	27,0	33,0
09.11.2011 14:01	G3	4	Tagebau, beim Silo	Freifeld	333,4	5,131			5,131	45,0			45,0
09.11.2011 14:01	G3	5	Großsteinberg, Familie Stelzer, Garagenfußboden	Fundament	1289,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-
09.11.2011 14:01	G3	6	Grethen, Leipziger Naturfreundehaus, Kellerfußboden	Fundament	624,4	1,140	1,520	2,020	2,020	45,5	47,6	58,8	58,8
06.07.2012 14:00	G4	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	30,1	143,900	105,930		143,900	11,0	6,0		11,0
06.07.2012 14:00	G4	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	61,6	69,159		103,780	103,780	2,0			33,0
06.07.2012 14:00	G4	3	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	192,3	7,075	14,052	8,900	14,052	13,0	62,0	83,0	62,0
06.07.2012 14:00	G4	4	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	258,5	6,401	5,770	4,970	6,401	27,0	83,0	27,0	27,0
06.07.2012 14:00	G4	5	Sozialgebäude	Fundament	636,7	1,350	0,710	0,910	1,350	16,9	20,0	31,2	16,9
06.07.2012 14:00	G4	6	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	448,9	4,750	4,300	2,250	4,750	18,9	43,5	25,6	18,9
23.07.2012 14:00	G5	5	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	376,2	4,760	6,080	2,520	6,080	13,2	38,5	16,4	38,5
23.07.2012 14:00	G5	6	Sozialgebäude	Fundament	555,6	1,400	0,790	1,020	1,400	32,3	40,0	31,2	32,3
07.08.2012 14:00	G6	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	45,1	99,783	67,439	118,010	118,010	15,0	7,0	6,0	6,0
07.08.2012 14:00	G6	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	69,9	114,210	63,866	82,551	114,210	1,0	1,0	41,0	1,0
07.08.2012 14:00	G6	3	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	178,9	10,543	10,774	10,479	10,774	71,0	83,0	41,0	83,0
07.08.2012 14:00	G6	4	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	246,6	6,865	7,925	4,282	7,925	83,0	55,0	62,0	55,0
07.08.2012 14:00	G6	5	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	467,7	4,090	3,540	2,660	4,090	37,0	34,5	13,9	37,0
07.08.2012 14:00	G6	6	Sozialgebäude	Fundament	653,3	0,880	1,340	1,060	1,340	45,5	41,7	43,5	41,7
17.08.2012 14:00	G7	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	35,4	105,390	81,646	183,230	183,230	5,0	0,0	8,0	8,0
17.08.2012 14:00	G7	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	63,2	65,102	60,588	60,925	65,102	21,0	12,0	38,0	21,0
17.08.2012 14:00	G7	5	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	476,7	3,000	2,080	2,900	3,000	31,2	14,5	15,6	31,2
17.08.2012 14:00	G7	6	Sozialgebäude	Fundament	696,8	0,700	0,700	0,620	0,700	52,6	23,8	18,5	52,6

Fortsetzung Tabelle 4.3.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Großsteinberg

Datum	Spreng.	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
24.08.2012 14:00	G8	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	34,1	171,320	104,260	163,010	171,320	20,0	500,0	17,0	20,0
24.08.2012 14:00	G8	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	56,9	59,444	55,942	68,127	68,127	10,0	21,0	41,0	41,0
24.08.2012 14:00	G8	3	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	164,6	9,377	16,277	12,164	16,277	38,0	55,0	55,0	55,0
24.08.2012 14:00	G8	4	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	228,1	5,166	7,875	7,953	7,953	71,0	55,0	100,0	100,0
24.08.2012 14:00	G8	5	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	375,2	3,110	3,550	1,700	3,550	22,7	37,0	52,6	37,0
24.08.2012 14:00	G8	6	Sozialgebäude	Fundament	552,0	1,180	0,730	0,790	1,180	12,2	16,4	33,3	12,2
20.09.2012 14:00	G9	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	39,8	116,700	83,681	124,960	124,960	12,0	18,0	31,0	31,0
20.09.2012 14:00	G9	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	63,8	37,741	49,274	56,756	56,756	13,0	23,0	41,0	41,0
20.09.2012 14:00	G9	3	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	171,8	11,371	14,663	10,641	14,663	71,0	27,0	33,0	27,0
20.09.2012 14:00	G9	4	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	240,6	5,812	6,072	7,202	7,202	83,0	100,0	55,0	55,0
20.09.2012 14:00	G9	5	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	483,9	3,470	3,270	2,370	3,470	12,0	17,9	34,5	12,0
20.09.2012 14:00	G9	6	Sozialgebäude	Fundament	668,3	0,830	0,920	0,590	0,920	15,9	52,6	62,5	52,6
04.10.2012 14:00	G10	1	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	32,6	74,367	97,874	100,480	100,480	21,0	17,0	7,0	7,0
04.10.2012 14:00	G10	2	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	86,6	41,104	44,178	52,074	52,074	21,0	12,0	38,0	38,0
04.10.2012 14:00	G10	3	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	329,1	6,345	4,780	3,713	6,345	55,0	71,0	31,0	55,0
04.10.2012 14:00	G10	4	Tagebau, 3. Sohle 130m	Freifeld	402,3	2,962	4,647	3,271	4,647	166,0	125,0	21,0	125,0
04.10.2012 14:00	G10	5	Gebäude bei Tankstelle	Fundament	482,5	3,130	3,430	3,260	3,430	40,0	14,7	12,2	14,7
04.10.2012 14:00	G10	6	Sozialgebäude	Fundament	678,0	0,940	0,850	0,750	0,940	7,1	20,4	13,2	7,1

Die Messergebnisse der Erschütterungen streuen erfreulicherweise infolge der \pm homogenen Festgebirgsverhältnisse vergleichsweise gering (Bild 4.3.7). Die Regressionsgleichung der Schwinggeschwindigkeit versus Entfernung zeigt einen hohen Korrelationskoeffizienten. Dadurch wird die Schwinggeschwindigkeits - fiktive Energie-Abstandsbeziehung besonders attraktiv und gestattet eine hohe Vorhersagegenauigkeit der erwarteten Schwinggeschwindigkeiten für jede Entfernung (Bild 4.3.8).

4.4 Tagebau Nieder-Beerbach/Hessen

4.4.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge

Die Gabbro-Lagerstätte von Nieder-Beerbach gehört zum nordwestlichen Teil des Kristallins vom Odenwald. Der Gabbro befindet sich in der NE - SW streichenden Struktur des Frankenstein-Massives.

Das Gestein mit seinem mittelkörnigen, ophitischen Korngefüge weist eine hellgraugüne bis dunkelgrüne - dunkelgraue Farbgebung auf. Es besteht aus folgenden Mineralien:

Albit	55 - 60 %	}	Hauptgemeng- teile	(Die Minerale Kärsulit, Clino- chlor und Clinozoisit sind ein Anzeichen einer schwachen Metamorphose)
Clinochlor	15 - 18 %			
Kärsulit	8 - 12 %			
(Hornblende)				
Clinozoisit	2 - 4 %	}	Nebengemeng- teile	
Magnetit	1,5 - 3 %			
Muskovit	0,1 - 0,5 %			
Celsit	< 0,5 %			
Glasphase	4 - 8 %			

Das Gestein müsste danach als Meta-Gabbro bezeichnet werden.

An 16 entnommenen Gesteinsproben wurden die in Tabelle 4.4.1 aufgeführten gesteinsphysikalisch-dynamischen Kennwerte im Labor des Geotechnischen Sachverständigenbüros Dr. Müller bestimmt. Die Streuung der Werte ist auf den wechselnden Mineralbestand und die Schwankung der Rohdichte zurückzuführen. Die dynamischen Kennwerte sind im Vergleich zu denen in den bisherigen Versuchsbetrieben die höchsten ermittelten Geschwindigkeiten, die ihrerseits eine ausgewogene, gleichmäßige Anpassung der Sprengstoffe erfordern.

Im Bild 4.4.1 ist über dem verfügbaren Tagebauriss von Nieder-Beerbach das erfasste, metamorph überprägte Trennflächengefüge stark schematisiert eingetragen.

Tabelle 4.4.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des Gabbros
im Bereich des Tagebaues Nieder-Beerbach

Gesteinsphysikalisch-dynamischer Kennwert	Dimension	Eigenschaft	
		Streuung	Mittelwert
Rohdichte	g/cm ³	2,83 - 3,0	2,9
Poisson-Zahl	-	0,159 - 0,278	0,2255
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	5867 - 6787	6385,75
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	3385 - 3959	3786,88
R-Wellengeschwindigkeit	m/s	3115 - 3601	3463,38
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	81,91 - 106,30	100,45
G-Modul	kN/mm ²	32,76 - 45,45	41,04
akustische Impedanz (P)	10 ⁶ kg/(m ² s)	16,77 - 19,27	18,24
Festigkeit (F) [Bild 4.1.1]	-	extrem schallhart extrem fest	extrem schallhart extrem fest

Das auf den tieferen Sohlen und im Nordbereich des Tagebaues vorhandene, sehr weitspannige und gestörte Trennflächengefüge wurde statistisch gesichert erfasst und ist in den Bildern 4.4.2.1 und 4.4.2.2 mit der Darstellung im SCHMIDT'schen Netz dokumentiert. Das Trennflächengefüge des basischen Plutonites mit metamorpher Überprägung weist schematisiert folgende Trennflächenscharen auf (Bild 4.4.1 und 4.4.2):

- *K₁ - ac - Trennflächenschar*
NNE - SSW streichend, teilweise großflächige Wände bildend, nicht selten mineralisiert, steil nach WNW bzw. ESE einfallend, teilweise bogige Flächen, hoher Durchtrennungsgrad der Großklüfte; im Kleinkluftbereich geringere Durchtrennung bis latent.
- *K₂ - bc - Trennflächenschar*
WNW ... NW - ESE ... SE streichende und meist steil bis mittelsteil nach NE einfallende Schar, an K₁ absetzend und mit mäßigen Durchtrennungsgrad, nicht hervortretend, große Trennflächenabstände, teilweise latent; im Kleinkluftbereich deutlich erkennbar.
- *K₃ - K₃' ab - Trennflächenschar*
Breit streuende, dominante WNW ... NW ... NNW - ESE ... SE ... SSE streichende Schar mit ausgeprägter Deutlichkeit, hoher bis vollkommener Durchtrennungsgrad, das Einfallen ist steil, meist mittelsteil bis flach von erheblicher Streubreite; der Nordosten des Tagebaues wird von diesen teilweise gleitgefährdeten Trennflächen beherrscht.

Der überwiegend geringe Trennflächenabstand wird mit Bild 4.4.3.1 belegt und kann als gering massiv gekennzeichnet werden (Bild 4.1.1).

Nur in kleineren Bereichen hat eine stärkere tektonische Überprägung zu geringeren Trennflächenabständen geführt (Bild 4.4.3.2). Derartige Bereiche sind als sehr gering klüftig einzuordnen.

Nach diesen Ergebnissen ist die Sprengbarkeit des Meta-Gabbro-Festgebirges überwiegend als

extrem schwer

und in Störungszonen als sehr schwer zu bewerten. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Zielstellung, dass die Bohr- und Sprengarbeit hauptsächlich auf die zertrümmernde Wirkung ausgerichtet werden muss.

Die mittleren Trennflächenabstände betragen für den überwiegenden Anteil im Tagebau Nieder-Beerbach

K ₁	-	0,631 m
K ₂	-	0,636 m
K ₃	-	0,376 m

und ergeben einen durchschnittlichen Klufkörper von

0,1508948 m³.

Die Größen für den Sonderfall der Störungszonen sind in Bild 4.4.3.2 enthalten. Dort verringert sich der mittlere Klufkörper auf $5,29356 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$.

4.4.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die bisher angewandten und während der Untersuchungsphase verwendeten Bohr-, Spreng- und Zündparameter sind in Tabelle 4.4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.4.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Nieder-Beerbach

Parameter	bisherige Parameter 2010	09.08.12	05.09.12	21.09.12	05.10.12	26.10.12
		N1	N2	N3	N4	N5
<i>Geometrische Parameter</i>						
Wandhöhe (m)	10 - 27	26,2-29,3	11,2-20	28-30	17,9-19,3	14-15,3
söhlige Vorgabe (m)	3-4,5	3-10	3	4,5	4,5	5
söhliger Reihenabstand (m)	2,8-4,0	5...4,5	3	4,5	4,5	5
Bohrlochabstand (m)	2,5-4	3,5	3	4	4	5
Bohrlochneigung (°)	70-75-90	70...73...75	75	75	75	75
Länge des Bohrloches (m)	10-25	28,3...31,7	11,5-20	29...31	19,5...21	14,5
Bohrlochdurchmesser (mm)	92-95-102	102	102	102	102	102
Besatzlänge (m)	3,5...4	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Anzahl der Reihen	1-7	3	8 (4)	5	5	7
Anzahl der Bohrlöcher	7-57	27 (16 Sohle)	143	33	28	98
Haufwerksvolumen (m³)	2464-11280	15500	29000	18419	10080	36250
<i>Sprengtechnische Parameter</i>						
Füllungsgrad	0,7-1	1	1	1	1	1
eingesetzte Sprengstoffe	Booster Blendex 80 Eurodyn 65/72 Centra Gold	Centra Gold Euro 65 Euro 72	Centra Gold Euro 65 Euro 72	Centra Gold Euro 65 Euro 72	Centra Gold Euro 65 Euro 72	Centra Gold Euro 65 Euro 72 Ø 80
Detonationsgeschwindigkeit	-	5337,4	5071,2	5128,9	5389,3	-
Sprengschnur (g) (m)	-	200	-	-	-	-
Gesamtladmenge (kg)	824-5916,2	7314	19488	9260	4753	13986
max. Ladmenge Bohrloch (kg)	20-200	266,19	194,5	272,5	185,5	150
spez. Sprengstoffverbrauch (kg/m³)	0,355-0,775	0,472	0,672	0,502	0,471	0,385
<i>Zündtechnische Parameter</i>						
Zündung	ne Einz red	elektronisch Impuls red	ne red Impuls	ne red Impuls	ne red Impuls	ne red Impuls
Zündzeitstufen (ms)	25...65	25	25	25	17	25
Ladmenge pro Zündzeitstufe kg/Zst.	20-200	798,57	778	1362,5	742	1050
Dauer der Zündfolge (ms)	nicht bekannt	Hauptspr. 300	617	300	207	525 (2x)

Im Vergleich zu den bisherigen Sprengungen wurden die Sprenganlagen auf das 2- bis 3-fache vergrößert, um einerseits die Auswirkungen auf die Erschütterungen und die Verbesserung der Haufwerksstückigkeit untersuchen zu können sowie andererseits die Umwelteinwirkungen zu reduzieren.

Mit den Sprengversuchen sollten folgende Zielstellungen erreicht werden:

- Deutliche Verbesserung der Haufwerksstückigkeit, um die Ladefähigkeit auf die SLKW und Durchsatzleistungen am Vorbrecher zu erhöhen.
- Vergrößerung der Sprenganlagen zwecks Einschränkung der Umweltbelastungen für die Anwohner.

- Keine Überschreitung der zulässigen Anhaltswerte der Schwinggeschwindigkeit in den Gebäuden der umliegenden Bebauung von Nieder-Beerbach und Waschenbach.
- Nachweis der Unwirksamkeit der Lademenge pro Zündzeitstufe für die Erschütterungsprognose und -bewertung mit verschiedenen Zündverfahren.

Die nachstehenden Parameter der Gewinnungssprengungen wurden verändert:

- Die Größe der Sprenganlage und damit die Gesamtlademenge wurden erhöht.
- Die nichtelektrische und elektronische Zündung wurde so ausgelegt, dass mehrere Ladungen gleichzeitig nach der Impulstheorie gezündet worden sind.
- Die Zündverzögerung wurde mit 17 und 25 ms angesetzt.

Die bis zum Beginn der Versuchssprengungen praktizierte Vorgehensweise der Einzellochzündung wurde durch die simultane Zündung mehrerer Bohrlochladungen in einer Reihe stumpfwinklig zum Ausbruch ersetzt (Bilder 4.4.4.1 bis 4.4.4.5).

Die Bedingungen im Tagebau Nieder-Beerbach auf der oberen nördlichen Sohle waren außerordentlich ungünstig. Die Abraumverhältnisse gestalteten sich durch mehr als 10 m Mächtigkeitsunterschiede äußerst unregelmäßig, so dass nur eine beschränkte Auslegung der Sprenganlagen möglich wurde. Auf diese Weise entstanden Einschränkungen der messtechnischen Überwachung. Die Erschütterungsmessungen waren ohne größere Probleme durchführbar. Die Sprengung auf der Tiefsohle diente zur Herstellung der späteren Zufahrt und war gleichzeitig eine Gewinnungssprengung mit besonderer Zielstellung (Bilder 4.4.1 und 4.4.4.2).

4.4.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Die im Tagebau Nieder-Beerbach betreuten Sprengungen sind aus dem Bild 4.4.1 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass die Sprenganlagen recht unterschiedlich in ihren geometrischen Ausmaßen sind und zudem durch Sohlenhelfer unterstützt werden mussten. Eine Bewertung des Sprengergebnisses wird durch diese Randbedingungen erschwert. Die fünfte Sprenganlage befindet sich zudem in einer gestörten Zone mit geringeren Kluffabständen als die übrigen Sprengungen (Bild 4.4.3.2).

Die Haufwerkslage mit Grabenbildung und hoher Auflockerung der N2 und N4-Sprengungen wird durch die 3-D-Erfassung dokumentiert (Bild 4.4.5.1 und 4.4.5.2). Die simultan gezündeten Bohrlochladungen erreichen Mengen im bisherigen Sinne von 742 bis 1362,5 kg je Zeitstufe, ohne dass die Erschütterungen in irgendeiner Art und Weise angestiegen sind (Tabelle 4.4.2 und 4.4.3).

Der absolute Nachweis der Bedeutungslosigkeit der Lademenge pro Zündzeitstufe wurde mit der elektronisch gezündeten Sprengung N1 - die von uns vorgeschlagene Zündfolge wurde elektronisch umgesetzt (Bild 4.4.4.1) - vollzogen, bei der eine exakt gemeinsam gezündete Sprengstoffmasse von 798,57 kg initiiert worden ist.

Die Ergebnisse der Erschütterungsmessungen sind in Tabelle 4.4.3 und den Bildern 4.4.6.1 bis 4.4.6.18 dokumentiert. Die Dehnungs-Stauchungskurven sind im Nahbereich der Sprenganlagen vorgenommen worden (Bild 4.4.1).

Die Auswertung der Schwinggeschwindigkeitsmessungen erfolgte im ppv - r - Diagramm (Bild 4.4.7). Die ermittelte Regressionsgerade der Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung für den Tagebau Nieder-Beerbach ist im Bild 4.4.8 aufgezeigt.

Die verschiedenartigen Sprengungen und Sprengabschlagsrichtungen bedingen einen ausreichenden Korrelationskoeffizienten von rund 80 %. Zu keinem Zeitpunkt wurden die zulässigen Anhaltswerte für schützende Objekte in der Umgebung des Tagebaues überschritten.

Tabelle 4.4.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Nieder-Beerbach

Datum	Spreng.	MP Messort	Bewertung	r m	ppv _x mm/s	ppv _y mm/s	ppv _z mm/s	ppv _{max} mm/s	f _x Hz	f _y Hz	f _z Hz	f _{max} Hz
09.08.2012 12:03	N1	3 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	130,2	25,156	21,099	12,080	25,156	35,0	29,0	29,0	33,0
09.08.2012 12:03	N1	4 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	238,9	9,742	11,785	17,590	17,590	7,0	22,0	22,0	33,0
09.08.2012 12:03	N1	5 Waldweg	Freifeld	312,2	12,010	8,070	4,190	12,010	38,5	45,5	45,5	38,5
09.08.2012 12:03	N1	6 Mühle	Fundament	580,8	2,240	1,230	1,490	2,240	20,0	37,0	37,0	20,0
09.08.2012 12:03	N1	7 Station Waschenbach	Fundament	839,4	0,600	0,583	0,453	0,600	4,7	5,9	5,9	4,7
05.09.2012 13:03	N2	1 Tagebau, 7. Sohle	Freifeld	30,2	173,500	107,390	175,330	175,330	1,0	10,0	10,0	17,0
05.09.2012 13:03	N2	2 Tagebau, 7. Sohle	Freifeld	80,3	45,905	28,680	71,159	71,159	10,0	5,0	5,0	38,0
05.09.2012 13:03	N2	3 Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	233,0	36,436	28,645	23,731	36,436	31,0	31,0	31,0	50,0
05.09.2012 13:03	N2	4 Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	266,8	16,740	14,733	16,031	16,740	35,0	35,0	35,0	41,0
05.09.2012 13:03	N2	5 Bürogebäude	Fundament	383,2	5,540	8,340	8,810	8,810	26,3	50,0	50,0	34,5
05.09.2012 13:03	N2	6 Mühle	Fundament	728,4	2,200	2,230	2,520	2,520	76,9	52,6	52,6	100,0
21.09.2012 12:30	N3	1 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	49,0	59,641	49,407	87,864	87,864	500,0	15,0	15,0	33,0
21.09.2012 12:30	N3	2 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	50,6	69,966	72,310	115,130	115,130	4,0	1,0	1,0	21,0
21.09.2012 12:30	N3	3 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	175,7	17,723	19,211	22,285	22,285	8,0	17,0	17,0	22,0
21.09.2012 12:30	N3	4 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	242,9	13,413	14,143	11,694	14,143	38,0	18,0	18,0	18,0
21.09.2012 12:30	N3	5 Mühle	Fundament	579,9	1,650	1,210	2,310	2,310	25,6	13,2	13,2	31,2
21.09.2012 12:30	N3	6 Waldweg	Freifeld	314,9	11,540	16,520	5,550	16,520	22,7	19,2	19,2	52,6
21.09.2012 12:30	N3	7 Mühle	Fundament	594,9	1,280	0,630	1,220	1,280	1,0	1,0	1,0	1,0
05.10.2012 11:30	N4	1 Tagebau, Rampe zw. 7. und 5. Sohle	Freifeld	44,3	28,841	24,153	10,353	28,841	22,0	17,0	17,0	23,0
05.10.2012 11:30	N4	2 Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	93,9	22,503	24,518	15,196	24,518	33,0	35,0	35,0	41,0
05.10.2012 11:30	N4	3 Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	180,0	22,005	14,789	15,491	22,005	50,0	38,0	38,0	50,0
05.10.2012 11:30	N4	4 Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	297,0	14,326	23,710	5,187	23,710	45,0	31,0	31,0	62,0
05.10.2012 11:30	N4	5 Bürogebäude	Fundament	571,7	1,250	1,070	1,360	1,360	14,7	30,3	30,3	40,0
05.10.2012 11:30	N4	6 Mühle	Fundament	596,8	1,780	1,870	1,520	1,870	40,0	13,2	13,2	83,3

Fortsetzung Tabelle 4.4.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Nieder-Beerbach

Datum	Spreng.	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
26.10.2012	12:00	N5a	1	Tagebaurand/Abraum	Freifeld	39,019	36,724	37,938	39,019	29,0	29,0	12,0	15,0
26.10.2012	12:00	N5a	2	Tagebaurand/Abraum	Freifeld	112,5	19,499	20,376	20,376	29,0	29,0	26,0	26,0
26.10.2012	12:00	N5a	3	Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	123,7	16,031	14,010	18,776	13,0	13,0	11,0	10,0
26.10.2012	12:00	N5a	4	Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	187,4	15,280	12,031	6,865	15,280	35,0	29,0	29,0
26.10.2012	12:00	N5a	5	Waldweg	Fundament	245,5	17,560	11,520	4,770	17,560	35,7	34,5	34,5
26.10.2012	12:00	N5a	6	Mühle	Fundament	509,0	1,310	0,840	0,940	1,310	7,6	8,1	19,6
26.10.2012	12:00	N5a	7	Mühle	Fundament	524,0	1,150	1,060	0,830	1,150	6,0	10,0	15,0
26.10.2012	12:30	N5b	1	Tagebaurand/Abraum	Freifeld	27,9	85,106	79,498	86,699	10,0	10,0	6,0	19,0
26.10.2012	12:30	N5b	2	Tagebaurand/Abraum	Freifeld	91,4	45,125	22,587	45,125	21,0	21,0	27,0	21,0
26.10.2012	12:30	N5b	3	Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	96,5	19,731	31,136	25,444	31,136	11,0	20,0	23,0
26.10.2012	12:30	N5b	4	Tagebau, 5. Sohle	Freifeld	159,2	13,736	17,849	11,020	17,849	35,0	26,0	16,0
26.10.2012	12:30	N5b	5	Waldweg	Fundament	226,3	14,330	17,070	6,840	17,070	35,7	21,7	19,6
26.10.2012	12:30	N5b	6	Mühle	Fundament	491,1	1,090	0,840	1,070	1,090	11,8	21,3	17,9
26.10.2012	12:30	N5b	7	Mühle	Fundament	506,1	1,680	1,030	1,050	1,680	5,0	11,0	22,0

4.5 Tagebau Burgbernheim/Bayern

4.5.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge

Die Karbonatgesteinlagerstätte gehört zum Fränkischen Becken, welches als Ausläufer der Saxothuringischen Muldenzone anzusehen ist. Stratigraphisch ist die Kalkstein-, Kalkmergelstein-, Mergelstein- bzw. Tonmergelstein-Wechselfolge mit einer Gesamtmächtigkeit von 66 ... 69 m dem Oberen Muschelkalk zuzuordnen.

In der aufgeführten Reihenfolge der Gesteinsbezeichnungen nimmt der Karbonatanteil ab. Die Karbonatgesteine sind grau, hellgrau, ockergelbfleckig bis ockergelb und weiß suturiert. Das Korngefüge ist dicht, bereichsweise stark porös, unregelmäßig löchrig, mit schillartigen Fossilresten, häufig fossilführend, arenitisch bis latitisch, wellig bis fleckig und unregelmäßig im Korngefüge, stark karbonatische Bänke sind feinkristallin. Vereinzelt treten unregelmäßige Einlagerungen von Tonstein bis 1 cm Mächtigkeit auf, die meist dunkelgrau hervortreten.

Im Schichtkomplex treten die karbonatreicheren Schichten als durchgehende, hellgraue bis gelbgraue Bank- bzw. Plattenkalksteine hervor. Zwischen diesen Bankkalksteinen lagern feinschichtige bis wellenartig-wulstig suturierte Kalkmergel- bis Mergelsteine.

Der Wechsel von dichteren, festeren Bank- und Plattenkalksteinen mit feinschichtig, flasrigen Kalkmergel- bis Mergelsteinen geben dem Festgebirge eine bestimmte Stabilität.

An entnommenen 13 Gesteinsproben vom gesamten Profil des Oberen Muschelkalkes wurden die in Tabelle 4.5.1 aufgeführten gesteinsphysikalisch-dynamischen Kennwerte ermittelt. Die Zuordnung der karbonatischen Gesteine erfolgt über die Rohdichte. Die feinkristallinen Kalksteine auf der 3. Sohle wurden untersucht und fehlen in der Zusammenstellung der Tabelle 4.5.1, weil in diesem Tagebauabschnitt keine Versuchssprengung stattfand.

Mit zunehmendem Karbonatanteil verbessern sich die dynamischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Erhöhung der Rohdichte.

Im Bild 4.5.1 ist der Ausschnitt des verfügbaren, leider wenig aktuellen Tagebaurisses Habermühle/Burgbernheim mit den eingetragenen vereinfachten Haupttrennflächenscharen dargestellt. Das vereinzelt auftretende diagonale Scherkluffpaar streicht NW - SE und fällt mit 40 - 60 ° sowohl nach SW als auch nach NE ein. Die Trennflächen der Schichtung lagern ± horizontal mit nach NE und SW sehr flach geneigten Flächen (Bild 4.5.2).

Tabelle 4.5.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der Karbonatgesteine
im Bereich des Tagebaues Habermühle/Burgbernheim (1. und 2. Sohle)

Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte	Dimension	Karbonatgestein		
		⇒ zunehmender Karbonatanteil		
		Mergelstein	Kalkmergelstein	Kalkstein
Rohdichte	g/cm ³	2,40-2,58 Ø 2,51	2,46-2,65 Ø 2,58	2,62-2,66 Ø 2,64
Poisson-Zahl	-	0,24-0,34 Ø 0,31	0,126-0,339 Ø 0,244	0,19-0,345 Ø 0,244
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	3800-4150	4183-4531 Ø 4387	4188-5206 Ø 4647
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	2050-2500	2234-2772 Ø 2514	2566-3081 Ø 2714
R-Wellengeschwindigkeit	m/s	1950-2250	2085-2490 Ø 2301	2339-2746 Ø 2478
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	32	32,929-44,275 Ø 40,06	41,339-54,872 Ø 47,22
G-Modul	kN/mm ²	12	12,294-19,651 Ø 16,22	17,014-25,11 Ø 18,81
akustische Impedanz	10 ⁶ kg/(m ² s)	8,2-9,6	10,84-11,76 Ø 11,39	10,98-13,50 Ø 12,25
Festigkeit (F) [Bild 4.4.1]	-	mittel schallhart mittel fest	schallhart fest	sehr schallhart sehr fest

Das eigentliche Trennflächengefüge des schwach gestörten Karbonatgesteinsgebirges ist in den Bildern 4.5.2.1 und 4.5.2.2 dargestellt und kann verallgemeinert wie folgt beschrieben werden:

○ *K₁ - ac - Trennflächenschar*

Um E - W streichend, breit um WNW - ESE streuend, steil nach Süden (vorwiegend) und Norden einfallend; meist als Kleinklüftung mit < 1 m Erstreckung ausgebildet, an Schichtflächen absetzend; Großklüfte mit > 1 m Erstreckung bis 7 m, vergleichsweise seltener, Trennflächen mit mehr als 10 m Erstreckung sehr selten auftretend, Trennflächen sind Zugbrüche mit glatten, an Schichtflächen absetzenden Brüchen, ausgeprägt als Kleinklüftung, in Kalkmergel-Mergelsteinlagen unebene Trenn-

flächen; Trennflächen zeigen keine Verkarstungserscheinungen oder Spaltenbildungen.

○ K₂ - bc - Trennflächenschar

Streicht streuend um N - S, die Flächen fallen etwas öfter nach Osten und weniger nach Westen ein; die Trennflächen sind Zugbruchbildungen mit glatten bis unebenen, welligen Oberflächen; eine ausgeprägte Kleinklüftung mit einer Erstreckung von < 1 m ist im Gebirge dominant; Großklüfte mit 1 - 10 m Erstreckung sind seltener, aber an den Tagebauböschungen zu beobachten; der Durchtrennungsgrad nimmt wie bei der K₁-Schar mit der Erstreckung ab.

○ K₃ - ab - Trennflächenschar bzw. Schichtflächen

Sind genetisch angelegt und vorrangig überwiegend flach mit Einfallwinkeln von 0 - 5 ° und folgen der NW - SE Richtung mit tendenziell vorwiegend nach NE flach geneigten Flächen; die K₃-Schar ist deutlich und mit hoher Durchtrennung ausgebildet; die Trennflächen stark karbonatischer Schichten sind eben und glatt; in den Mergelsteinen ... Kalkmergelsteinen können die Flächen wulstig bis wellig ausgebildet sein; in diesen Bereichen kleinklüftiger Ausbildung kann der Durchtrennungsgrad auf 0,8 ... 0,7 absinken; in feinschichtigen Bereichen sind die Kluftabstände < 1 cm.

Die vorgenannten, primären Haupttrennflächenscharen des Festgebirges werden durch ein jüngerer, diagonales Scherklufftpaar schwach gestört, welches durch bruchtektonische Beanspruchung gebildet worden ist. In diesem Zusammenhang wurde das Schichtpaket geringfügig nach NE gekippt.

Die Kluftabstände jeder Haupttrennflächenschar wurde statistisch auf den Sohlen erfasst und im Bild 4.5.3 statistisch ausgewertet. Die mittleren Kluftabstände betragen für

K ₁	-	0,2536 m
K ₂	-	0,2739 m
K ₃	-	0,1145 m

und ergeben einen durchschnittlichen Kluftkörper von

$$7,9532891 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3.$$

Nach den Ergebnissen der Festgesteinsbewertung (Tabelle 4.5.1) und der Trennflächenabstände ist das Festgebirges als

mittelschwer

einzustufen (vergleiche Bild 4.1.1).

4.5.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die veränderten und messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen sind im Vergleich zur bisherigen Vorgehensweise hinsichtlich der verwendeten Bohr-, Spreng- und Zündparameter in der Tabelle 4.5.2 zusammengestellt.

Auf Grund der bisher vergleichsweise kleinen Sprengungen müssen jede Woche 1 - 2 Gewinnungssprengungen durchgeführt werden.

Als besonders beachtenswerte Randbedingungen im Tagebau Habermühle/Burgbernheim ist die im nordöstlichen Nahbereich, direkt vorbeiführende zweigleisige, elektrifizierte Bahnstrecke Ansbach - Würzburg (Bild 4.5.1). Die Sprengerschütterungen dürfen den zulässigen Anhaltswert für die Strecke nicht überschreiten. Die Gewinnungssprengungen sind absolut steinflugfrei auszuführen. Im Rahmen der Forschungsarbeiten sollen folgende Veränderungen und Zielstellungen angestrebt werden:

- Erhöhung des Sprengvolumens bzw. der Größe der Sprenganlagen zwecks Reduzierung der Umweltbeeinflussung.
- Vergrößerung der Reihenanzahl mit der Möglichkeit der simultanen Zündung mehrerer Bohrlöcher zwecks Erhöhung der Zertrümmerungswirkung.
- Anpassung des Sprengstoffes an das Festgebirge bei voller Ausladung der Bohrlöcher bzw. unter Beachtung der zulässigen Anhaltswerte der Sprengerschütterungsimmissionen mit dem Ziel der Modernisierung der Bohr- und Sprengtechnik.

Die bisher angewandte Einzellochzündung wurde bei allen drei Versuchssprengungen von nach der Impulstheorie simultan gezündeten Reihen ersetzt (Bild 4.5.4.1 bis 4.5.4.3). Der Einsatz von gepumpten Emulsionssprengstoff war der erste dieser Art im Landkreis Neustadt a. d. Aisch - Bad Windsheim, so dass eine Vielfalt von Neuerungen in der Sprengtechnik zur Anwendung kam.

Tabelle 4.5.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Gewinnungssprengungen im Tagebau Habermühle/Burgbernheim

Parameter (Dimension)	Streuung der bisherigen Werte	Versuchssprengungen am		
		13. 08. 2012	03. 09. 2012	16. 10. 2012
<i>Geometrische Parameter</i>				
Wandhöhe (m)	14-15 (3. Sohle); 20-22 (1./2. Sohle)	20	21	20
söhlige Vorgabe (m)	3,5-4,0	4,80	4,80	4,80
söhliger Reihenabstand (m)	-	4,2	4,6	4,3
Bohrlochabstand (m)	3,5-3,7	4,2	4,6	4,5
Bohrlochneigung (°)	80-85	80	80	80
Länge des Bohrloches (m)	15-22	20,3	21,5	19 - 21,0
Bohrlochdurchmesser (mm)	90	90	90	90
Besatzlänge (m)	3,5 ... 4,0	3,5 ... 4	3,5 ... 4	3,5 ... 4
Anzahl der Reihen	1	3	3	3
Anzahl der Bohrlöcher	5-12	34	38	32
Haufwerksvolumen (m ³)	1200-3500	11855,97	17544,86	13966,65
<i>Sprengtechnische Parameter</i>				
Füllungsgrad (%)	0,6-0,8	1	1	1
eingesetzte Sprengstoffe	Riodin (gelatinös) Permonex (ANFO) Riohit (Emulsion)	4920 kg Riomex/Al 42,33 kg Booster-Eli 170 kg Riohit St/65	5500 kg Riomex Sc 7000 47,31 kg Booster Eli 190 kg Emulgit 42P	4780 kg Riomex 39,84 kg Booster Eli 160 kg Emulgit 42P
Detonationsgeschwindigkeit (m/s)	≥ 2800	5271	5224	5280
Sprengschnur (g) (m)	-	-	-	-
Gesamtladmenge (kg)	377,5-817,5 (max. 1000)	5137,33	5737,31	4979,84
maximale Ladmenge Bohrloch (kg)	20-25/40-45/80-85	151,245	151,245	171,245
spezifischer Sprengstoffverbrauch (kg/m ³)	0,308 ... 0,276	0,433	0,327	0,3566
<i>Zündtechnische Parameter</i>				
Zündung	Einzellochzündung; geteilte Ladesäule (2-3) nichtelektrisch, redundant 1 HU Zünder, elektrisch	nichtelektrisch, redundant, Impulstheorie	nichtelektrisch, redundant, Impulstheorie	nichtelektrisch, redundant, Impulstheorie
Zündzeitstufen (ms)	42 ms, 25 ms, 17 ms	25	25	25
simultan gezündete Bohrlöcher	1	3	3	3
letzte Zeitstufe (ms)	je nach Anzahl Bohrlöcher	825	742	875
Ladmenge pro Zündzeitstufe	20-25/40-45/80-85	453,735	453,735	513,735

4.5.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Das Bild 4.5.1 enthält die genaue Lage der Versuchssprengungen, die ihre Hauptabstrahlrichtung hinsichtlich der Erschütterungsimmissionen nach Norden ... Nordosten hatten, damit die Auswirkungen auf die Bahnstrecke genau beurteilt werden

konnten. Jede der Versuchssprengungen befindet sich im vergleichbaren Homogenbereich, so dass eine optimale Auswertung der Ergebnisse ermöglicht werden konnte.

Mit den 3-D-Laserscannerdarstellungen wurde die Haufwerkslage der zweiten und dritten Sprengung erfasst. Bei der zweiten Sprengung ist erkennbar, dass die hinteren Seitenbereiche nicht optimal ausgeworfen worden sind (Bilder 4.5.5.1 und 4.5.5.2).

Bei der dritten Sprengung zeigte sich eine Grabenbildung zwischen Haufwerk und stehen gebliebener Böschung.

Die Tabelle 4.5.3 vermittelt die erfassten Schwinggeschwindigkeiten und Frequenzen je nach Entfernung von der Sprengung zum Messort.

In den Bildern 4.5.6.1 bis 4.5.6.10 sind die wichtigsten Dehnungs-Stauchungskurven aus dem Nahbereich der Sprengungen aufgezeichnet. Es gab durch Abbrüche der mit den karbonatischen Gesteinen auf den Schichtflächen verklebten Sensoren einige Messausfälle.

Die Erschütterungsmessungen der Versuchssprengungen sind im Bild 4.5.7 als Schwinggeschwindigkeits-Abstands-Diagramm ausgewertet und zeigen im Vergleich zur bisherigen Vorgehensweise eine deutliche Abnahme der Werte.

Im Bild 4.5.8 wird die statistische Ermittlung der Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung aufgezeigt, die ihrerseits vergleichsweise zur bisherigen Bohr- und Sprengtechnik bei gleicher fiktiver Energie-Abstandsgröße eine Verringerung der Sprengerschütterungen nachweist. Der Abbau der Karbonatgesteine ist unter Beachtung der immissionsrechtlichen Randbedingungen somit im Tagebau Burgbernheim auch bei Annäherung an die Ortschaft Mörlbach ohne Probleme möglich. Gegebenenfalls sind die Wandhöhen zu halbieren und die Sprenganlagen zu verdoppeln, um eine weitere Abminderung der Erschütterungen zu erreichen.

Tabelle 4.5.3: Erschütterungsmessungen Tagebau Habermühle/Burgbernhelm

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
13.08.2012 14:00	B1		1 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	32,7	79,505	95,389	139,430	139,430	21,0	12,0	12,0	33,0
13.08.2012 14:00	B1		2 E-Mastfundament neben Bahnstrecke	Freifeld	76,5	57,451	34,162	26,349	57,451	16,0	15,0	15,0	33,0
13.08.2012 14:00	B1		3 Abraumssole	Freifeld	95,1	59,655	61,796	50,797	61,796	16,0	10,0	10,0	50,0
13.08.2012 14:00	B1		4 Abraumssole	Freifeld	162,0	26,904	25,107	21,584	26,904	20,0	23,0	23,0	33,0
13.08.2012 14:00	B1		5 Viadukt	Freifeld	175,7	20,040	18,920	9,600	20,040	30,3	40,0	100,0	30,3
13.08.2012 14:00	B1		6 Pflaumenbaum an Bahn	Freifeld	285,1	17,680	18,420	7,010	18,420	12,3	12,2	38,5	12,2
13.08.2012 14:00	B1		7 Fam. Markert, Wohnhaus	Fundament	876,3	0,900	1,100	0,800	1,100	24,0	8,0	26,0	8,0
03.09.2012 14:00	B2		1 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	46,7	77,076	57,261	132,780	132,780	2,0	3,0	14,0	14,0
03.09.2012 14:00	B2		2 E-Mastfundament neben Bahnstrecke	Freifeld	90,0	37,468	32,393	52,580	52,580	22,0	10,0	33,0	33,0
03.09.2012 14:00	B2		3 Tagebau, 2. Sohle	Freifeld	124,6	20,776	29,719	20,053	29,719	35,0	27,0	100,0	27,0
03.09.2012 14:00	B2		4 Tagebau, Trafostation, 2. Sohle	Freifeld	221,7	3,825	5,973	3,622	5,973	20,0	26,0	20,0	26,0
03.09.2012 14:00	B2		5 Gartenweg 13, Kellergeschoss	Fundament	914,3	1,660	1,100	2,150	2,150	6,0	15,6	34,5	34,5
03.09.2012 14:00	B2		6 Viadukt	Freifeld	211,1	21,900	21,820	21,890	21,900	45,5	32,3	37,0	45,5
03.09.2012 14:00	B2		7 Fam. Markert, Wohnhaus	Fundament	903,1	1,300	1,600	1,800	1,800	20,0	25,0	35,0	35,0
03.09.2012 14:00	B2		8 Fam. Markert, Schweinestall	Fundament	682,1	1,500	2,700	2,300	2,700	30,0	12,0	36,0	12,0
16.10.2012 14:00	B3		1 Tagebau, 1. Sohle	Freifeld	26,8	137,520	69,053	118,250	137,520	1,0	3,0	15,0	1,0
16.10.2012 14:00	B3		2 E-Mastfundament neben Bahnstrecke	Freifeld	69,7	93,073	57,002	47,224	93,073	20,0	12,0	23,0	20,0
16.10.2012 14:00	B3		3 Abraumssole	Freifeld	91,4	39,700	51,134	71,721	71,721	20,0	17,0	35,0	35,0
16.10.2012 14:00	B3		4 Abraumssole	Freifeld	150,4	59,922	43,118	29,529	59,922	26,0	18,0	26,0	26,0
16.10.2012 14:00	B3		5 Viadukt	Freifeld	164,6	21,340	21,440	21,150	21,440	31,2	25,0	43,5	25,0
16.10.2012 14:00	B3		6 Gartenweg 13, Kellergeschoss	Fundament	868,4	0,790	0,640	1,320	1,320	6,3	5,8	41,7	41,7
16.10.2012 14:00	B3		7 Fam. Markert, Wohnhaus	Fundament	869,9	0,900	1,100	1,100	1,100	23,0	9,0	36,0	9,0
16.10.2012 14:00	B3		8 Fam. Markert, Schweinestall	Fundament	651,6	1,000	1,900	1,400	1,900	23,0	8,0	39,0	8,0

4.6 Felsbaumaßnahme Ortsumgehung B 173 Flöha/Sachsen

4.6.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge

Ein im Zuge der Ortsumgehung B 173 in Flöha geplantes Brückenbauwerk quert die DB AG Strecke Annaberg - Flöha (Erzgebirgsbahn) spitzwinklig den Streckenkilometerbereich km 42 + 780 bis 42 + 900. Die Bahnstrecke verläuft parallel der Golfplatzstraße südwestlich von einer Kleingartenanlage mit Siedlungshäusern in einem bis 12 m tiefen Einschnittsbereich, an dessen nordöstlicher Böschung eine sprengtechnische Erweiterung für eine temporäre Baustraße erfolgen soll (Bild 4.6.1).

Das Gebiet gehört zum südöstlichen Rand des karbonen Beckens von Flöha, welches unmittelbar dem Mittelsächsischen Synklinorium - vereinfacht der „Phyllitzone“ der älteren Unterlagen - aufgelagert ist.

In dem Einschnittsbereich der Bahnstrecke sind Überreste von Molasse-Sedimenten des Siles angeschnitten über dem sich Deckenreste eines Rhyolithes und dessen Pyroklastite von Flöha befinden. Diese treten als sichtbare Felsklippen in Erscheinung. Der anstehende Rhyolith-Pyroklastit kann bereichsweise Bergwasser führen.

Unter einem oberflächennah bindig zersetzten Rhyolith-Pyroklastit, der allmählich in einen steinig-kieskörnigen Verwitterungsschutt mit bindigen Anteilen übergeht, folgt im Sprengbereich das eigentliche Festgestein

ein Rhyolith-Pyroklastit.

Das ignimbritische Gestein ist porös, durch zahlreiche Quarzkristalle porphyrisch und zeigt stellenweise eine Fließtextur mit deutlich pyroklastischen Merkmalen wie brekziöse, unregelmäßige Brocken und Gerölle.

Der Rhyolith-Pyroklastit weist eine unterschiedlich starke Verwitterung der Grundmasse auf, die an dem Farbwechsel von ockergelbgrau, hellgrau, weißgrau bis rötlichgrau, hellrotgrau bis hellviolett zu erkennen ist.

Zur gesteinsphysikalischen und -dynamischen Beurteilung des Rhyolith-Pyroklastites wurden aus dem anstehenden Gebirge mittels einer Kernbohrmaschine Proben entnommen, an denen die in Tabelle 4.6.1 zusammengestellten gesteinsphysikalisch-dynamischen Kennwerte bestimmt worden sind.

Tabelle 4.6.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des Rhyolith-Pyroklastites im Bahneinschnitt der Erzgebirgsbahn Flöha

Gesteinsphysikalisch-dynamischer Kennwert	Dimension	Streuung	Mittelwert
Rohdichte	g/cm ³	2,20-2,27	2,22
Poisson-Zahl	-	0,189-0,259	0,224
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	3189-3747	3407
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	1920-2160	2080
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	20,18-26,02	22,35
G-Modul	kN/mm ²	8,41-10,34	9,12
akustische Impedanz	10 ⁶ kg/(m ² s)	7,0-8,5	7,6
Festigkeit (F) [nach Bild 4.1.1]	-	mittel schallhart mittel fest	

Das Trennflächengefüge wurde im Rhyolith-Pyroklastit erfasst und in den Bildern 4.6.2.1 und 4.6.2.2 dokumentiert. Der Pyroklastit zeigt eine breit streuende, säulenartige Absonderungsklüftung mit folgenden Haupttrennflächenscharen (Bild 4.6.2):

- *K₁ - ac - Trennflächenschar*
NE ... ENE/SW ... WSW streichende, breit streuende Klüfte mit teilweise hohem Durchtrennungsgrad und weiter Erstreckung; verlaufen etwa senkrecht zum Ausbruch der Sprenganlage; steiles, meist NNW - Einfallen.
- *K₂ - bc - Trennflächenschar*
NNW ... NW/SSE ... SE streichend und überwiegend nach NE ... ENE steil einfallend; dominierende Flächen fallen in die Einschnittsböschung ein.
- *K₃ - ab - (Fließ-) Trennflächenschar*
NW - SE verlaufend mit mittelsteilem ... flachem SW-Einfallen, unregelmäßige Oberflächen, absetzend an Haupttrennflächen K₁ und K₂; talseitig oft weiter aushaltend und gleitflächengefährdet.

Das Trennflächengefüge verleiht dem Rhyolith-Pyroklastit eine mittlere bis hohe Teilbeweglichkeit an der Einschnittsböschung infolge wechselnder Kluftabstände. Die Kluftabstände wurden infolge der klippenartigen Aufschlüsse nur sporadisch ermittelt. Die Kluftabstände der Scharen K₁ - K₃ streuen von 0,1 bis 0,85 m; es dominierten Abstände von 0,25 - 0,60 m.

Das Festgebirge hat danach eine geringe bis sehr geringe Trennflächenhäufigkeit. Aus der mittleren akustischen Impedanz und der Trennflächenhäufigkeit ist das Festgebirge als

schwer sprengbar

einzuordnen.

Die kinematische Analyse der Teilbeweglichkeit des Festgebirges unter Einbeziehung des minimalen Kluffreibungswinkels von 30° ergibt verallgemeinert nach Bild 4.6.3 eine gleit- und kipppgefährdete Böschung nach erfolgter Sprengung, so dass man über eine temporäre Sicherung befinden muss.

4.6.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die wichtigsten Parameter der bewerteten Spaltsprengungen, die in diesem Zusammenhang erstmals bewusst nach der sonischen Wirkung dimensioniert wurden, sind in Tabelle 4.6.2 enthalten. Die besonderen Randbedingungen für die Sprengungen waren (vergleiche Bild 4.6.1):

- Im unmittelbaren Nahbereich befanden sich als Wohnhäuser genutzte Gebäude mit der geringen Entfernung von $\geq 17,0$ m.
- Etwa 5 - 6 m vor den Sprenganlagen führt das Gleis der Erzgebirgsbahn vorbei; die Gleisanlage durfte in keiner Weise beeinträchtigt werden.
- In Auswurfriechung befanden sich mehrere Gebäude, ein Altenpflegeheim und empfindliche Industrieanlagen, die keine hohen Erschütterungen zuließen; ein Steinflug war zwingend zu vermeiden.
- Etwa 2,5 m hinter der Spaltsprengung vom 30. 08. 2010 musste ein vorhandener Brunnen ungestört bleiben.
- Der Maststandort der 110 kV-Hochspannungsleitung etwa 100 m hinter den Sprengungen durfte in keiner Weise beeinträchtigt werden.

Die Spaltsprengungen wurden so ausgelegt, dass eine supersonische Wirkung garantiert eintrat (Bilder 4.6.4.1 und 4.6.4.2). Bei der Umsetzung der Planung von Bild 4.6.4.1 wurde die lange Böschung in vier Etappen gesprengt. Die Spaltsprengung am 30. 08. 2010 wurde auf einer Länge von mehr als 20 m abgetan, bei der gleichzeitig 98,7 kg Sprengstoff gezündet werden mussten.

Tabelle 4.6.2: Bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der messtechnisch begleiteten Spaltsprengungen im Bahneinschnitt der Erzgebirgsbahn Flöha

Parameter	Sprengung am 30. 08. 2010	Sprengung am 13. 09. 2010
<i>Geometrische Parameter</i>		
Wandhöhe (m)	8,0	7,0-8,0
söhlige Vorgabe (m)	∅ 6,0	∅ 6,0
söhliger Reihenabstand (m)	-	-
Bohrlochabstand (m)	Sp 0,5 m/1,5 m Auflockerungssprengung	0,5 m/1,5 m Auflockerungssprengung
Bohrlochneigung (°)	80	80
Länge des Bohrloches (m)	8,2	8,0-8,2
Bohrlochdurchmesser (mm)	89	89
Besatzlänge (m)	0,5	0,5
Anzahl der Reihen	1	1
Anzahl der Bohrlöcher	42 Spalt/13 Aufl.	13/13/13 Spalt./13 Aufl.
Haufwerksvolumen (m ³)	1020,6	948
<i>Sprengtechnische Parameter</i>		
Füllungsgrad	0,036	0,036
eingesetzte Sprengstoffe	275 kg Ergodyn 30E (Auflock.) 52,5 kg 100 g Sprengschnur (Spalt)	308,75 kg Ergodyn 30E (Auflock.) 48,75 kg 100 gr Sprengschnur (Spalt)
Detonationsgeschwindigkeit (m/s)	~ 8000	~ 8000
Sprengschnur (g) (m)	52,5 kg (100 g/m)	48,75 kg (100 g/m)
Gesamtladmenge (kg)	98,7	30,55
maximale Ladmenge Spaltsprengung (kg)	98,7	30,55
spezifischer Sprengstoffverbrauch (kg/m ³)	0,321	0,320
<i>Zündtechnische Parameter</i>		
Zündung	Spaltsprengung - Moment Auflockerung - 25 ms Verzögerung	Spaltsprengung - Moment Auflockerung - 25 ms Verzögerung
Zündzeitstufen (ms) Spaltsprengung	Moment	Moment
Lademenge pro Zündzeitstufe	98,7 kg/Z	30,55 kg/Z
Dauer der Zündfolge (ms)	350 ms	375 ms

4.6.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Die erste Sprengung am 30. 08. 2010 war ein optimaler Erfolg. Es hat sich eine ± glatte Böschungsfäche von 80 ° Neigung auf der vollen Tiefe von 8 ... 9 m ergeben, ohne dass der Brunnen in seiner Funktion und Standfestigkeit geschädigt worden ist. Die erfassten Erschütterungsmessungen sind in Tabelle 4.6.3. aufgeführt. Eine beispielhafte, sehr markante Dehnungsmessung wird mit Bild 4.6.5 belegt. Nur 17 m hinter der Spaltsprengung wurde eine Stauchung der Stoßwelle von 153 µm/m gemessen, die wie ein einziger derber Schlag auf das Gebäude gespürt worden ist, ohne einen einzigen Risschaden zu verursachen. Die Schwinggeschwindigkeit betrug an der gleichen Messstelle 70 mm/s. Im Bild 4.6.6 sind die Erschütterungswerte der Spaltsprengungen im Schwinggeschwindigkeits- (ppv) Entfernungs- (r) Diagramm ausgewertet. Die erhebliche Streuung der Messwerte zeigt, dass eine Analyse der Erschütterungsimmissionen nicht ohne Bezug zum Sprengstoff und zur wirksamen Lademenge erfolgen kann. Wird die statistische

Berechnung der Messergebnisse mit der fiktiven Energie-Abstandsbeziehung vorgenommen, ist eine eindeutige, statistisch gesicherte Gleichung zu ermitteln (Bild 4.6.7). Dieses Ergebnis ist der praktische Beweis für die Richtigkeit der allgemeinen Grundbeziehung für die Erschütterungsprognose (Bild 4.6.7). Vergleichsweise zu anderen Regressionsgleichungen liegt die gefundene fiktive Energie-Abstandsbeziehung von der Baustelle in Flöha eindeutig im supersonischen Bereich.

Tabelle 4.6.3: Erschütterungsmessungen an der B173 in Flöha

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r m	ppv _x mm/s	ppv _y mm/s	ppv _z mm/s	ppv _{max} mm/s	f _x Hz	f _y Hz	f _z Hz	f _{max} Hz
30.08.2010	F1	1	Fam. Liebing	Fundament	16,9	59,960		69,029	69,029	5,0		7,0	7,0
30.08.2010	F1	2	Fam. Hase	Fundament	35,0	21,966	22,619	22,619	22,619	10,0	15,0	20,0	10,0
30.08.2010	F1	3	Fam. Anke, Gartentor	Freifeld	84,0	1,275	9,800	22,232	22,232	166,0	71,0	71,0	71,0
30.08.2010	F1	4	E-Mast	Fundament	93,0	18,716	5,744	18,716	18,716	71,0	9,0	83,0	71,0
30.08.2010	F1	6	Fam. Langner	Fundament	126,9	9,560	8,590	4,320	9,560	6,9	8,4	11,1	6,9
30.08.2010	F1	5	Fam. Anke, Fundament	Fundament	81,5	14,540	7,390	8,840	14,540	6,7	7,5	11,5	6,7
13.09.2010	F2	1	Fam. Liebing	Fundament	29,1	6,946	5,099	5,829	6,946	14,0	9,0	14,0	14,0
13.09.2010	F2	2	Fam. Hase	Fundament	46,7	5,395	5,710		5,710	20,0	21,0		21,0
13.09.2010	F2	3	Fam. Anke, Gartentor	Freifeld	75,1	6,017	3,484	3,898	6,017	8,0	6,0	10,0	8,0
13.09.2010	F2	5	Fam. Anke, Fundament	Fundament	78,5	3,718	3,588	3,615	3,718	11,0	83,0	10,0	11,0
13.09.2010	F2	6	Fam. Langner	Fundament	141,0	3,150	3,600	1,940	3,600	8,5	8,0	11,9	8,0
13.09.2010	F2	4	E-Mast	Fundament	101,7	2,460	3,870	1,710	3,870	8,6	9,1	24,4	9,1
20.09.2010	F3	1	Fam. Liebing	Fundament	29,6	5,486	8,939	8,855	8,939	11,0	22,0	35,0	22,0
20.09.2010	F3	2	Fam. Hase	Fundament	37,4	11,185	6,103	12,343	12,343	18,0	29,0	27,0	27,0
20.09.2010	F3	5	Fam. Anke, Fundament	Fundament	99,0	1,955	1,352	2,020	2,020	16,0	15,0	12,0	12,0
20.09.2010	F3	3	Fam. Anke, Gartentor	Freifeld	110,9	1,197	1,497	1,895	1,895	62,0	22,0	50,0	50,0
20.09.2010	F3	6	Fam. Langner	Fundament	114,4	2,280	3,380	1,930	3,380	13,9	13,5	50,0	13,5
20.09.2010	F3	4	E-Mast	Fundament	133,9	0,690	1,070	0,960	1,070	31,2	38,5	18,5	38,5

4.7 Felsbaumaßnahme Westtangente Bautzen/Sachsen

4.7.1 Sprengbarkeit und Trennflächengefüge

Inmitten der westlichen Stadt Bautzen wird die sogenannte Westtangente zwecks Umgehung des überregionalen Verkehrs der B 6 und B 96 gebaut. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich unter der Daimler Straße bei vorhandener enger Bebauung einen Tunnel in offener Bauweise aus dem granodioritischen Festgebirge sprengtechnisch zu lösen. Auf einer Tunnellänge von 197 m sollten in dem bis 11 m tiefen und 10 - 11 m breiten Tunnelleinschnitt ca. 21000 m³ Granodiorit sprengtechnisch gewonnen werden. Der nahezu bis zur Oberfläche austreichende Lausitzer Biotit-Granodiorit ist das maßgebende Festgestein des Bauraumes. Das Gestein zeigt folgend Merkmale:

- Das Korngefüge ist mittelkörnig, richtungslos, holokristallin, hypidiomorph, lokal schlierig, anatektisch, selten pseudoporphyrisch.
- Das Gestein führt häufig Einschlüsse, Xenolithe von nicht restlos aufgeschmolzenen Sedimentiten, Quarzgerölle und Grauwackenhornfelse.
- Gelegentlich durchziehen das Gestein pegmatische, aplitische Schlieren und basische Ganggesteine.
- Die Farbgebung ist vom nicht verwitterten Gestein hellgrau bis dunkelgrau, schwarz interpunktiert, weißfleckig und in Schattierungen wechselhaft.
- In Oberflächennähe ist das Gestein rostbraunfleckig, schwach bis stark verwittert.

In der Tabelle 4.7.1 sind die gesteinsphysikalisch-dynamischen Kennwerte zusammengestellt.

Tabelle 4.7.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte des Biotit-Granodiorites

Gesteinsphysikalisch-dynamischer Kennwert	Dimension	Streuung	Mittelwert
Rohdichte	g/cm ³	2,54-2,78	2,684
Poisson-Zahl	-	0,124-0,304	0,2035
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	3042-4392	Ø 3837
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	1655-2547	Ø 2320
R-Wellengeschwindigkeit	m/s	1533-2286	Ø 2129
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	18,68-40,48	Ø 35,75
G-Modul	kN/mm ²	7,24-18,01	Ø 15,0
akustische Impedanz	10 ⁶ kg/(m ² s)	8,0-12,17	Ø 10,48
Festigkeit (F) [nach Bild 4.1.1]	-	mittel schallhart bis schallhart mittel fest bis fest	schallhart fest

Durch den wechselnden Verwitterungszustand in Oberflächennähe können sich die Eigenschaften gemäß Tabelle 4.7.1 eher zu den minimalen Kennwerten verschieben. Die im Festgebirge vorhandenen Trennflächenscharen sind in den Diagrammen der Bilder 4.7.2.1 und 4.7.2.2 dokumentiert. Verallgemeinert kann das Trennflächengefüge wie folgt gekennzeichnet werden:

- *K₁ - Q- oder ac - Trennflächenschar*
 WNW - ESE streichend und meist steil nach SSW einfallend, dominierend vertikale Trennflächen mit basischen, geringmächtigen Ganggesteinen (3 Stück quer zur Tunnelachse); glatte Flächen, zugbruchartig; breit streuend, teilweise scherkluftartig überprägt.
- *K₂ - S- oder bc - Trennflächenschar*
 Um N - S ... NNE - SSW, meist steil nach WNW ... W einfallend; etwa der Tunnelachse folgend und damit böschungsbildend; breit streuend und ebenfalls scherkluftartig überprägt; durchsetzende, absetzige und häufig bewegte Trennflächen; dichtkluftartig auftretend; teilweise auf mittelsteil drehend.
- *K₃ - oder ab - Trennflächenschar*
 E - W ... bis NW - SE streichend, erheblich streuend, flach bis mittelsteil, nach E bis NE einfallend, oft als oberflächenparallele Platten- oder Exfoliationsklüftung ausgebildet; Trennflächen häufig nicht durchsetzend; mit zunehmender Tiefe steigen die Abstände allmählich auf 0,8 ... 2,5 m an; der Durchtrennungsgrad erreicht Werte bis 0,7; die K₃-Trennflächen sind die vorherrschende Schar.

Das Diagramm des ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET (RRSB) - Netzes des Bildes 4.7.3 vermittelt die Ergebnisse der Kluftabstandsmessungen von K₁-, K₂- und K₃-Flächen. Die statistisch gesicherte Erfassung ergibt die nachstehenden mittleren Trennflächenabstände:

K ₁	-	0,644 m
K ₂	-	0,416 m
K ₃	-	0,392 m

und ergeben einen durchschnittlichen Kluftkörper von

$$0,105 \text{ m}^3.$$

Das entspricht gemäß der Klassifikation der Festgebirge nach der Trennflächenhäufigkeit T einer Zuordnung in die Bereiche

geringe bis sehr geringe Trennflächenhäufigkeit mit Tendenzen zur Tiefe in ein gering massives Gebirge.

Im Ergebnis der Gesteins- und Gebirgsbewertung ist das granodioritische Festgebirge als

sehr schwer bis extrem schwer sprengbar

einzustufen.

4.7.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die Dimensionierung der Sprengungen im Tunneleinschnitt erfolgte auf der Grundlage des neu entwickelten Sprengmodells unter Einbeziehung der sonischen Wirkung. Die Wahl der Bohr- und Sprengparameter musste zwingend supersonisch erfolgen, weil durch die Nähe der Bauwerke geringst mögliche Erschütterungen ausgelöst werden sollten (Bild 4.7.1). Das gesprengte Festgestein sollte durch entsprechende Fördertechnik gerade noch verladen und transportiert werden können. Somit wurde von vornherein darauf hingewiesen, dass das gesprengte Haufwerk blockig bis großstückig anfällt. Die 1. Phase des sprengtechnischen Lösens im Tunneleinschnitt wurde ausschließlich als Spaltsprengungen unter Verwendung von Sprengschnur mit Nitropenta konzipiert (Bild 4.7.4.1).

Mit zunehmender Tiefe bei 5 ... 6 m unter Gelände wurde das Festgebirge massiver und zeigte eine gering durchtrennte oberflächenparallele K_3 -Trennflächenschar, so dass das Lösen und die Zertrümmerung des Gesteines nur durch Umstellung in der 2. Phase auf eine Zertrümmerungs- oder Gewinnungssprengung erreicht werden konnte (Bild 4.7.4.2). In der 2. Phase kamen patronierte, gelatinöse Sprengstoffe mit geringerer Detonationsgeschwindigkeit zum Einsatz. Die zusammengefassten bohr-, spreng- und zündtechnischen Parameter sind in der Tabelle 4.7.2 aufgeführt. Das Bild 4.7.1 zeigt beispielhaft wie groß die einzelnen Sprengungen ausgelegt worden sind. Die Sprengungen wurden sorgfältig abgedeckt, so dass jeglicher Steinflug ausgeschlossen werden konnte. Die einzelnen Abbauscheiben wurden in vier Stufen von oben nach unten abgetragen.

4.7.3 Ausgewählte Sprengergebisse

Aus dem Bild 4.7.1 ist zu entnehmen, dass beiderseits der Tunneltrasse je drei 3-Komponenten-Geophone und ein bis zwei Dehnungssensoren zu jeder Sprengung aufgestellt wurden. Die Überwachung der Sprengerschütterungsimmissionen war sowohl aus sicherheitlichen und sprengtechnischen Gründen als auch zur Beruhigung der Betroffenen zwingend erforderlich, weil die Bewohner während der Sprengungen in den Gebäuden verbleiben durften.

Tabelle 4.7.2: Zusammengefasste bohr-, spreng- und zündtechnische Parameter der Felsbaustelle Westtangente Bautzen

Parameter	Streuung/Einzelwert
<i>Geometrische Parameter</i>	
söhlige Vorgabe (m)	1,2 ... 1,25 ... 1,5
söhliger Reihenabstand (m)	1,2 ... 1,25 ... 1,5
Bohrlochabstand, Endböschung, Spaltsprengung (m)	0,3
Bohrlochabstand, mittlerer Bereich Spaltsprengungen (m)	0,4
Bohrlochabstand, 2. Phase (m)	0,8 - 1,20
Bohrlochneigung (°)	90 ... 80
Bohrlochlänge (m)	1,2 - 8,90
Bohrlochdurchmesser (mm)	76
Anzahl der Reihen	3 - 9
Gesamtanzahl der Bohrlöcher	11042
Gesamtbohrmeter (Bm)	32522
gesamtes Sprengvolumen (m ³)	20624
<i>Sprengtechnische Parameter</i>	
Füllungsgrad	0,03 ... 0,04 (Spaltsprengungen) 0,6 ... 0,75 (2. Phase)
eingesetzte Sprengstoffe (Gesamtverbrauch 82 Sprengungen)	1. Phase 3364,54 kg Nitropenta 2. Phase 6373 kg gelatinöse Sprengstoffe
Gesamtlademenge einer Sprengung je Bohrloch	1. Phase 7,5 - 11,5 kg/Sprengung 2. Phase 4 - 8 kg/Bohrloch
spezifischer, durchschnittlicher Sprengstoffverbrauch (kg/m ³)	0,472
<i>Zündtechnische Parameter</i>	
Zündung	1. Phase Momentzündung jeder Spaltsprengung 2. Phase nichtelektrisch 17 ms, 25 ms
simultan gezündete Bohrlöcher	2. Phase 2 - 3

Die Ergebnisse der Erschütterungsmessungen wurden sofort abgefragt und die Bauwerke hinsichtlich möglicher Schadensbildungen zeitnah untersucht. In den Bildern 4.7.5.1 bis 4.7.5.10 werden beispielhaft die teilweise recht hohen Dehnungs-Stauchungszustände durch die sprengtechnischen Einflüsse vorgestellt. Die maximalen Dehnungswerte sind in Abhängigkeit von der Entfernung im Bild 4.7.6 ausgewertet. Es ist tendenziell festzustellen, dass mit der Nitropenta-Sprengschnur geringere Dehnungswerte gegenüber den Sprengungen mit gelatinösem Sprengstoff ausgelöst werden. Dazu werden in der Tabelle 4.7.3a und 4.7.3b aus den beiden Sprengphasen 1 und 2 die Erschütterungsmessungen auszugsweise angegeben.

Das Bild 4.7.7 kennzeichnet die Ergebnisse der Schwinggeschwindigkeitsmessungen in Abhängigkeit von der Entfernung während der 1. Phase des Aushubes mit Verwendung von Sprengschnur. Die Schwinggeschwindigkeits-fiktive Impuls-Abstandsbeziehungen für die zwei Sprengphasen sind im Bild 4.7.8 dargestellt. Es wird in klarer Art und Weise die sonische Wirkung dokumentiert. Die Sprengungen der 1. Phase mit einer höheren Machzahl erzeugen bei gleichem Impuls weniger Erschütterungen als die der 2. Phase. Die blaue Regressionsgerade belegt die ausgelösten Erschütterungen mit der Sprengschnur und die der roten mit gelatinösem Sprengstoff. Diese Ergebnisse belegen in eindrucksvoller Weise, dass die sonischen Effekte eine sehr viel größere Rolle für die Sprengtechnik spielen als bisher angenommen. Die Erschütterungen nehmen von Sprengungen mit Sprengschnur zu solchen mit gelatinösen Gemischen um das 3,5 ... 4-fache zu. Die praktischen Auswirkungen der Erschütterungsimmissionen sind besonders im Nahbereich spürbar.

Tabelle 4.7.3a (auszugsweise): Erschütterungsmessungen Westtangente Bautzen, Phase 1 Sprengschnur

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
14.02.2011	1	MP1	Daimlerstr. 4, Keller	Fundament	36,2	4,260	3,460	3,910	4,260	58,8	62,5	250,0	58,8
14.02.2011	1	MP2	Daimlerstr. 4, Terrasse	Freifeld	26,0	7,216	12,424	7,489	12,424	62,0	55,0	125,0	55,0
14.02.2011	1	MP3	Daimlerstr. 4, Bauzaun	Freifeld	7,8	26,623	40,591	41,019	41,019	31,0	23,0	38,0	38,0
14.02.2011	1	MP4	Gasleitung, unten	Freifeld	3,6	109,590	34,471	107,090	109,590	3,0	23,0	5,0	3,0
14.02.2011	1	MP5	Kolpingstr. 29, Keller	Fundament	8,8	16,719	9,525	16,523	16,719	5,0	26,0	45,0	5,0
14.02.2011	1	MP6	Kolpingstr. 27, Keller	Fundament	23,5	7,050	5,400	17,940	17,940	90,9	142,9	90,9	90,9
14.02.2011	1	MP2	Daimlerstr. 4, Terrasse, 2. Ereignis	Freifeld	26,0		1,467	2,253	2,253	100,0	166,0	166,0	166,0
14.02.2011	1	MP4	Gasleitung, oben	Freifeld	3,6			169,640	169,640				6,0
17.02.2011	2	MP1	Daimlerstr. 4, Keller	Fundament	34,7	4,210	3,500	5,880	5,880	100,0	50,0	333,3	333,3
17.02.2011	2	MP2	Daimlerstr. 4, Terrasse	Freifeld	25,9	7,279	11,181	11,659	11,659	62,0	62,0	62,0	62,0
17.02.2011	2	MP3	Daimlerstr. 4, Bauzaun	Freifeld	7,6	17,828	51,695	43,771	51,695	41,0	31,0	26,0	31,0
17.02.2011	2	MP4	Gasleitung, unten	Freifeld	4,6	53,661	16,151	73,777	73,777	4,0	13,0	16,0	16,0
17.02.2011	2	MP5	Kolpingstr. 29, Keller	Fundament	8,8	13,477	7,798	25,598	25,598	11,0	38,0	45,0	45,0
17.02.2011	2	MP6	Kolpingstr. 27, Keller	Fundament	23,7	8,190	4,250	5,900	8,190	58,8	142,9	90,9	58,8
23.02.2011	3	MP1	Daimlerstr. 4, Keller	Fundament	33,4	6,040	5,900	5,200	6,040	90,0	40,0	250,0	90,0
23.02.2011	3	MP2	Daimlerstr. 4, Gartenhaus	Freifeld	23,5	8,956	10,578	11,455	11,455	71,0	50,0	71,0	71,0
23.02.2011	3	MP3	Daimlerstr. 4, Bauzaun	Freifeld	7,2	29,578	45,869	44,030	45,869	14,0	13,0	29,0	13,0
23.02.2011	3	MP4	Gasleitung (Revisionssschacht)	Freifeld	5,7	41,567	35,418	40,128	41,567	31,0	33,0	45,0	31,0
23.02.2011	3	MP5	Kolpingstr. 29, Keller	Fundament	10,1	18,109	9,392	11,111	18,109	35,0	13,0	83,0	35,0
23.02.2011	3	MP6	Kolpingstr. 27, Keller	Fundament	24,8	11,080	5,600	8,590	11,080	55,6	45,5	90,9	55,6
25.02.2011	4	MP4	Gasleitung (Revisionssschacht)	Freifeld	5,8	22,819	29,094	19,330	29,094	17,0	38,0	45,0	38,0
25.02.2011	4	MP5	Kolpingstr. 29, Keller	Fundament	16,8	8,212	6,731	4,773	8,212	41,0	15,0	35,0	41,0
25.02.2011	4	MP3	Daimlerstr. 4, Bauzaun	Freifeld	8,5	21,268	47,042	26,013	47,042	20,0	27,0	38,0	27,0
25.02.2011	4	MP2	Daimlerstr. 4, Gartenhaus	Freifeld	23,7		9,272	7,005	9,272	55,0	55,0	45,0	55,0
25.02.2011	4	MP1	Daimlerstr. 4, Keller	Fundament	33,4	4,580	4,260	4,130	4,580	71,4	55,6	142,9	71,4
25.02.2011	4	MP6	Kolpingstr. 27, Keller	Fundament	29,1	4,880	5,550	7,050	7,050	90,9	62,5	83,3	83,3
01.03.2011	5	MP4	Gasleitung (Geländeneiveau)	Freifeld	5,8	59,746	33,446	89,282	89,282	27,0	31,0	33,0	33,0
01.03.2011	5	MP5	Kolpingstr. 39, Keller	Fundament	14,3	7,531	8,970	4,436	8,970	55,0	62,0	71,0	62,0
01.03.2011	5	MP2	Daimlerstr. 2, Keller	Fundament	15,4	15,540	8,190	14,420	15,540	142,9	125,0	125,0	142,9
01.03.2011	5	MP6	Kolpingstr. 37, Keller	Fundament	25,4	8,520	8,890	5,200	8,890	90,9	90,9	333,3	90,9
03.03.2011	6	MP1	Daimlerstr. 2, Betonplatte	Freifeld	24,8	9,013	9,897	12,943	12,943	100,0	55,0	62,0	62,0
03.03.2011	6	MP2	Daimlerstr. 2, Keller	Fundament	13,5	18,830	12,350	9,970	18,830	83,3	90,9	83,3	83,3
03.03.2011	6	MP3	Daimlerstr. 2, Bauzaun	Freifeld	3,9	46,985	76,964	65,214	76,964	14,0	12,0	41,0	12,0
03.03.2011	6	MP4	Gasleitung (Geländeneiveau)	Freifeld	6,1	32,014	25,002	61,087	61,087	14,0	41,0	41,0	41,0
03.03.2011	6	MP5	Kolpingstr. 39, Keller	Fundament	11,6	10,164	8,655	10,887	10,887	45,0	17,0	100,0	100,0
03.03.2011	6	MP6	Kolpingstr. 37, Keller	Fundament	24,5	14,520	7,570	3,480	14,520	71,4	66,7	250,0	71,4

Tabelle 4.7.3b (auszugsweise): Erschütterungsmessungen Westtangente Bautzen, Phase 2 gelatinöser Sprengstoff

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
30.05.2011	39	MP5	Kolpingstr. 49, Keller	Fundament	21,8	9,560	10,269	8,718	10,269	10,269	35,0	45,0	83,0
30.05.2011	39	MP6	Kolpingstr. 47, Keller	Fundament	31,3	10,290	8,770	8,360	10,290	10,290	76,9	125,0	142,9
01.06.2011	40	MP1	Boschdienst, Keller, westlicher Teil	Fundament	32,5	7,460	7,500	8,920	8,920	8,920	52,6	83,3	200,0
01.06.2011	40	MP2	Boschdienst, Werkstatt	Fundament	26,9	11,539	9,132	10,114	11,539	11,539	71,0	45,0	71,0
01.06.2011	40	MP3	Boschdienst, Keller, östlicher Teil	Fundament	5,7	29,452	32,231	34,548	34,548	34,548	55,0	41,0	55,0
01.06.2011	40	MP4	Gasleitung (Geländeniveau)	Freifeld	13,5	17,119	23,212	8,135	23,212	23,212	38,0	41,0	62,0
01.06.2011	40	MP5	Kolpingstr. 49, Keller	Fundament	16,5	10,437	6,226	7,300	10,437	10,437	33,0	71,0	125,0
01.06.2011	40	MP6	Kolpingstr. 47, Keller	Fundament	27,7	16,660	15,050	5,780	16,660	16,660	50,0	58,8	200,0
06.06.2011	41	MP1	Boschdienst, Keller, westlicher Teil	Fundament	32,5	8,040	8,710	13,580	13,580	13,580	66,7	125,0	142,9
06.06.2011	41	MP2	Boschdienst, Werkstatt	Fundament	26,6	6,022	8,570	18,060	18,060	18,060	18,0	20,0	125,0
06.06.2011	41	MP3	Boschdienst, Keller, östlicher Teil	Fundament	5,5	16,024	28,982	41,230	41,230	41,230	45,0	31,0	45,0
06.06.2011	41	MP4	Gasleitung (Geländeniveau)	Freifeld	8,1	30,533	49,484	34,618	49,484	49,484	20,0	25,0	15,0
06.06.2011	41	MP5	Kolpingstr. 49, Keller	Fundament	14,9	22,285	17,927	9,399	22,285	22,285	27,0	45,0	45,0
06.06.2011	41	MP6	Kolpingstr. 47, Keller	Fundament	26,7	10,660	6,190	16,040	16,040	16,040	58,8	45,5	125,0
08.06.2011	42	MP1	Boschdienst, Keller, westlicher Teil	Fundament	32,8	12,600	10,890	12,690	12,690	12,690	90,9	111,1	142,9
08.06.2011	42	MP2	Boschdienst, Werkstatt	Fundament	27,4	9,377	30,519	23,766	30,519	30,519	62,0	3,0	166,0
08.06.2011	42	MP3	Boschdienst, Keller, östlicher Teil	Fundament	5,7	89,830	38,738	99,923	99,923	99,923	2,0	31,0	41,0
08.06.2011	42	MP4	Gasleitung (Geländeniveau)	Freifeld	5,5	40,072	72,780	69,474	72,780	72,780	19,0	33,0	16,0
08.06.2011	42	MP5	Kolpingstr. 49, Keller	Fundament	14,9	20,545	18,250	10,353	20,545	20,545	6,0	41,0	71,0
08.06.2011	42	MP6	Kolpingstr. 47, Keller	Fundament	26,6	16,060	13,030	11,380	16,060	16,060	76,9	62,5	166,7
10.06.2011	43	MP1	Getränkemarkt	Fundament	41,3	3,740	5,070	4,490	5,070	5,070	83,3	83,3	166,7
10.06.2011	43	MP2	Boschdienst, Werkstatt	Fundament	28,7	8,184	25,753	22,082	25,753	25,753	29,0	0,0	125,0
10.06.2011	43	MP3	Boschdienst, Keller, östlicher Teil	Fundament	7,8	24,405	20,987	37,980	37,980	37,980	62,0	33,0	83,0
10.06.2011	43	MP4	Gasleitung (Geländeniveau)	Freifeld	7,5	16,663	16,551	24,777	24,777	24,777	38,0	35,0	41,0
10.06.2011	43	MP6	Kolpingstr. 47, Keller	Fundament	28,4	13,000	6,750	15,120	15,120	15,120	83,3	40,0	125,0
15.06.2011	44	MP1	Getränkemarkt	Fundament	41,2	4,230	3,790	5,740	5,740	5,740	142,9	58,8	100,0
15.06.2011	44	MP3	Boschdienst, Verkaufsraum	Fundament	6,4	10,858	16,790	34,077	34,077	34,077	50,0	20,0	20,0
15.06.2011	44	MP4	Gasleitung (Geländeniveau)	Freifeld	4,9	31,677	23,282	53,640	53,640	53,640	11,0	23,0	20,0
15.06.2011	44	MP5	Dresdener Str. 45, Keller	Fundament	11,7	20,503	13,701	16,326	20,503	20,503	38,0	45,0	71,0
15.06.2011	44	MP6	Dresdener Str. 43, Keller	Fundament	34,2	7,300	7,490	6,680	7,490	7,490	76,9	76,9	58,8
20.06.2011	46	MP1	Daimlerstr. 4, Keller	Fundament	39,5	10,910	11,620	10,180	11,620	11,620	90,9	66,7	62,5
20.06.2011	46	MP2	Daimlerstr. 4, Terrasse	Freifeld	26,9	20,903	32,954	25,255	32,954	32,954	55,0	4,0	100,0
20.06.2011	46	MP3	Daimlerstr. 4, Bauzaun	Freifeld	8,0	45,659	45,715	68,927	68,927	68,927	13,0	22,0	38,0
20.06.2011	46	MP4	Gasleitung, Geländeniveau	Freifeld	5,0	40,746	49,456	103,580	103,580	103,580	14,0	26,0	31,0
20.06.2011	46	MP5	Kolpingstr. 29, Keller	Fundament	11,9	14,228	13,343	16,270	16,270	16,270	38,0	35,0	55,0
20.06.2011	46	MP6	Kolpingstr. 27, Keller	Fundament	24,1	15,250	9,700	17,380	17,380	17,380	76,9	58,8	166,7

4.8 Eisenbahntunnel Ramholz/Hessen

4.8.1 Sprengbarkeit, Ausbruchfestigkeit und Trennflächengefüge

Der neue Ramholz - Tunnel sollte unmittelbar neben dem bestehenden und voll genutzten alten Ramholz - Tunnel vorgetrieben werden (Bild 4.8.1). Der alte Ramholz - Tunnel ist nach Inbetriebnahme des neuen Tunnels still gelegt und verfüllt worden. Infolge der seinerzeit erkundeten und prognostizierten tunnelbaugeologischen Gegebenheiten sowie unter Beachtung der Überdeckungsverhältnisse und des alten Tunnels war ein gebirgsschonender Vortrieb vorgegeben, der mit einem Baggerbetrieb oder alternativ mit einem Fräsvortrieb umgesetzt werden sollte. Sprengvortrieb war auf Grund des direkt angrenzenden alten Ramholz - Tunnels mit vollem Bahnbetrieb in der Ausschreibung nicht zugelassen. Bei der Auffahrung stellte sich heraus, dass die erkundeten tunnelbaugeologischen Verhältnisse nicht mit den zunehmend festeren Gebirgsverhältnissen übereinstimmten. Die tatsächlichen Bedingungen konnten nur mit einem Sprengvortrieb bewältigt werden. Letztlich wurde der Tunnel in Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen der Tunnel im Bagger-, im kombinierten Bagger-/Meißelbetrieb sowie im Sprengvortrieb aufgefahren.

Das Tunnelbauobjekt befindet sich im nordöstlichen Rand des NW - SE verlaufenden Schlüchterner Beckens. Die Gesteine im Bereich des Tunnelabschnittes sind die Braunroten Tonsteinschichten und der Plattensandstein des Oberen Buntsandsteins (Rötfolge). Die Folge besteht aus einer Wechsellagerung von Ton-, Schluff- und Feinsandsteinen, die teilweise quarzitisches Bindemittel aufweisen sowie eine schwache diagenetische Prägung erfahren haben. An zahlreichen entnommenen Festgesteinsproben aus der Ortsbrust wurden die in Tabelle 4.8.1 aufgezeigten gesteintechnisch-dynamischen Kennwerte bestimmt. Die breite Streuung der gesteintechnischen Eigenschaften belegt einerseits die wechselhafte Korngrößenzusammensetzung der Festgesteine und zeigt andererseits die nicht einheitliche Verfestigung der Gesteine.

Je feinkörniger die Korngrößenzusammensetzung, umso geringer ist bei ähnlichen Bedingungen die Verfestigung wirksam. Das Festgebirge weist danach eine hohe Anisotropie und Inhomogenität auf, die im Aufschluss der Ortsbrust wenig deutlich in Erscheinung tritt (Bilder 4.8.3.1 und 4.8.3.2).

Das Bild 4.8.1 vermittelt die gesamte Baumaßnahme mit dem eingetragenen Trennflächengefüge, welches detailliert in Bild 4.8.2 dargestellt ist.

Tabelle 4.8.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der Ton-, Schluff- und Feinsandstein-Wechselagerung des Oberen Buntsandsteines vom neuen Ramholz - Tunnel

Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte	Dimension	Ton- Schluff- Feinsandwechsellagerung		
		⇒ Zunahme des Feinkornanteiles		
Rohdichte	g/cm ³	2,2-2,33 Ø 2,27	2,33-2,46 Ø 2,43	2,46-2,59 Ø 2,51
Poissonzahl	-	0,31-0,361 Ø 0,334	0,358-0,42 Ø 0,385	0,321-0,441 Ø 0,393
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	2702-3350 Ø 3125	3117-3554 Ø 3387	2416-3555 Ø 2961
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	1407-1687 Ø 1548	1143-1670 Ø 1458	779-1559 Ø 1215
R-Wellengeschwindigkeit	m/s	1307-1573 Ø 1444	1079-1563 Ø 1369	737-1464 Ø 1142
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	12,05-16,77 Ø 14,58	9,13-18,25 Ø 14,54	4,41-17,05 Ø 10,70
G-Modul	kN/mm ²	4,6-6,31 Ø 5,47	3,21-6,72 Ø 5,28	1,53-6,17 Ø 3,86
akustische Impedanz	10 ⁶ kg/(m ² s)	6,3-7,6 Ø 7,1	7,6-8,6 Ø 8,23	6,1-9,0 Ø 7,42
Festigkeit (F) [Bild 4.1.1]	-	mittel schallhart mittel fest	mittel schallhart mittel fest	mittel schallhart mittel fest

Die schwach geneigte, leicht verbogene Schichtenfolge hat ein breit streuendes Trennflächengefüge, welches spitzwinklig zur Tunnelachse verläuft (Bild 4.8.2):

○ *K₁ - ac - Trennflächenschar*

Um WNW - ESE breit streuend mit steilen, vorwiegendem SSW - Einfallen, teilweise auch nach NNE; Flächen dominieren als Kleinklüftung; vereinzelt Großklüfte mit einer Erstreckung von > 1 m sind vorhanden.

○ *K₂ - bc - Trennflächenschar*

Um NNE - SSW streichend, mäßig streuend mit überwiegendem, steilen Einfallen nach ESE bzw. WNW, absetzig auf K₃-Flächen, Kleinklüftung ist gegenüber vorhandenen Großklüften beherrschend.

o *K₃ - ab - Trennflächenschar/Schichtklüftung*

Sehr breit streuend von NNE - SSW ... NE - SW (dominierend) ... E - W und flach 5 - 20° nach NW einfallend; die hauptsächliche Einfallrichtung ist nach NW - WNW bis N - drehend; zahlreiche Schichtflächen setzen durch und begrenzen petrographisch und gesteinsmechanisch ähnliche Gesteinsschichten; andere Kleinklüfte sind unregelmäßig, wellig, absetzend; das Schichtflächengefüge ist vorherrschend (Bilder 4.8.3.1 und 4.8.3.2).

Die Haupttrennflächenscharen K₁ und K₂ verliefen spitzwinklig zur Tunnelachse und erschwerten die Ausbruchbedingungen.

Das Trennflächengefüge und die wechselhaften Gesteinsbeschaffenheiten beeinflussten wesentlich die Ausbruchfestigkeit des Festgebirges im Verlauf des Vortriebes. Die Flächen der Scharen K₁ und K₂-Richtungen bildeten im Zusammenwirken mit der Schichtklüftung K₃ oft ausbruchgefährdete Klufkörper mit Steinfallgefahr, insbesondere während des Kalottenvortriebes. Die K₃-Trennflächen sind durchschnittlich doppelt häufiger als die K₁/K₂-Scharen. Im Bereich der Braunroten Tonsteinschichten steigen die Kluffabstände von

- der mittleren ... geringen Trennflächenhäufigkeit bis zum km 18,476 auf
- sehr geringe Trennflächenhäufigkeit von > 0,6 m bis km 18,203 an.

Dieser Anstieg harmonisiert mit der zunehmenden Gesteinsfestigkeit.

Die Ausbruchfestigkeit wurde anfangs als baggerbar eingestuft und nahm bis zum km 18,441 auf sehr schwer baggerbar/leicht sprengbar kontinuierlich zu. Der Abschnitt km 18,441 bis 18,336 wird in die Kategorie mittelschwer sprengbar eingeordnet. Ab km 18,336 wird das Festgebirge schwer sprengbar und die Standfestigkeit verbessert sich. Die Ausbruchfestigkeit begann als sehr druckhaft ... druckhaft und wurde bei km 18,479 sehr gebräch. Vom km 18,441 ist der Gebirgszustand als gebräch zu bezeichnen. Nach dem km 18,356 steigt die Gebirgsfestigkeit auf sehr nachbrüchig an und zeigt gewisse Schwankungen zwischen sehr gebräch bis nachbrüchig (Bild 4.1.1).

4.8.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die Parameter wurden entsprechend der Gebirgs- und Ausbruchverhältnisse, nach den gesteinsdynamischen Bedingungen und unter Beachtung der Sprengerschütterungen im nahen Bestandstunnel bemessen und mit einer erfolgreichen Versuchssprengung getestet. Die abgeleiteten Bohr-, Spreng- und Zündparameter enthält die Tabelle 4.8.2. Mit der Auslegung der Sprengungen, die vor Beginn der Tunnelbauarbeiten nicht vorgesehen waren,

sollte insbesondere erreicht werden, dass die Erschütterungen für den bestehenden Tunnel im Rahmen der zulässigen Anhaltswerte verbleiben.

Dazu wurde ein anderes als bisher übliches Zündschema verwendet (Bild 4.8.4). Im unmittelbaren Einbruchbereich wurden vier ungeladene Großbohrlöcher schichtparallel angeordnet, in deren Mitte sich ein auszuladendes Bohrloch befand. Dieses wurde zuerst gezündet. Die weitere Zündfolge richtete sich nach den Prinzipien der Impulstheorie:

- Bohrlochladungen des unmittelbaren Einbruchbereiches wurden einzeln und möglichst in einer gleichmäßigen Reihenfolge gezündet.
- Die weitere Aufweitung des Abschlages ist progressiv mit gleicher Verzögerung systematisch bis vor die Kranzlöcher erfolgt.
- Das Lösen außerhalb des eigentlichen Einbruches geschah zur Ablenkung der Stoßwelle von den Ulmen bzw. zur Verringerung von Erschütterungen diagonal mit mehreren Bohrlöchern auf einer Reihe.
- Es war unbedingt zu vermeiden, dass winklig zueinander befindliche Bohrlöcher und/oder Reihen in einer Zeitstufe gezündet wurden; es ist nur in einer Reihe oder an einem Bohrloch die gleiche Zeitstufe verwendet worden.
- Die Kranzlöcher wurden wie üblich als letzte gestaffelt gezündet.

Das Zündschema ist mit nichtelektrischer Zündung umgesetzt worden. Der unmittelbare Einbruchbereich wurde als Spiraleinbruch mit progressiver Zündfolge von innen nach außen realisiert. Der Kranzbereich ist in vier Abschnitte eingeteilt worden, die jeweils gemeinsam gezündet worden sind (Bild 4.8.4).

Tabelle 4.8.2: Bohr-, Spreng- und Zündparameter der Versuchssprengung

Parameter	Wert/Dimension	
<i>Geometrische Parameter</i>		
Großbohrlöcher Ø 89 mm	4 Stück	
Kranzlöcher Ø 48 mm	38 Stück, Abstand 0,5 m	
Ortsbrust mit Einbruch Ø 48 mm	52 Stück	
Bohrlochabstände	1,0 - 1,2 m (Bild 4.8.4)	
Bohrlochtiefe (= Abschlagtiefe)	1,7 m	
Ausbruchquerschnitt	56 m ²	
Ausbruchvolumen	95,2 m ³	
Einbruch	Paralleleinbruch	
<i>Sprengtechnische Parameter</i>		
spezifischer Sprengstoffverbrauch	1,05 kg/m ³	
Lademenge Einbruch/Helfer	94,64 kg	= 100,34 kg
Lademenge Kranzlöcher	5,7 kg	
Sprengstoff für den Einbruch und die Helfer (Ortsbrust)	Emulgit LWC-AI je Bohrloch 1,82 kg	
Sprengstoff Kranzlöcher	1,5 m 100 g Sprengschnur je Bohrloch	
Detonationsgeschwindigkeit LWC-AI	3600 m/s	
Sprengstoffdichte (LWC-AI)	1,15 g/cm ³	
<i>Zündtechnische Parameter</i>		
nichtelektrische Zünder Nonel LZZ LP 700 ms; LZZ LP Kranz 1400/600 ms; ZVSL 17 ms	Zündung Bohrlochtiefsten; Reihenfolge eine Spirale, progressiv nach der Impulstheorie (Bild 4.8.4)	

4.8.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Die hier nur wegen ihrer Wirksamkeit vorgestellte Versuchssprengung, die ohne weitere Änderungen den gewünschten Sprengerfolg zeigte, erbrachte die in Tabelle 4.8.3 aufgeführten Ergebnisse der Erschütterungsmessungen. Trotz der unterschiedlichen Messstandorte konnte eine gesicherte Abhängigkeit nachgewiesen werden. Bei gleicher Bohr- und Sprengtechnik ist nicht zu erwarten, dass der bestehende Tunnel mit mehr als 25 mm/s dynamisch belastet wird (Bild 4.8.5). Die Sprengungen während des Vortriebes lagen in einer Entfernung von ≥ 16 m, so dass keine schädigenden Erschütterungen entstehen konnten. Mit der fiktiven Energie-Abstandsbeziehung konnte man die Sprengerschütterungen jedes Abschlages vorausberechnen (Bild 4.8.6). Damit wurde die Zielstellung erreicht. Der Sprengvortrieb wurde genehmigt.

Tabelle 4.8.3: Erschütterungsmessungen Ramholz-Tunnel

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r m	ppv _x mm/s	ppv _y mm/s	ppv _z mm/s	ppv _{max} mm/s	f _x Hz	f _y Hz	f _z Hz	f _{max} Hz
16.04.2007 12:35	R1		1 Berg über Sprengung	Freifeld	50,7	2,092	1,650	1,270	2,092	50,0	66,0	71,0	50,0
16.04.2007 12:35	R1		2 im Tunnel vor Sprengung	Freifeld	22,0		1,841	6,306	6,306		100,0	250,0	250,0
16.04.2007 12:35	R1		3 Berg über Sprengung	Freifeld	51,3	1,439	2,688	1,614	2,688	45,0	52,0	58,0	52,0
16.04.2007 12:35	R1		4 im Tunnel vor Sprengung	Freifeld	25,0	15,838	5,987	5,650	15,838	45,0	71,0	250,0	45,0
16.04.2007 12:35	R1		5 Alter Tunnel "240 m"	Freifeld	23,0	12,730	3,030	7,260	12,730	100,0	100,0	58,8	100,0
16.04.2007 12:35	R1		6 Bergkuppe	Freifeld	59,0	0,890	0,743	2,140	2,140	41,7	83,3	83,3	83,3

4.9 Autobahntunnel Markovec/Slowenien

4.9.1 Sprengbarkeit und Ausbruchfestigkeit

Auf der Grundlage vorangegangener geotechnischer und tunnelbaugeologischer Untersuchungen wurde der Vortrieb ausschließlich mit dem Tunnelbagger bzw. flexiblen, fahrbaren Tunnelbohrer konzipiert. Das war insbesondere auch wegen der ≥ 20 m über der Tunnelfirste vorhandenen Bebauung planfestgestellt. Bei den Vortriebsarbeiten stellte es sich allerdings heraus, dass die Festgesteine in-situ bedeutend schwerer lösbar waren. Aus diesem Grunde sollte durch Versuchssprengungen überprüft werden, inwieweit ein Sprengvortrieb unter den strengen Randbedingungen eines zulässigen Schwinggeschwindigkeitswertes von 7 mm/s bei 20 m Überdeckung wirtschaftlich sowie sprengtechnisch erreicht werden kann.

Vorerst wurde die karbonatische Wechselfolge der tertiären Sedimente einer gesteintechnisch-dynamischen Untersuchung zugeführt, bei der die in Tabelle 4.9.1 zusammengestellten Kennwerte der einzelnen Festgesteine ermittelt worden sind.

Tabelle 4.9.1: Gesteinsphysikalisch-dynamische Kennwerte der tertiären Karbonatgesteine im Bereich des Markovec-Tunnels

Gesteins-physikalisch-dynamischer Kennwert	Dimension	Wechsellagerung karbonatische Gesteine			
		Tonmergelstein	Mergelstein	Kalkmergelstein	Kalkstein
Rohdichte	g/cm ³	2,45-2,52 Ø 2,50	2,53-2,60 Ø 2,56	2,61-2,68 Ø 2,66	≥ 2,69 Ø 2,69
Poisson-Zahl	-	0,27-0,40 Ø 0,331	0,26-0,315 Ø 0,282	0,284-0,297 Ø 0,292	0,27-0,292 Ø 0,2785
P-Wellengeschwindigkeit	m/s	2133-3786 Ø 2906	3906-3954 Ø 3935	3428-5792 Ø 5004	5503-5650 Ø 5572
S-Wellengeschwindigkeit	m/s	880-2107 Ø 1464	2040-2234 Ø 2156	1850-3178 Ø 2712	3059-3140 Ø 3085
dynamischer E-Modul	kN/mm ²	5,24-29,25 Ø 15,56	28,43-32,55 Ø 30,76	23,1-69,41 Ø 53,24	64,09-67,33 Ø 65,43
G-Modul	kN/mm ²	1,91-11,32 Ø 5,90	10,65-12,78 Ø 11,92	8,93-27,04 Ø 20,62	25,11-26,52 Ø 25,59
akustische Impedanz	10 ⁶ kg/(m ² s)	5,3-9,6 Ø 7,3	10,0-10,1 Ø 10,01	9,0-15,5 Ø 13,1	14,8-15,2 Ø 14,975
Festigkeit (F) [Bild 4.1.1]	-	gering bis mittel schallhart	schallhart fest	sehr schallhart sehr fest	sehr schallhart sehr fest

Mit zunehmendem Karbonatanteil verbessern sich die Eigenschaften. Im unmittelbaren Vortriebsbereich waren Tonmergel-, Mergel- und weniger Kalkmergelsteine vorherrschend, so dass diese Festgesteine mit ihrem P- und S-Wellengeschwindigkeiten die Entscheidung für den passenden Sprengstoff festlegten. Die Tendenzen ähneln denen von Burgbernheim (Tabelle 4.5.1).

Die tertiären Schichten sind wenig gestört und weisen ein \pm orthogonales Trennflächengefüge auf (Bild 4.9.2):

○ *K₁ - ac - Trennflächenschar*

Streicht NE - SW und fällt steil nach SE und NW ein; bereichsweise können sich die Flächen dichtkluftzonenartig häufen; Großklüfte mit > 1 m Erstreckung selten; es herrscht eine absetzige Kleinklüftung vor.

○ *K₂ - bc - Trennflächenschar*

Verläuft NW ... WNW - SE ... ESE mit meist steilen bis mittelsteilen Einfallwinkeln nach SW ... SSW; auf den Flächen finden sich häufig Harnischbildungen, die auf Bewegungen hindeuten; diese Bewegungs- oder Scherflächen können fiederartig, absetzig auftreten; Großklüfte selten, das absetzende Kleinkluftgefüge ist vorherrschend.

○ *K₃ - ab - Trennflächenschar oder Schichttrennflächen*

Streicht NW ... WNW - SE ... ESE und fällt flach (0 bis 15°) bis selten mittelsteil (25 ... 30°) nach NE ... NNE ein; diese Trennflächen dominieren im Festgebirge und haben an petrographischen Grenzen eine große Erstreckung sowie Durchtrennung; im Schichtkomplex selbst kann der Durchtrennungsgrad auf 0,6 zurückgehen; oft durchziehen die Gesteine zahlreiche Risse.

Die Riss- und Trennflächenabstände betragen innerhalb der vorwiegend vorhandenen Tonmergel-, Mergel- und Kalkmergelsteine etwa

0,01 ... 0,25 Ø 0,08 m.

Nach Bild 4.1.1 können somit die vorhandenen Festgebirgsverhältnisse überwiegend als

druckhaft (Ausbruchfestigkeit)

und bereichsweise als

sehr gebräch bzw. als

mittelschwer sprengbar

eingestuft werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Einschätzungen ist das Festgebirge eindeutig als Sprengfels zu kennzeichnen. Die vorgefundenen Verhältnisse könnten somit kostengünstiger und umweltfreundlicher mittels angepasster Bohr- und Sprengtechnik gelöst werden.

4.9.2 Bohr-, Spreng- und Zündparameter

Die Sprengversuche beim Vortrieb der beiden Tunnelröhren dienten dazu nachzuweisen, dass unter den gegebenen Bedingungen ein Sprengvortrieb möglich ist. Dieser sollte in den Gebäuden 20 m über der Tunnelfirste maximal eine Schwinggeschwindigkeit von 7 mm/s erzeugen. Vor diesem Hintergrund war es zwingend notwendig, die Sprengungen supersonisch ausulegen. Das Bild 4.9.1 zeigt die beiden Tunnelröhren und die durchgeführten Bereiche, an denen die 6 Sprengversuche unter Praxisbedingungen durchgeführt wurden.

Die Geophone zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeit wurden unter und über Tage im Nahbereich aufgestellt (Bild 4.9.1).

In der Tabelle 4.9.2 sind die bei den Sprengversuchen umgesetzten Bohr-, Spreng- und Zündparameter zusammengestellt.

Zur Abklärung der möglichen Höchstlademenge wurde diese bei den Versuchen variiert. Die angewandten Bohrlochsmata sind in den Bildern 4.9.3.1 und 4.9.3.2 dargestellt.

Die Zündung erfolgte nach dem im Bild 4.9.3.3 dokumentierten Prinzip.

Der Einbruch begann mit einem spiralförmigen Ausbruch. Die umgebenen Hilfslöcher wurden einzeln nach dem Spiralprinzip und sektorenweise gezündet.

Tabelle 4.9.2: Bohr-, Spreng- und Zündparameter der Versuchssprengungen

Parameter	Sprengversuche Variante 1 (Bild 4.9.3.1)	Variante 2 (Bild 4.9.3.2)
<i>Geometrische Parameter</i>		
Bohrlochanzahl Großbohrloch	4	4
Bohrlochdurchmesser (mm) Großbohrloch	≥ 75	≥ 75
Bohrlochanzahl im Einbruch- und Hilfslochbereich	68	61
Bohrlochdurchmesser Einbruch, Hilfslöcher, Kranzlöcher (mm)	45	51/45
Bohrlochanzahl Kranz	38	38
Ausbruchfläche (m ²)	49	49
Bohrlochtiefe/Abschlagtiefe (m)	1 - 1,4	2,25
<i>Sprengtechnische Parameter</i>		
Sprengstoffe	Lambrex 1	Lambrex 1
Lademenge pro Bohrloch (kg) (Einbruch/Hilfslöcher)	0,833 - 1,2495	2,0825
Lademenge je Kranzloch (kg)	0,4165	1,041
Füllungsgrad	0,605 (außer Kranz)	0,47 - 0,605 (außer Kranz)
Detonationsgeschwindigkeit/Sprengstoffdichte	4720 m/s 1,18 g/cm ³	4720 m/s 1,18 g/cm ³
<i>Zündtechnische Parameter</i>		
Zündung	nichtelektrisch spiralförmig progressiv 25/42 ms Verzögerung	nichtelektrisch spiralförmig progressiv 25/42 ms Verzögerung
	8 - 9 Bohrlöcher im Kranz werden gleichzeitig gezündet	8 - 9 Bohrlöcher im Kranz werden gleichzeitig gezündet

4.9.3 Ausgewählte Sprengergebnisse

Das Bild 4.9.1 belegt die Tunnelmeterabschnitte mit den Versuchssprengungen und die Messstandorte der 3-Komponenten-Geophone. In der Tabelle 4.9.3 sind die erfassten Schwinggeschwindigkeitswerte, Frequenzen und die Entfernung Sprengort - Messpunkt zusammengestellt.

Parallel zu unseren Messungen erfasste ein slowenisches Büro für Erschütterungsmessungen an den gleichen Messpunkten die Schwinggeschwindigkeit. Die von den Bearbeitern genutzten Geophone haben eine Masse von etwa 3 kg.

Die vom slowenischen Büro verwendeten Geophone eines kanadischen Messsystems sind etwa 10-fach leichter. Der Vergleich der Messwerte im Bild 4.9.4 zeigt, dass die Werte mit den schwereren, besser gekoppelten Geophonen niedriger als diejenigen mit leichteren Schwingungsaufnehmern sind. Für die Praxis ist daraus zu schlussfolgern, dass Erschütterungsmessungen nur mit Geophonen durchgeführt werden sollten, die mehr als 2,5 kg wiegen bzw. die während des Messvorganges mit einer Masse von mindestens 3 kg beschwert werden müssen. Wird dieser Umstand nicht beachtet, eignen sich die Messwerte nicht für eine Erschütterungsprognose.

Die Erarbeitung der Schwinggeschwindigkeits-fiktiven Energie-Abstandsbeziehung ist auf der Grundlage der Auswertung im Bild 4.9.5 mit der Regressionsanalyse nach Bild 4.9.6 erfolgt. Die statistische Sicherheit von $R^2 = 0,8058$ ($\sim 81\%$) ist zufriedenstellend.

Aus der Erschütterungsprognose und der Beziehung von Bild 4.9.6 ergibt sich, dass beim Heranrücken des Sprengvortriebes in die Bereiche mit 20 m Entfernung zu bestehenden Gebäuden eine Lademenge eines Bohrloches von

maximal 1 kg Lambrex 1

möglich ist. Die Variante 1 (Bild 4.9.3.1) wurde leicht an die Bedingungen angepasst, so dass die Sprengungen mit folgenden Parametern auszulegen sind, damit keine Überschreitung des Anhaltswertes von 7 mm/s möglich ist:

- Abschlagtiefe 1,3 m
- 68 Bohrlöcher im Einbruch- und Hilfslochbereich $\varnothing 48$ mm
- 4 Großbohrlöcher $\varnothing \geq 95$ mm
- 36 Kranzlöcher $\varnothing 48$ mm
- Paralleleinbruch
- Sprengstoff Lambrex 1 $\varnothing 40$ mm
- nichtelektrische Zündung mit spiralförmiger Zündfolge.

Die supersonische Auslegung der Sprengungen erbrachte die erforderlichen Ergebnisse. Damit gelang der Nachweis, dass die Durchführung eines Sprengvortriebes mit Einhaltung der zulässigen Schwinggeschwindigkeitswerte freigegeben werden konnte.

Tabelle 4.9.3: Erschütterungsmessungen Markovec-Tunnel

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
05.04.11 16:59	1 MP1	Überlage, Nordröhre	Freifeld	113,9	2,210	1,250	4,690	4,690	4,690	125,0	125,0	90,9	125,0
05.04.11 16:59	1 MP2	Überlage, Südröhre	Freifeld	125,7	1,390	1,300	4,130	4,130	4,130	100,0	100,0	100,0	111,1
05.04.11 16:59	1 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	40,5	6,949	4,218	2,801	6,949	6,949	62,0	62,0	83,0	100,0
05.04.11 16:59	1 MP5	Untertage, Südröhre, Tm 1515	Freifeld	30,0	8,676	6,689	5,019	8,676	8,676	125,0	166,0	166,0	166,0
05.04.11 16:59	1 MP6	Untertage, Südröhre, Tm 1535	Freifeld	46,1	6,577	3,152	6,458	6,577	6,577	71,0	100,0	100,0	166,0
06.04.11 12:11	2 MP1	Überlage, Nordröhre	Freifeld	114,0	0,760	0,750	0,810	0,810	0,810	111,1	111,1	111,1	125,0
06.04.11 12:11	2 MP2	Überlage, Südröhre	Freifeld	125,8	0,900	0,600	1,580	1,580	1,580	83,3	83,3	111,1	111,1
06.04.11 12:11	2 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	43,5	6,212	4,429	3,060	6,212	6,212	41,0	55,0	55,0	83,0
06.04.11 12:11	2 MP5	Untertage, Südröhre, Tm 1515	Freifeld	32,2	3,952	2,962	4,591	4,591	4,591	125,0	166,0	166,0	500,0
06.04.11 12:11	2 MP6	Untertage, Südröhre, Tm 1535	Freifeld	48,8	2,653		3,608	3,608	3,608	62,0			500,0
06.04.11 17:18	3 MP1	Überlage, Nordröhre	Freifeld	120,1	2,130	1,820	4,960	4,960	4,960	125,0	111,1	111,1	125,0
06.04.11 17:18	3 MP2	Überlage, Südröhre	Freifeld	121,7	1,800	1,190	4,470	4,470	4,470	76,9	125,0	111,1	111,1
06.04.11 17:18	3 MP3	Untertage, Nordröhre, Tm 1530	Freifeld	33,0	3,004	5,910	2,429	5,910	5,910	55,0	71,0	2,0	71,0
06.04.11 17:18	3 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	49,8	3,313		3,313		3,313			71,0	
06.04.11 17:18	3 MP5	Untertage, Südröhre, Tm 1515	Freifeld	25,0	8,837	9,370	14,915	14,915	14,915	83,0	125,0	250,0	250,0
06.04.11 17:18	3 MP6	Untertage, Südröhre, Tm 1535	Freifeld	45,0	6,900	8,200	8,858	8,858	8,858				166,0
07.04.11 11:27	4 MP1	Überlage, Nordröhre	Freifeld	114,1	0,730	0,400	1,570	1,570	1,570	111,1	111,1	66,7	125,0
07.04.11 11:27	4 MP2	Überlage, Südröhre	Freifeld	125,8	0,940	0,570	1,430	1,430	1,430	71,4	71,4	71,4	125,0
07.04.11 11:27	4 MP3	Untertage, Nordröhre, Tm 1530	Freifeld	24,5	4,899	2,667	4,752	4,899	4,899	55,0	55,0	100,0	55,0
07.04.11 11:27	4 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	44,5	4,927	3,734	3,474	4,927	4,927	1,0	62,0	83,0	1,0
07.04.11 11:27	4 MP5	Untertage, Südröhre, Tm 1515	Freifeld	32,9	4,464	3,327	4,871	4,871	4,871	125,0	166,0	166,0	250,0
07.04.11 11:27	4 MP6	Untertage, Südröhre, Tm 1535	Freifeld	49,7	2,730	2,667	2,730	2,667	2,730	100,0	100,0	250,0	100,0
07.04.11 17:07	5 MP1	Überlage, Nordröhre	Freifeld	114,1	0,790	0,450	2,130	2,130	2,130	142,9	125,0	142,9	142,9
07.04.11 17:07	5 MP2	Überlage, Südröhre	Freifeld	125,8	0,65	0,72	1,52	1,52	1,520	71,4	111,1	111,1	111,1
07.04.11 17:07	5 MP3	Untertage, Nordröhre, Tm 1530	Freifeld	25,5	3,657	2,934	4,885	4,885	4,885	62,0	55,0	125,0	125,0
07.04.11 17:07	5 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	45,5	5,159	4,731	2,176	5,159	5,159	71,0	62,0	25,0	71,0
07.04.11 17:07	5 MP5	Untertage, Südröhre, Tm 1515	Freifeld	33,7	4,092	3,594	5,692	5,692	5,692	166,0	166,0	500,0	500,0
07.04.11 17:07	5 MP6	Untertage, Südröhre, Tm 1535	Freifeld	50,6	2,744	2,380	2,744	2,380	2,744	125,0	250,0	250,0	125,0
07.04.11 19:50	6 MP1	Überlage, Nordröhre	Freifeld	120,5	1,540	1,210	3,110	3,110	3,110	125,0	100,0	100,0	125,0
07.04.11 19:50	6 MP2	Überlage, Südröhre	Freifeld	122,0	1,330	1,480	3,860	3,860	3,860	50,0	111,1	125,0	125,0
07.04.11 19:50	6 MP3	Untertage, Nordröhre, Tm 1530	Freifeld	36,9	3,215	2,288	3,552	3,552	3,552	71,0	62,0	166,0	166,0
07.04.11 19:50	6 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	54,4	2,787		2,787		2,787			71,0	
07.04.11 19:50	6 MP5	Untertage, Südröhre, Tm 1515	Freifeld	30,0	6,956	9,897	11,160	11,160	11,160	83,0	100,0	250,0	250,0
07.04.11 19:50	6 MP6	Untertage, Südröhre, Tm 1535	Freifeld	50,0	4,583	9,532	8,493	9,532	9,532	100,0	71,0	250,0	71,0

Fortsetzung Tabelle 4.9.3: Erschütterungsmessungen Markovec-Tunnel

Datum	Sprengung	MP	Messort	Bewertung	r	ppv _x	ppv _y	ppv _z	ppv _{max}	f _x	f _y	f _z	f _{max}
					m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz	Hz
05.04.11 13:00	7 MP1	Über Tage, Nordröhre	Freifeld	120,0	3,420	3,450	7,080	7,080	7,080	100,0	125,0	100,0	111,1
05.04.11 13:00	7 MP2	Über Tage, Südröhre	Freifeld	121,7	2,640	2,720	7,860	7,860	7,860	71,4	71,4	71,4	100,0
05.04.11 13:00	7 MP3	Untertage, Nordröhre, Tm 1530	Freifeld	31,2	5,763	7,791	6,072	7,791	7,791	62,0	62,0	71,0	71,0
05.04.11 13:00	7 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	47,6	5,264	5,082	3,685	5,264	5,264	3,0	3,0	83,0	83,0
06.04.11 15:20	8 MP1	Über Tage, Nordröhre	Freifeld	113,3	1,320	0,730	2,190	2,190	2,190	125,0	125,0	71,4	125,0
06.04.11 15:20	8 MP2	Über Tage, Südröhre	Freifeld	125,5	0,970	0,690	2,070	2,070	2,070	111,1	111,1	125,0	100,0
06.04.11 15:20	8 MP4	Untertage, Nordröhre, Tm 1550	Freifeld	25,9	4,970	4,682	3,355	4,970	4,970	3,0	3,0	71,0	100,0
06.04.11 15:20	8 MP3	Untertage, Nordröhre, Tm 1530	Freifeld	44,9	3,481	5,089	6,844	6,844	6,844	83,0	62,0	83,0	100,0

5 Nachweis der sonischen Wirkung in der Sprengtechnik

5.1 Der Zusammenhang von Zertrümmerung des Sprengmediums und den ausgelösten Erschütterungen

Im Kapitel 3.2 wurden bereits die ersten Ansätze des Zusammenhanges von Zertrümmerungs- und Erschütterungswirkung einer Sprengung aufgezeigt, die das wichtige Grundprinzip des sonischen Effektes darstellen. Aus diesem Grunde ist es notwendig, in das Sprengmodell die sonische Wirkung einzubeziehen. Der Einfluss der jeweiligen Wellengeschwindigkeiten wird über den Winkel der Machfront (2) im Modell verifiziert. Der Winkel für die jeweiligen Machfronten berechnet sich wie folgt:

$$\sin \alpha_P = \frac{c_P}{c_d} \quad \begin{array}{l} \text{(Machfront mit der} \\ \text{P-Wellengeschwindigkeit)} \end{array} \quad (7)$$

$$\sin \alpha_S = \frac{c_S}{c_d} \quad \begin{array}{l} \text{(Machfront mit der} \\ \text{S-Wellengeschwindigkeit)} \end{array} \quad (8)$$

Für den wirksamen, fiktiven Detonationsdruck ergibt sich abgeleitet aus den Sprengergebnissen und den beobachteten Vorgängen nachstehende Änderung der Beziehung (5):

$$P_{Z0} = \frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) V_{S0} \cdot \lambda_s}{w' \cdot a_{B'} \cdot l_{B0}} = \frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) V_{S0} \cdot a'_{B'}}{w' \cdot a_{B'} \cdot l_{B0} \cdot w'} =$$

$$P_{Z0} = \frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) V_{S0}}{w'^2 \cdot l_{B0}} \quad (9)$$

$$\Downarrow \cdot \frac{1}{(\sin \alpha_P \cdot \sin \alpha_S)^P}$$

$$P_{Z0\alpha} = \frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) V_{S0}}{w'^2 \cdot l_{B0} \cdot (\sin \alpha_P \cdot \sin \alpha_S)^P} \quad (10)$$

Die Druckentwicklung steigt an, wenn die Winkel α der einzelnen Machfronten von P- S- Wellengeschwindigkeiten kleiner bzw. die Machzahlen größer werden.

Der Exponent P des Produktes $(\sin \alpha_P \cdot \sin \alpha_S)$ wird empirisch wie folgt beziffert:

- ✓ P = 1 für Sprengungen mit Einzelladungszündung
- ✓ P = 1,5 für die Bohrlochladungen der 1. Reihe, hintersten Reihe sowie dem randlichen Bereich bei Sprenganlagen mit der simultanen Zündung nach der Impulstheorie
- ✓ P = 2 für die Bohrlochladungen die zwischen zwei anderen simultan nach der Impulstheorie gezündet werden (≥ 3 Reihensprengungen)

Auf diese Weise wird man den Sprengergebnissen gerecht, die bei simultaner Zündung nach der Impulstheorie eine sichtbare Verbesserung der Haufwerksstückigkeit bewirken.

Das Bild 5.1 vermittelt am Beispiel der 3. Sprengung im Tagebau Habermühle wie der Exponent P entsprechend der Zündfolge bestimmt wird. Der nach der Beziehung (10) zu berechnende fiktive, wirksame Detonationsdruck sollte mit der aufwendig ermittelten Korngrößenzusammensetzung statistisch verglichen werden, damit die praktischen Auswirkungen die diese Größe verursacht, nachgewiesen werden können. Die Bilder 5.2 bis 5.4 belegen, dass mit steigendem $P_{Z0\alpha}$ die Korngrößenzusammensetzung des Haufwerkes deutlich verbessert wird und mit den aufgezeigten Zusammenhängen weiter verstärkt werden könnte.

Die Auswirkungen der Zündfolge auf die Größe des fiktiven, wirksamen Detonationsdruckes $P_{Z0\alpha}$ sind im Bild 5.5 dargestellt. Bei gleicher Lademenge und Sprengstoffart kann allein und kostenneutral durch die Veränderung der Zündfolge von der Einzellochzündung zur Impulszündung mit simultan initiierten Ladungen der Detonationsdruck durch Verkürzung der gezündeten Vorgabe erhöht werden. Diese Erhöhung reicht aus, um die Stückigkeit des Haufwerkes zu verbessern (Bild 5.5).

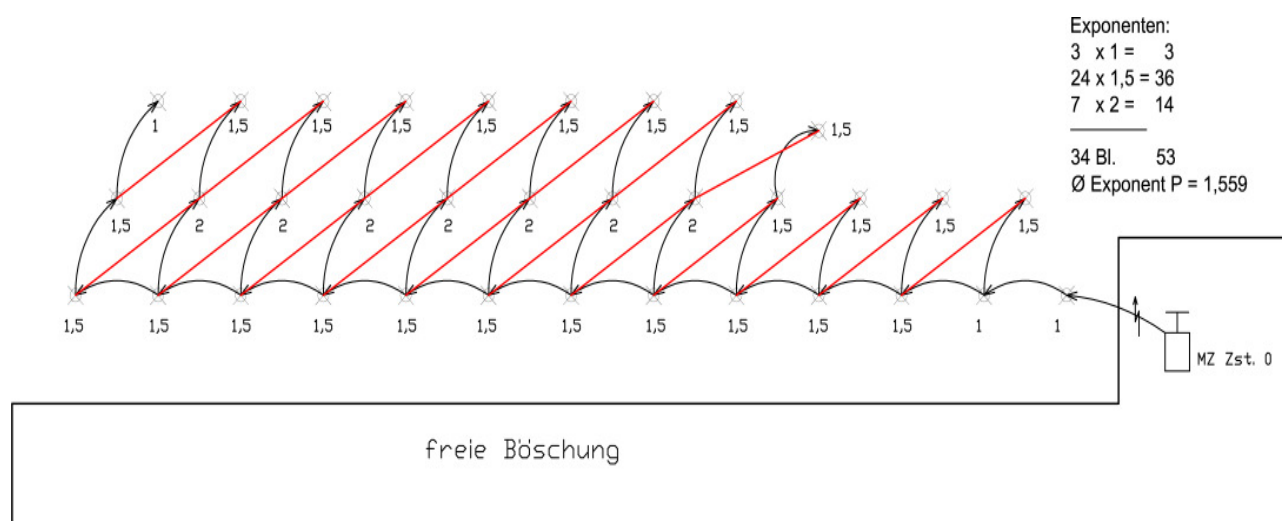


Bild 5.1: Beispielhafte Ermittlung des Exponenten P (vergleiche Beziehung (10)) für die Berechnung des fiktiven Detonationsdruckes (B3 Tagebau Habermühle)

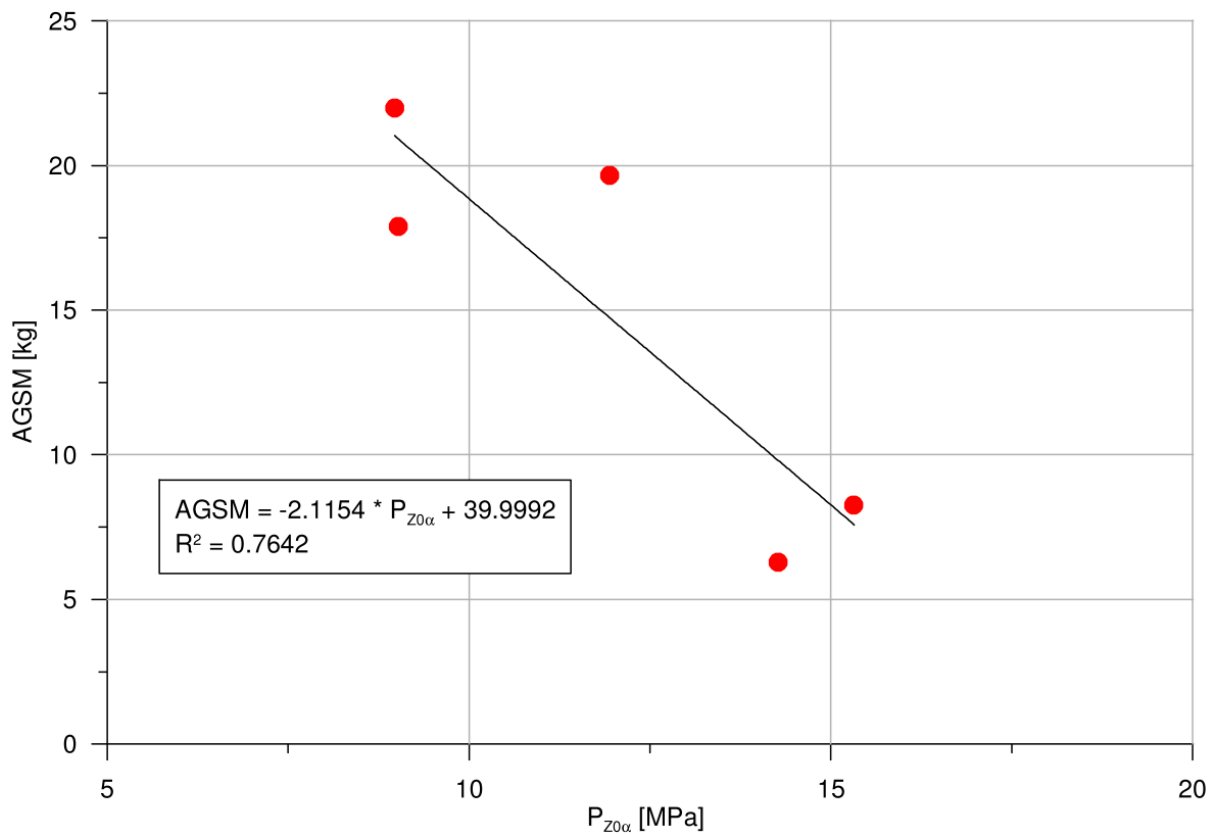


Bild 5.2: Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerksmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Tagebau Görzdorf

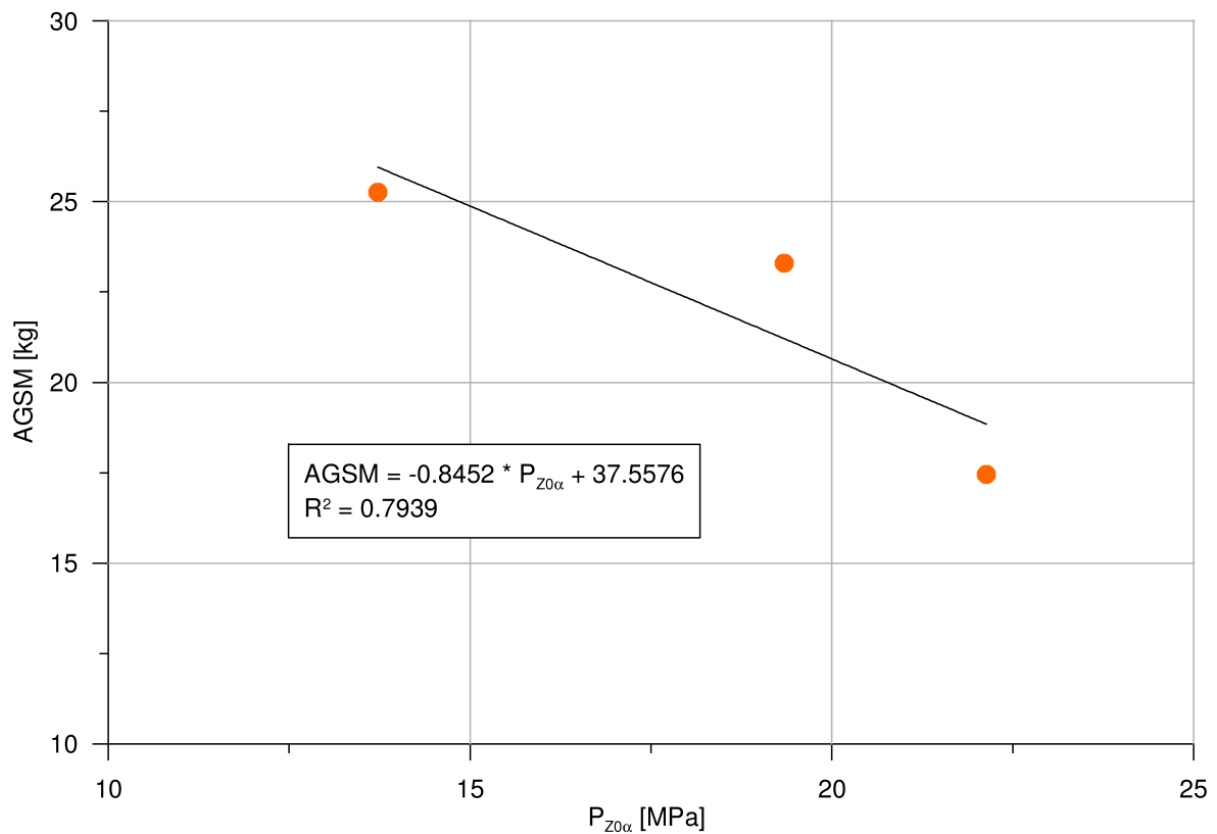


Bild 5.3: Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Tagebau Nieder-Beerbach

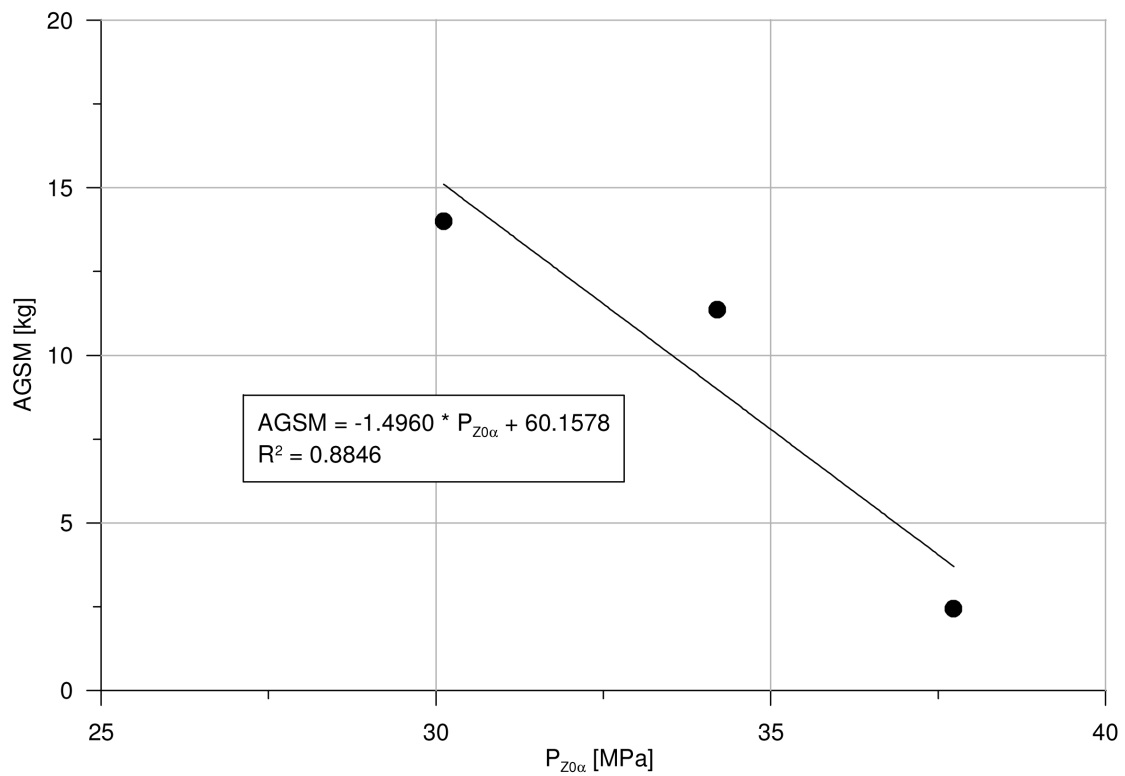


Bild 5.4: Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Tagebau Habermühle/Burgbernhem

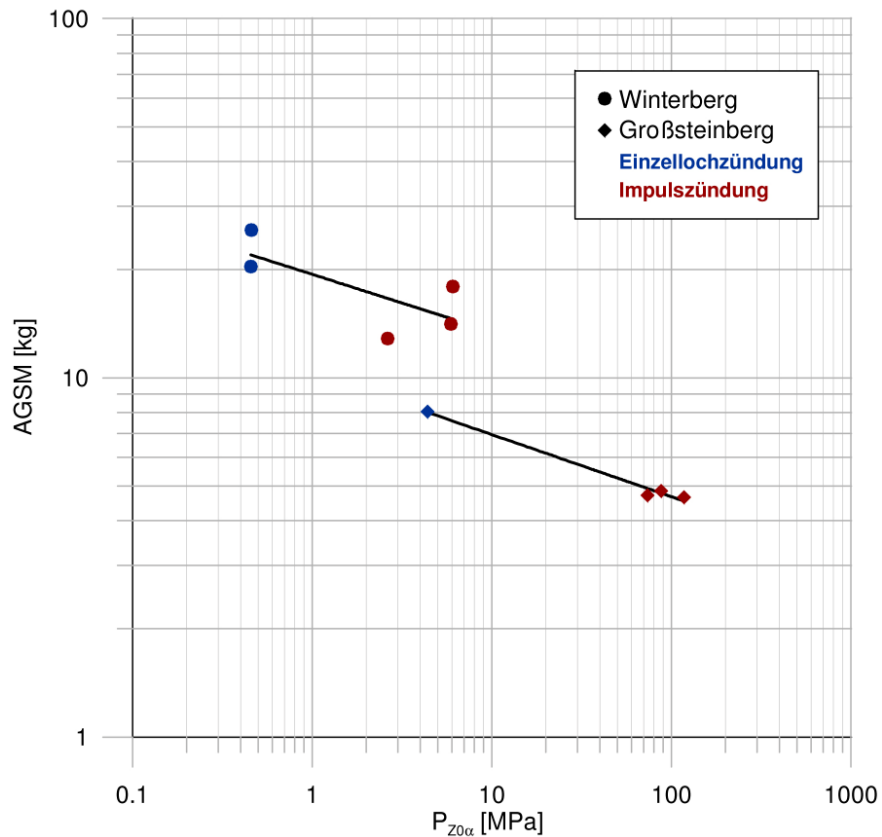


Bild 5.5: Abhängigkeit der durchschnittlichen Haufwerkskornmasse (AGSM) vom fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ im Vergleich zwischen Sprengungen mit Einzellochzündung und solchen mit Impulszündung (Tagebau Winterberg und Großsteinberg)

Die gleiche Aussage kann aus der Darstellung im Bild 5.6 abgeleitet werden, in welchem die Kluftkörpergrößenverteilung des Festgebirges im Vergleich mit den Haufwerkszusammensetzungen von Sprengungen mit Einzelloch- und „Impulszündung“ im ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET - (RRSB) Diagramm dokumentiert sind.

Mit dem im RRSB-Diagramm kann die fiktive Zertrümmerungswirkung abgeleitet und sichtbar gemacht werden (Bild 5.7).

Die colorierte Fläche im Bild 5.7 zwischen der Korngrößenverteilung des Festgebirges und des gesprengten Haufwerkes ist das indirekte Maß für die Zerkleinerungswirkung der Korngrößen ≥ 100 mm Korndurchmesser am Beispiel der 5. Sprengung im Tagebau Nieder-Beerbach. Dieser Festgebirgsabschnitt war gegenüber den anderen sehr schwer sprengbar, d. h. die Kluftabstände sind geringer als im übrigen Teil des Tagebaues. Die Bilder 5.8.1 bis 5.8.7 gestatten einen objektiven Einblick in die erreichten Verbesserungen oder Veränderungen der Haufwerksstückigkeit. Die fiktive Zertrümmerungswirkung ist bei einem einheitlichen Maßstab direkt aus den Bildern 5.8... ablesbar. Die Bewertung der fiktiven Zertrümmerungswirkung kann für die Optimierung der Sprengergebnisse in den einzelnen Tagebauen herangezogen werden (Bild 5.9).

Die belegbaren Zusammenhänge weisen statistisch gesichert nach, dass die Größe des fiktiven, wirksamen Detonationsdruckes geeignet ist, die Zertrümmerung bzw. Stückigkeit des Haufwerkes deutlich zu beeinflussen und zu steuern.

Der im Bild 5.10 ausgewiesene Zusammenhang zwischen der zertrümmernden Wirkung von Sprengungen und dem durchschnittlichen Trennflächenkörper des Festgebirges ist einerseits ein Beleg des großen Einflusses vom Trennflächengefüge auf das Sprengergebnis und andererseits ein erneuter Nachweis der besseren Umsetzung des sonischen Effektes im weniger geklüfteten Sprengmedium. Im extrem schwer sprengbaren Gabbro des Tagebaues Nieder-Beerbach ist die höchste Zertrümmerung festzustellen (Bild 5.7). Die stark klüftige Meta-Grauwacke von Oßling zeigt die geringsten Zertrümmerungseffekte (Bild 5.8.3 und Bild 5.10).

Der Einfluss der Sonizität, d. h. die Größe der Machzahlen vom Verhältnis der Detonationsgeschwindigkeit zur P- und S-Wellengeschwindigkeit der Festgesteine, auf die Erschütterungen ist schon mehrfach durch Messergebnisse belegt worden [MA 12, MÜ 09a, MÜ 11b, MÜ 11c, MÜ 13]. Inzwischen sind zu den aus den vier näher untersuchten Tagebauen 23 Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen in verschiedenen Festgebirgen erarbeitet worden, die analytisch nach folgenden Fragestellungen untersucht und sortiert worden sind:

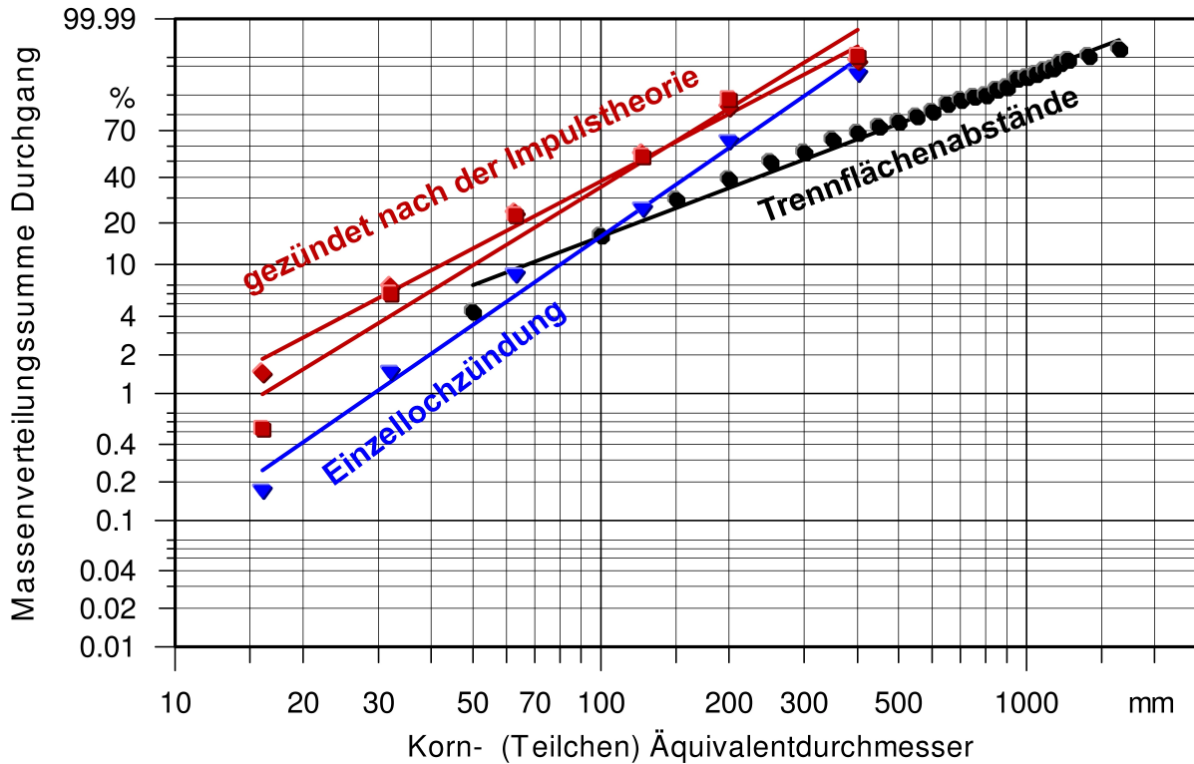


Bild 5.6: Vergleich der Korngrößenverteilung Festgebirge - Haufwerk von Sprengungen mit Einzelllochzündung und Zündung nach der Impulstheorie im ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNET-Diagramm

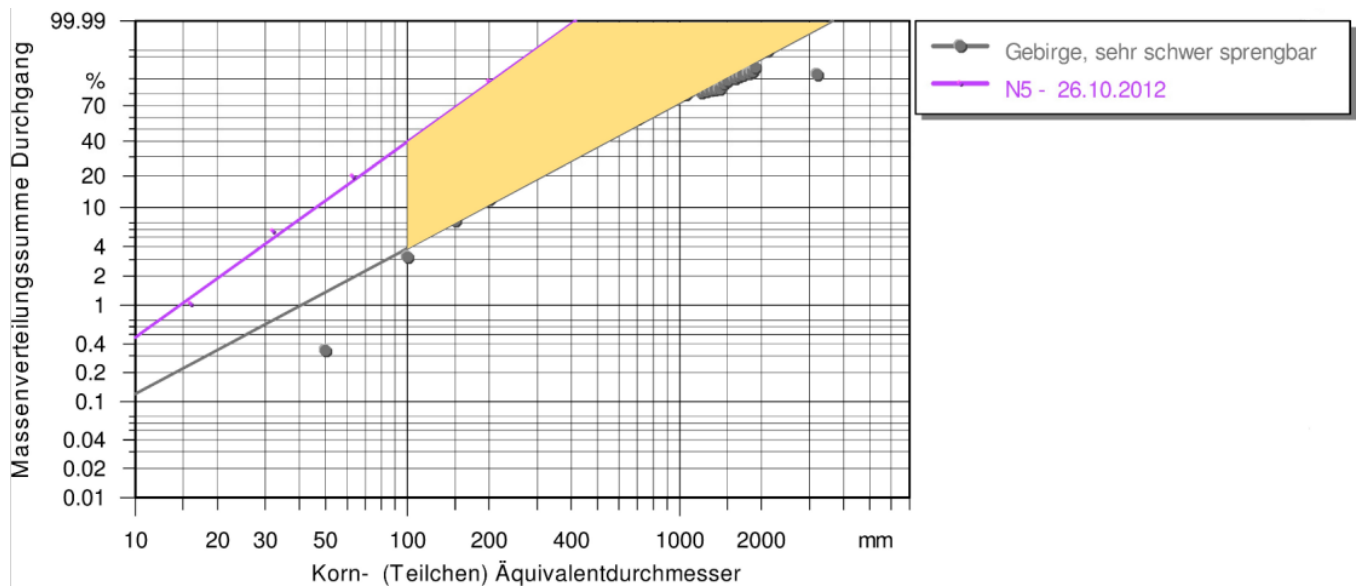


Bild 5.7: Die colorierte Fläche zwischen Korngrößenverteilung des Festgebirges und des gesprengten Haufwerkes ist ein gewähltes, indirektes Maß für die Zerkleinerungswirkung einer Sprengung = fiktive Zertrümmerungswirkung am Beispiel der 5. Sprengung Nieder-Beerbach

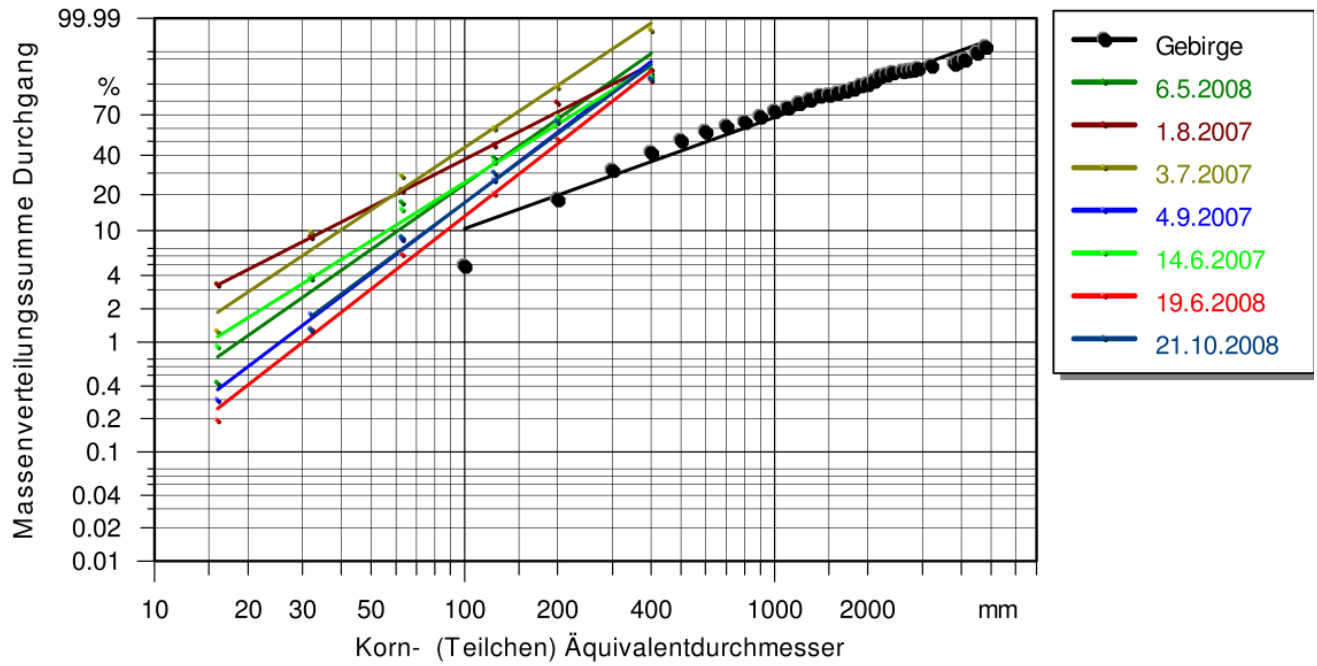


Bild 5.8.1: Tagebau Elbingerode - Kalkstein

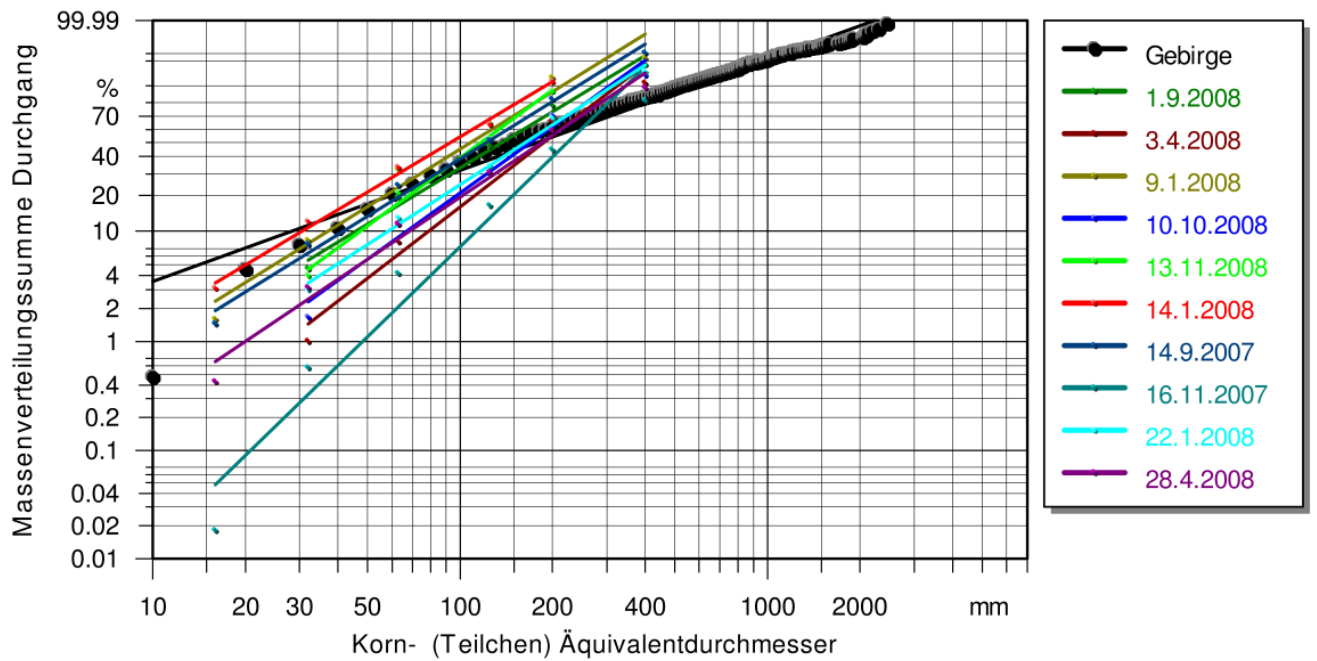


Bild 5.8.2: Tagebau Koschenberg - Meta - Grauwacke

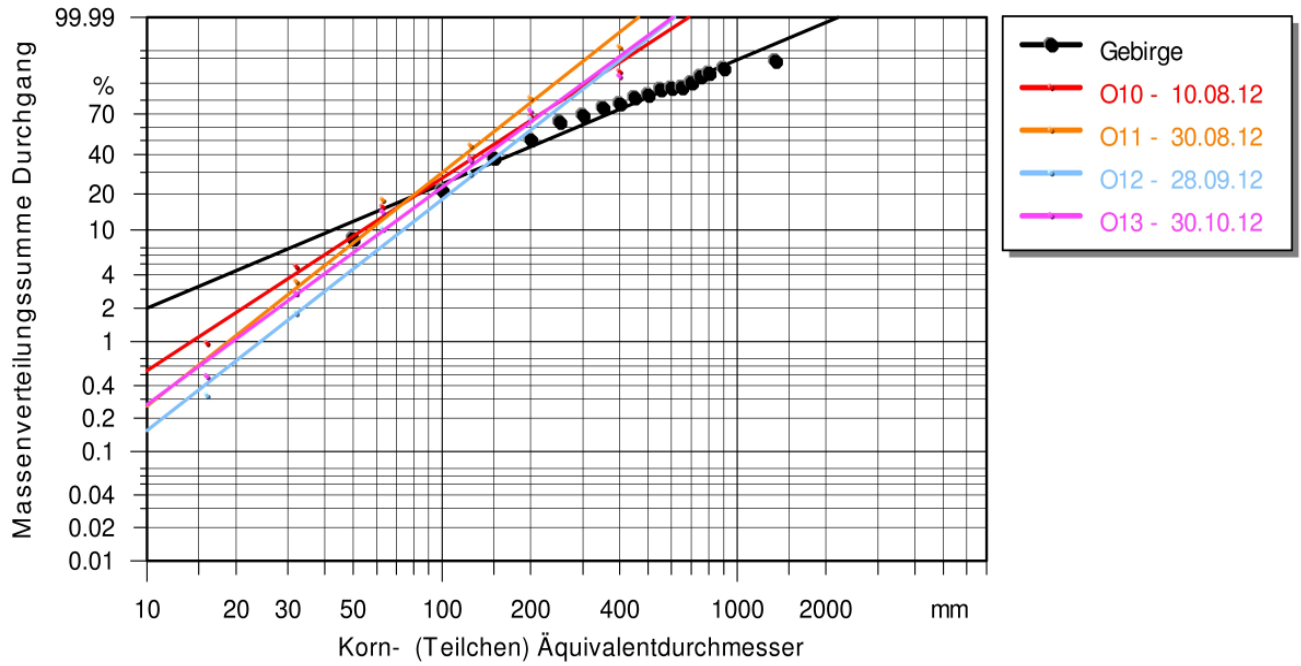


Bild 5.8.3: Tagebau Oßling - Meta - Grauwacke

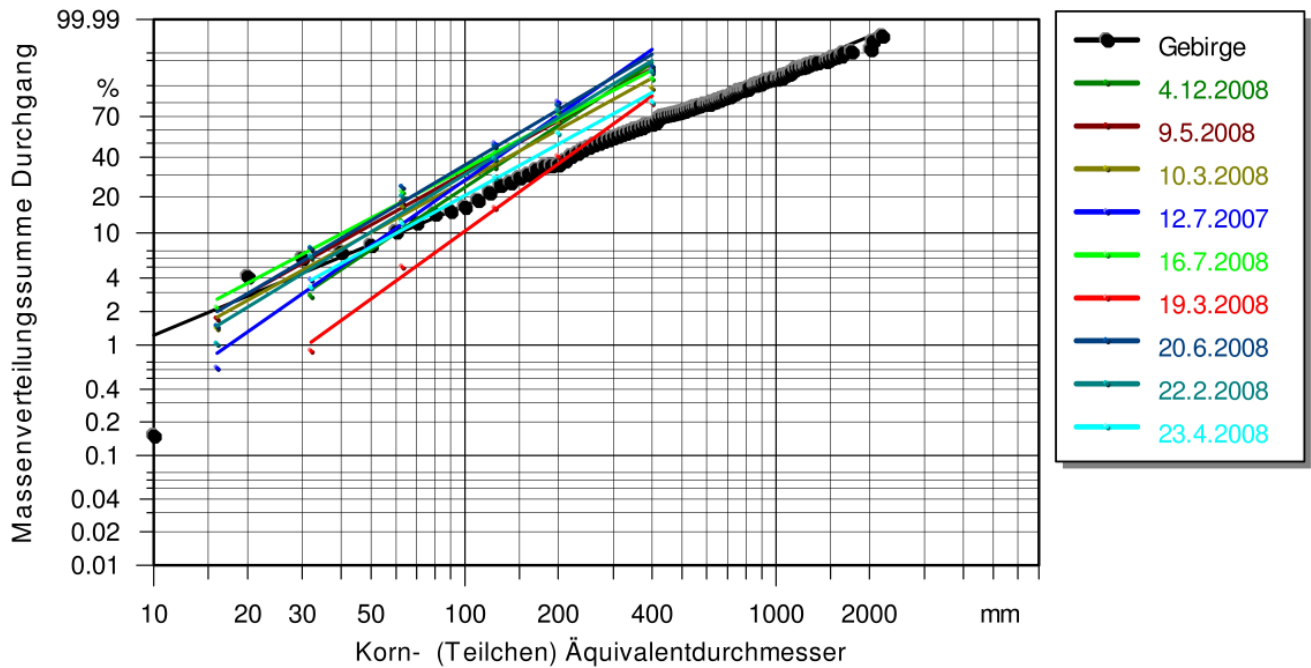


Bild 5.8.4: Tagebau Lüptitz - Rhyolith

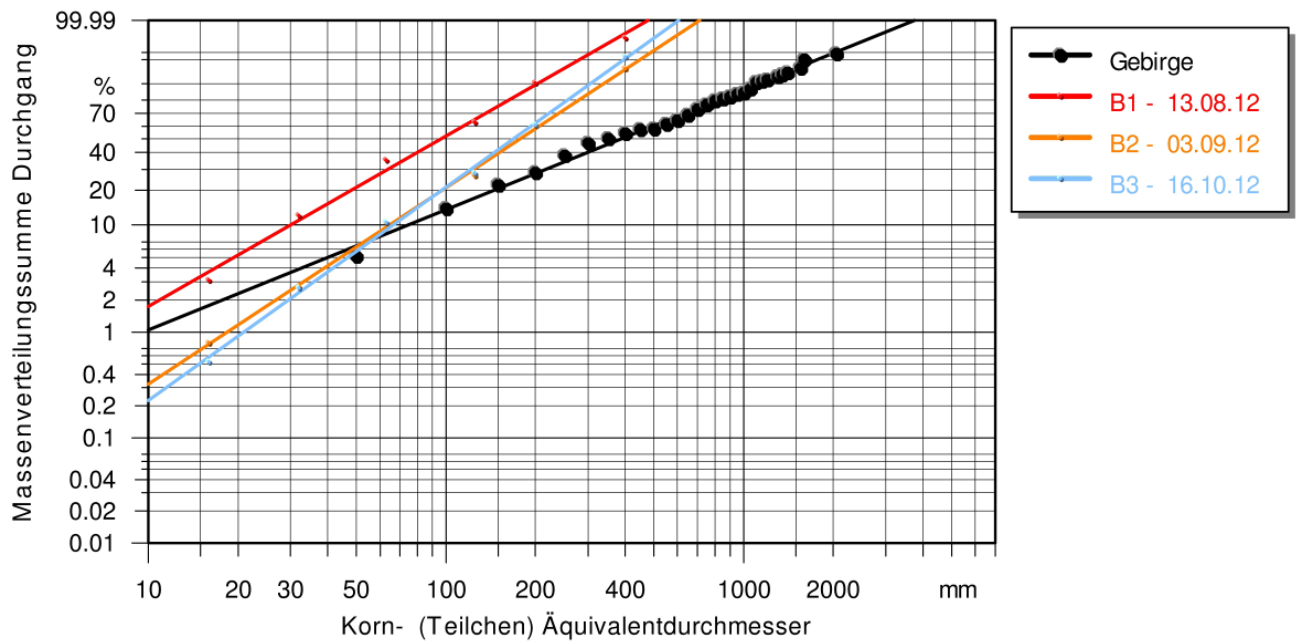


Bild 5.8.5: Tagebau Habermühle/Burgbernhem - Kalkmergelstein

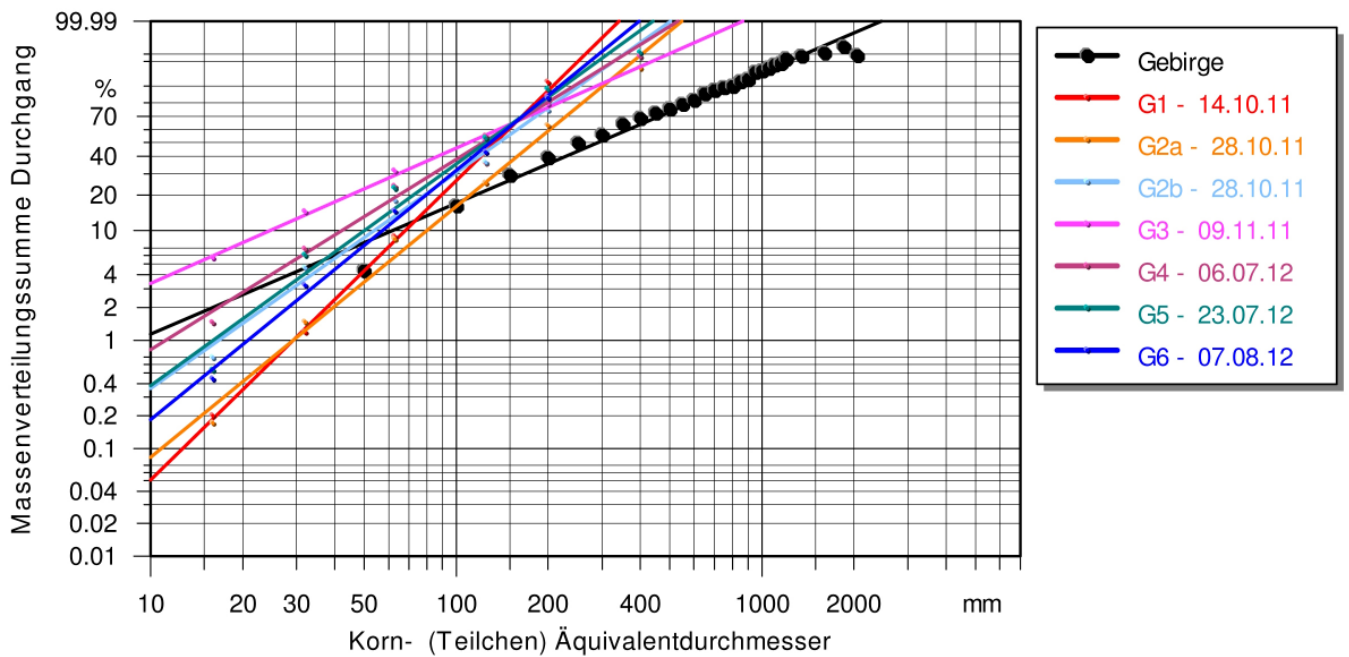


Bild 5.8.6: Tagebau Großsteinberg - Rhyolith

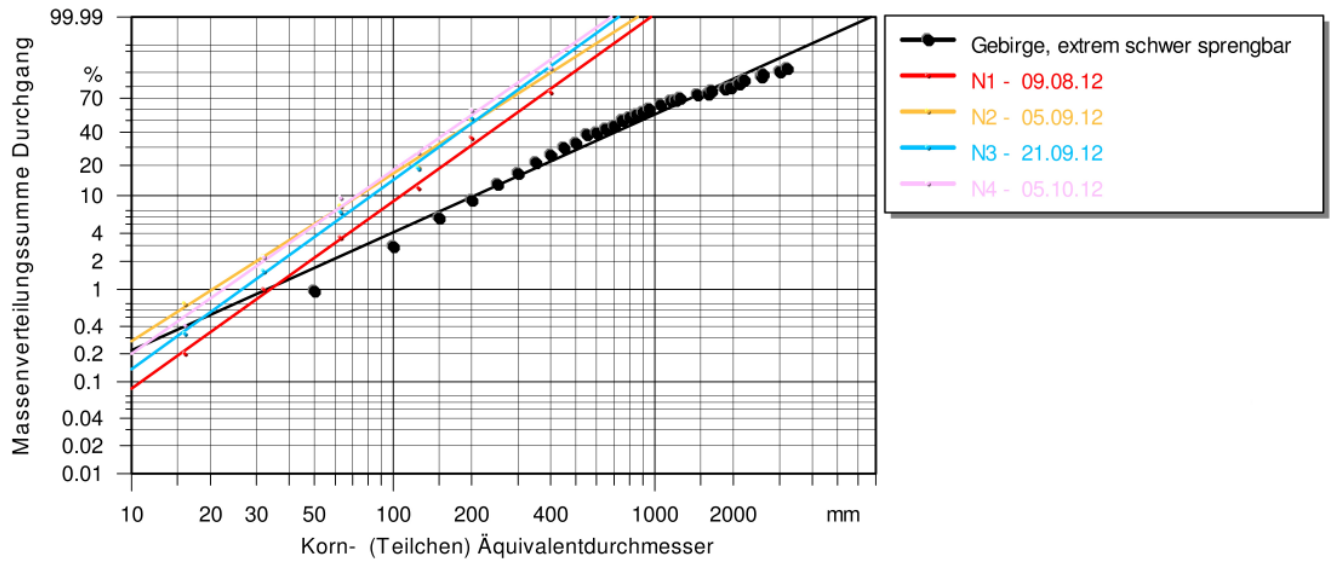


Bild 5.8.7: Tagebau Nieder-Beerbach - Gabbro, extrem schwer sprengbar

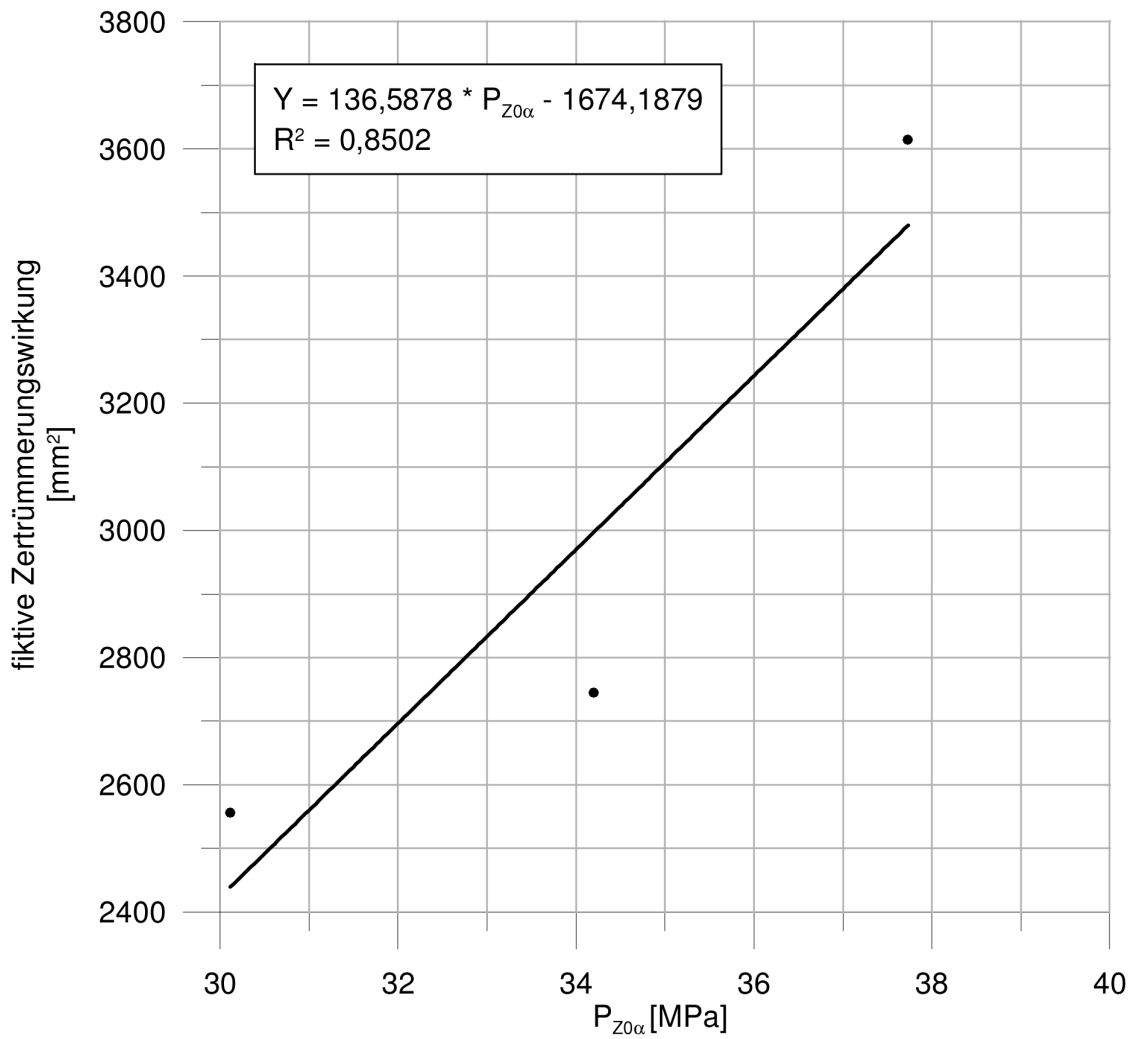


Bild 5.9: Beziehung zwischen der fiktiven Zertrümmerungswirkung und dem fiktiven, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ für die Sprengungen im Tagebau Habermühle/Burgbernhain

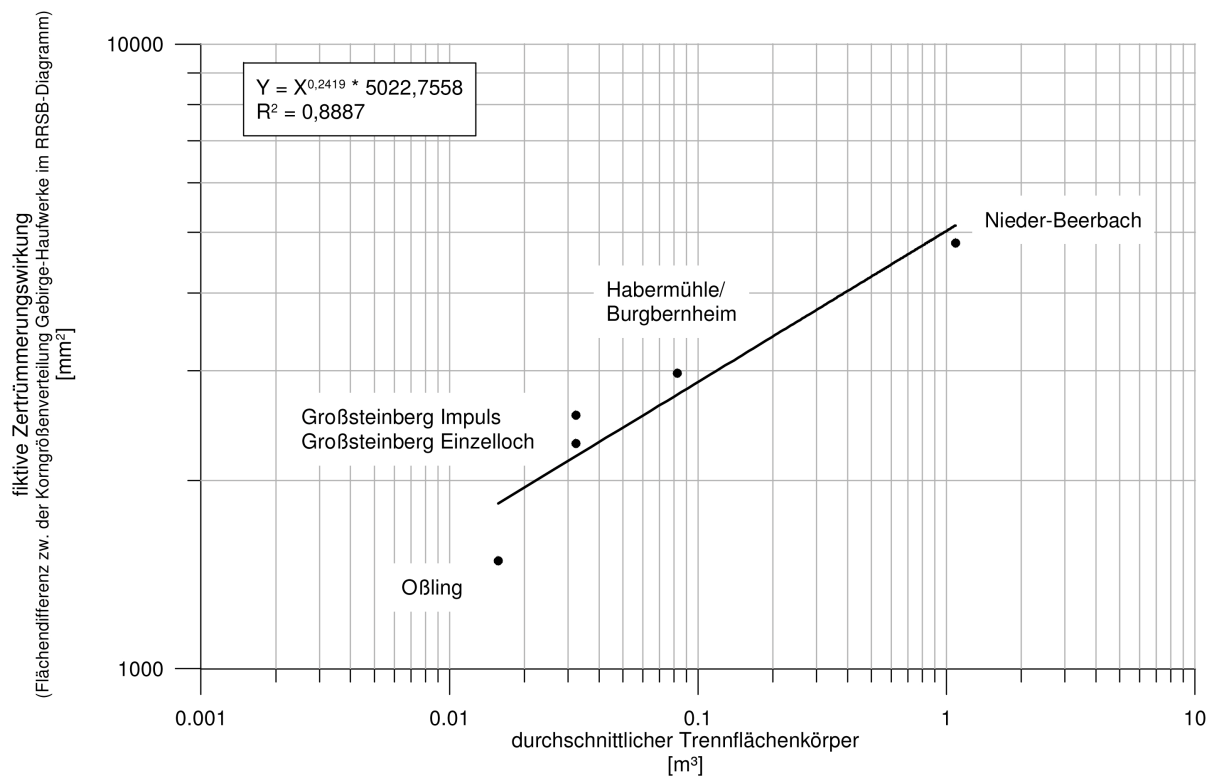


Bild 5.10: Zusammenhang der Größe der fiktiven Zertrümmerungswirkung mit dem durchschnittlichen Trennflächenkörper als Festgebirgskennwert

- Welches Sprengziel wurde angestrebt 1-D, 2-D- oder 3-D-Sprengung (vergleiche Bild 5.11)?
- Welche Trennflächenkörperzusammensetzung des Festgebirges ist im Bereich der Sprengungen vorhanden?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Erschütterung zur erreichten Zertrümmerung des Haufwerkes?
- Wie groß ist die ausgelöste Sonizität der Sprenganlagen?
- Welche vorhandenen deutlichen Anisotropien des Festgebirges müssen beachtet werden?

Es wird vorgeschlagen, die vielfältigen Sprengziele im Festgebirge auf die in Tabelle 5.1 definierten Sprenganlagen zu reduzieren (vergleiche Bild 5.11), weil sich diese Sprengungen in bestimmten Grundsätzen deutlich unterscheiden und dem neuen Sprengmodell zugeordnet werden können.

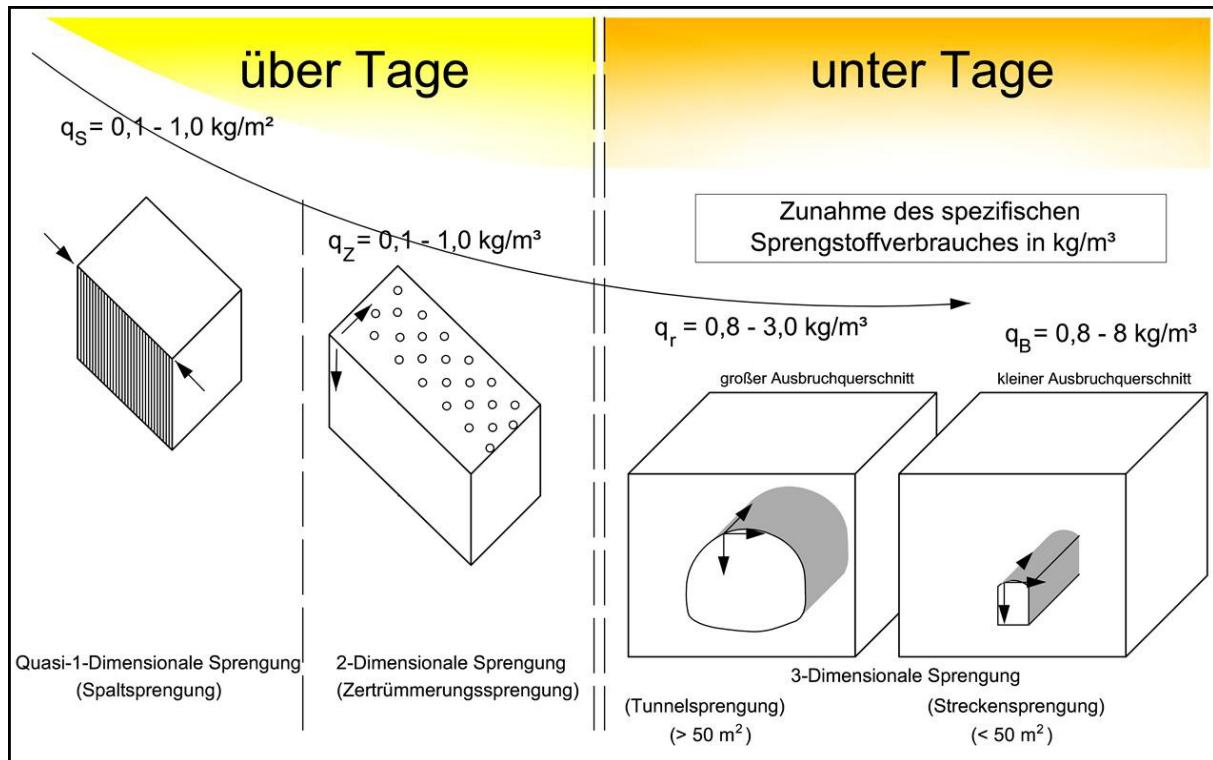


Bild 5.11: Die verallgemeinerte Darstellung der verschiedenen 1-D-, 2-D- und 3-D-Sprengungen und deren Bezug zum spezifischen Sprengstoffverbrauch über und unter Tage [MÜ 11b]

Tabelle 5.1: Vorschlag zur Einteilung der Sprengungen im Festgebirge nach dem Sprengziel (vergleiche Bild 5.11)

Benennung der Sprengungen	Definition der Sprengungen	Streubereich des spezifischen Sprengstoffverbrauches
SPALTSPRENGUNGEN	Quasi-1-Dimensionale Sprengungen über Tage und Konturensprengungen unter Tage mit flächenhaft spaltender Wirkung	$q_s = 0,1 - 1,0 \text{ kg/m}^2$
ZERTRÜMMERUNGSSPRENGUNGEN	Quasi-2-Dimensionale Sprengungen über Tage mit räumlich zertrümmernder/zerkleinernder Wirkung	$q_z = 0,1 - 1,0 \text{ kg/m}^3$
TUNNELSPRENGUNGEN	3-Dimensionale Sprengungen unter Tage mit einem Ausbruchquerschnitt $\geq 50 \text{ m}^2$ und räumlich zertrümmernder Wirkung	$q_r = 0,8 - 3,0 \text{ kg/m}^3$
STRECKENSPRENGUNGEN	3-Dimensionale Sprengungen unter Tage mit einem Ausbruchquerschnitt $\leq 50 \text{ m}^2$ und räumlich zertrümmernder Wirkung	$q_B = 0,8 - 8,0 \text{ kg/m}^3$

Entsprechend dieser Einteilung der Sprengungen nach dem allgemeinen Sprengziel werden die einzelnen, untersuchten Anlagen bewertet und die allgemeinen, anwendungsfähigen Grundsätze für die Dimensionierung zugeordnet [MÜ 11c].

Im Bild 5.12 wurden die erarbeiteten Regressionsgleichungen der Schwinggeschwindigkeits-fiktiver Impuls-Abstandsbeziehungen von Spaltsprengungen gegenübergestellt. Die Sprengungen von Flöha im Rhyolith-Tuff sind deutlich supersonisch und liegen im Diagramm auf der rechten Seite mit geringeren Erschütterungen als die Sprengungen im Granodiorit. Die Erschütterungsimmissionen von den Sprengungen mit Nitropenta (Sprengschnur) heben sich durch geringere Messwerte von denen mit gelatinösem Sprengstoff ab.

Die sonische Wirkung wird mit den Spaltsprengungen eindeutig nachgewiesen.

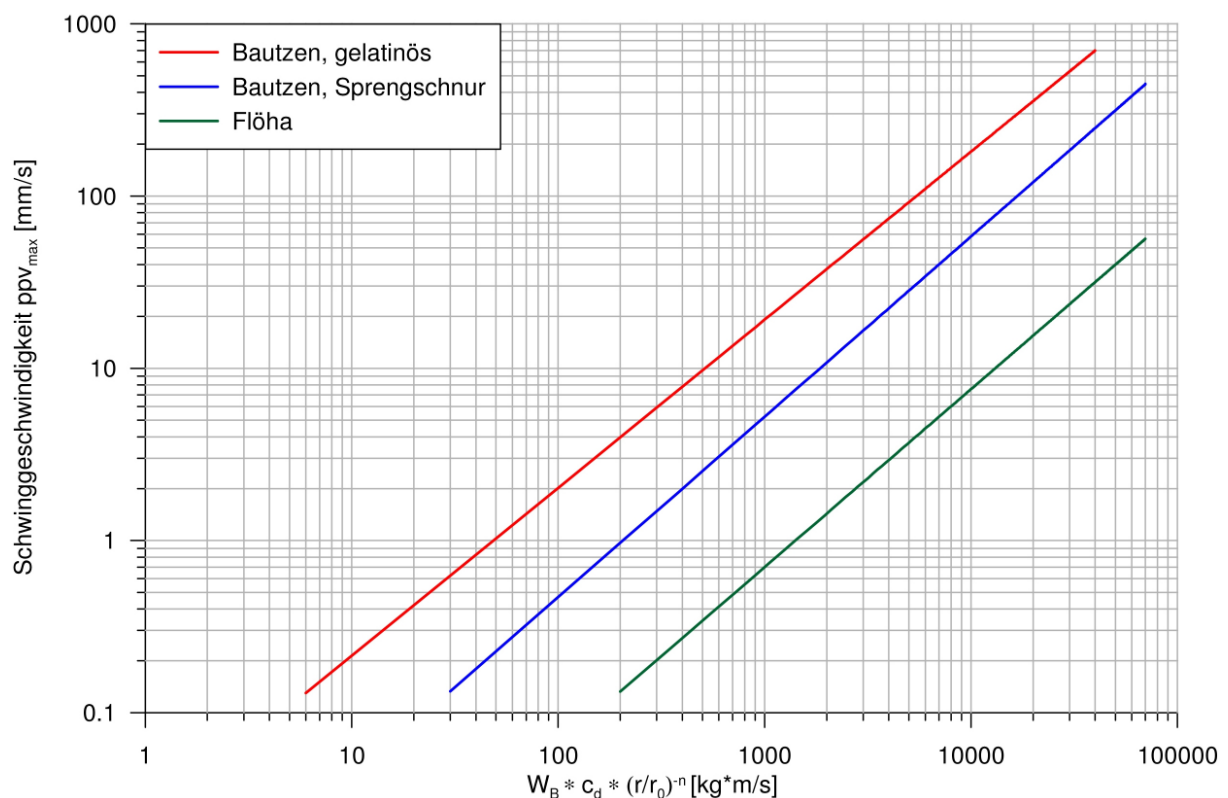


Bild 5.12: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Impuls-Abstandsbeziehungen von Spaltsprengungen mit deutlich unterschiedlichen Ergebnissen durch die sonische Wirkung

Das Bild 5.13 vermittelt die zusammenfassende Dokumentation der Regressionsgeraden der Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung aus den Versuchsbetrieben. Die Verteilung der Geraden kann nicht mit der Größe der sonischen Wirkung erklärt werden. Vergleicht man die Ergebnisse von Bild 5.10 mit der Lage der Geraden fällt auf, dass die Regressionsgerade der geringsten Erschütterungsimmissionen mit der größten fiktiven Zertrümmerungswirkung im Tagebau Nieder-Beerbach zusammenfällt. Die anderen Geraden reihen sich in die Folge vom Bild 5.10 ein.

Daraus darf abgeleitet werden, dass die Klüftigkeit des Festgebirges einen erheblichen Einfluss auf die Umsetzung der sonischen Wirkung hat. Festgebirge mit sehr geringer Trennflächenhäufigkeit weisen bei Sprengwirkungen eine höhere Zertrümmerung und niedrigere Erschütterungen auf, als solche mit großer Häufigkeit.

Die Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in verschiedenen Tagebauen zeigt das Bild 5.14. Die genaue Bewertung der Lage der Regressionsgeraden bestätigt, dass sowohl die Klüftigkeit des Festgebirges als auch der sonische Effekt für die Position der Beziehung ausschlaggebend ist. Die Darstellung im Bild 5.15 diente der Bewertung, inwieweit sich die Regressionsbeziehungen innerhalb eines vergleichbaren Festgebirges verhalten. Die Prognosebeziehungen liegen eng beieinander und unterscheiden sich nur durch wechselnde Hauptabschlagsrichtungen zum Bebauungsgebiet. Auf diese Weise kann vermutet werden, dass ein Einfluss der Schwinggeschwindigkeit bzw. Erschütterungen durch die Anisotropieverhältnisse hinsichtlich Trennflächengefüge und Abstrahlrichtung vorhanden sein muss. Die Erschütterungen in senkrechter Richtung zum Abschlag sind größer als die seitlich abgestrahlten dynamischen Einwirkungen. Die Aufstellungsorte der Messgeräte müssen für die objektive Beurteilung der Immissionen sorgfältig ausgewählt werden. Letztlich belegt das Bild 5.16 die Gültigkeit der Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Erschütterungsprognosen für unter Tage Sprengungen. Ähnlich wie bei Spaltsprengungen wirken sich die sonischen Effekte deutlich aus. Die Einflüsse des Trennflächengefüges und der Mikrorisse hinterlassen ebenfalls eine schwächende Wirkung, so dass die Sprengungen unter Tage den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie über Tage folgen.

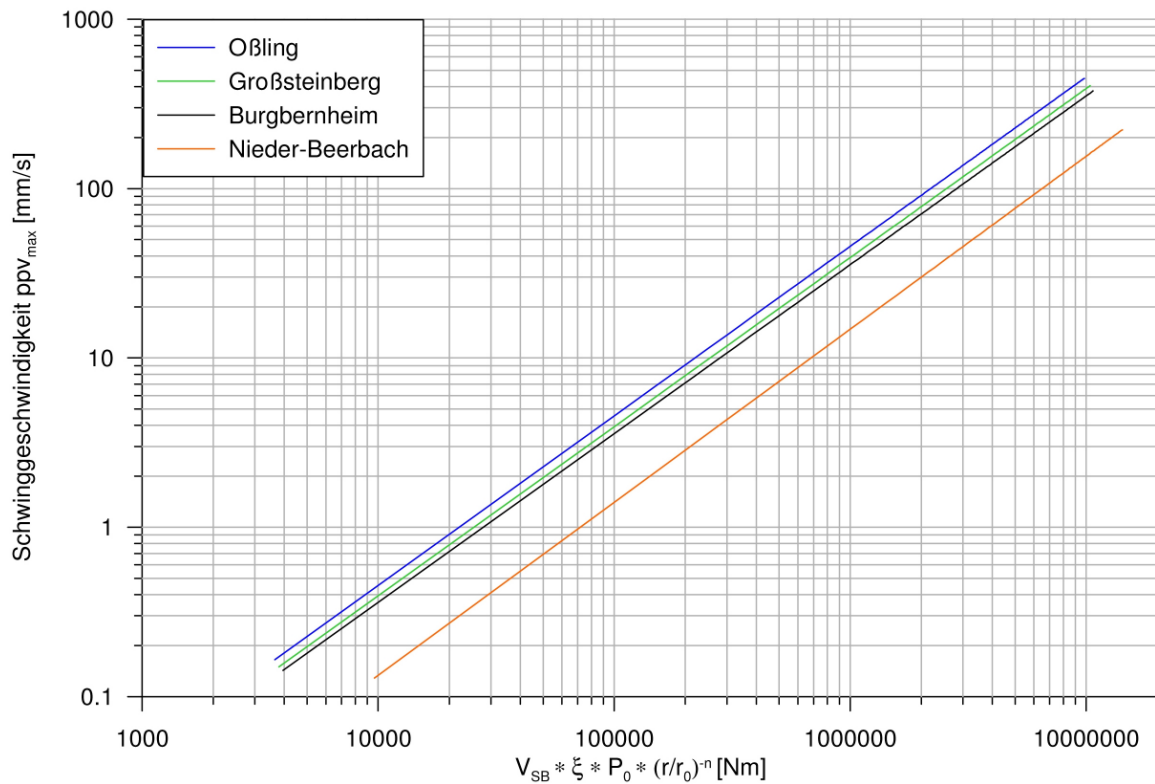


Bild 5.13: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in den Versuchsbetrieben Oßling, Großsteinberg, Burgbernheim und Nieder-Beerbach

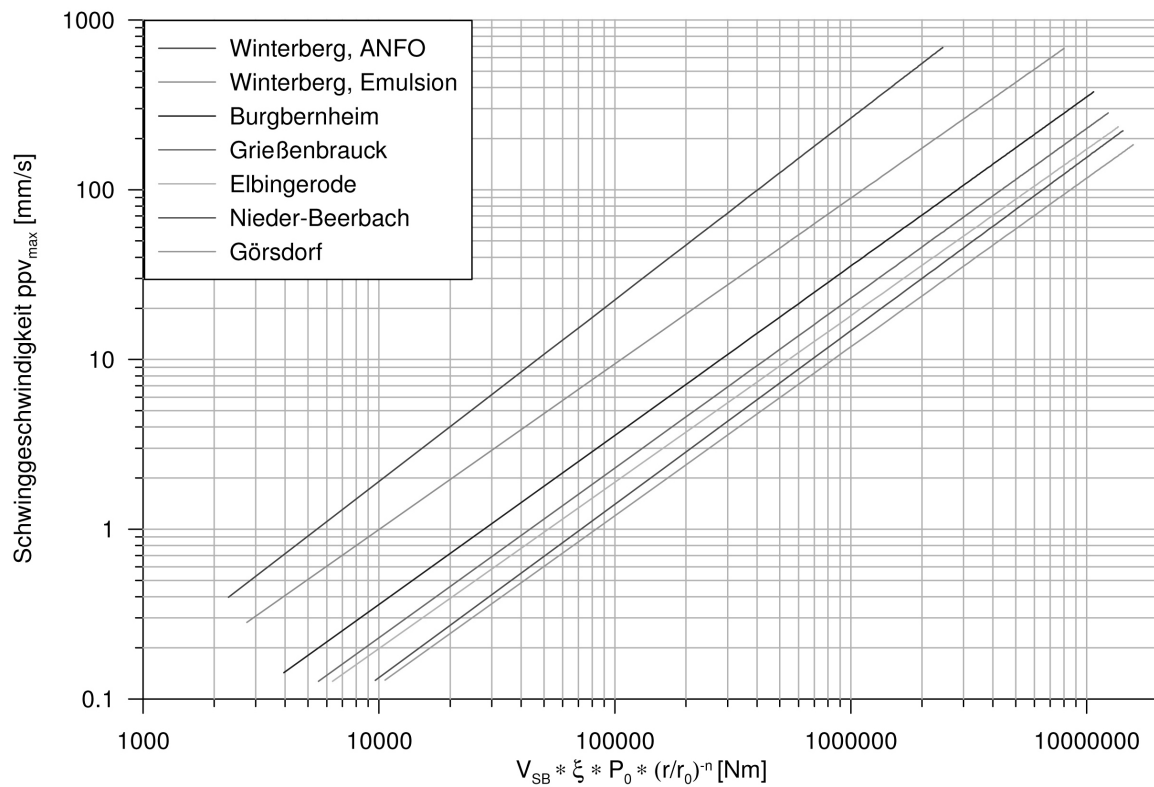


Bild 5.14: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in verschiedenen Tagebauen und Festgebirgen

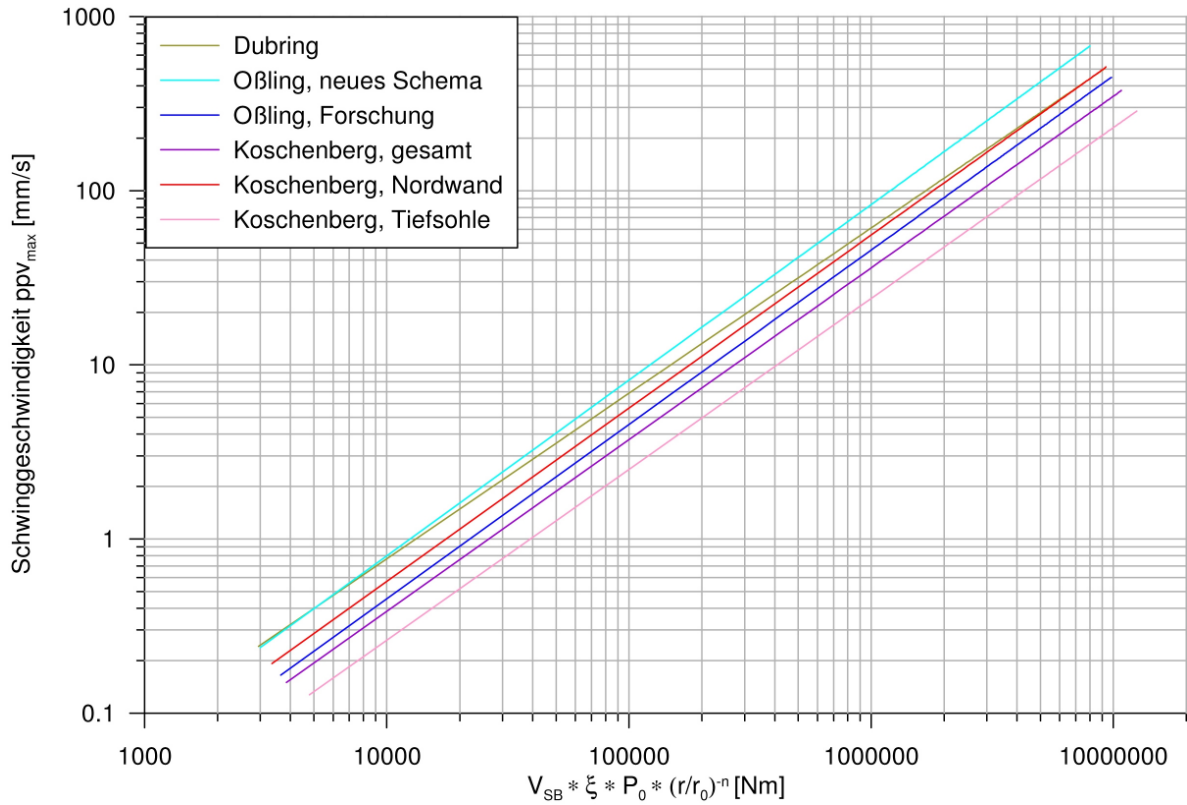


Bild 5.15: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von Zertrümmerungssprengungen in vergleichbaren Festgebirgen aus Meta-Grauwacke mit vorherrschender K_3 -Schichttrennflächenschar

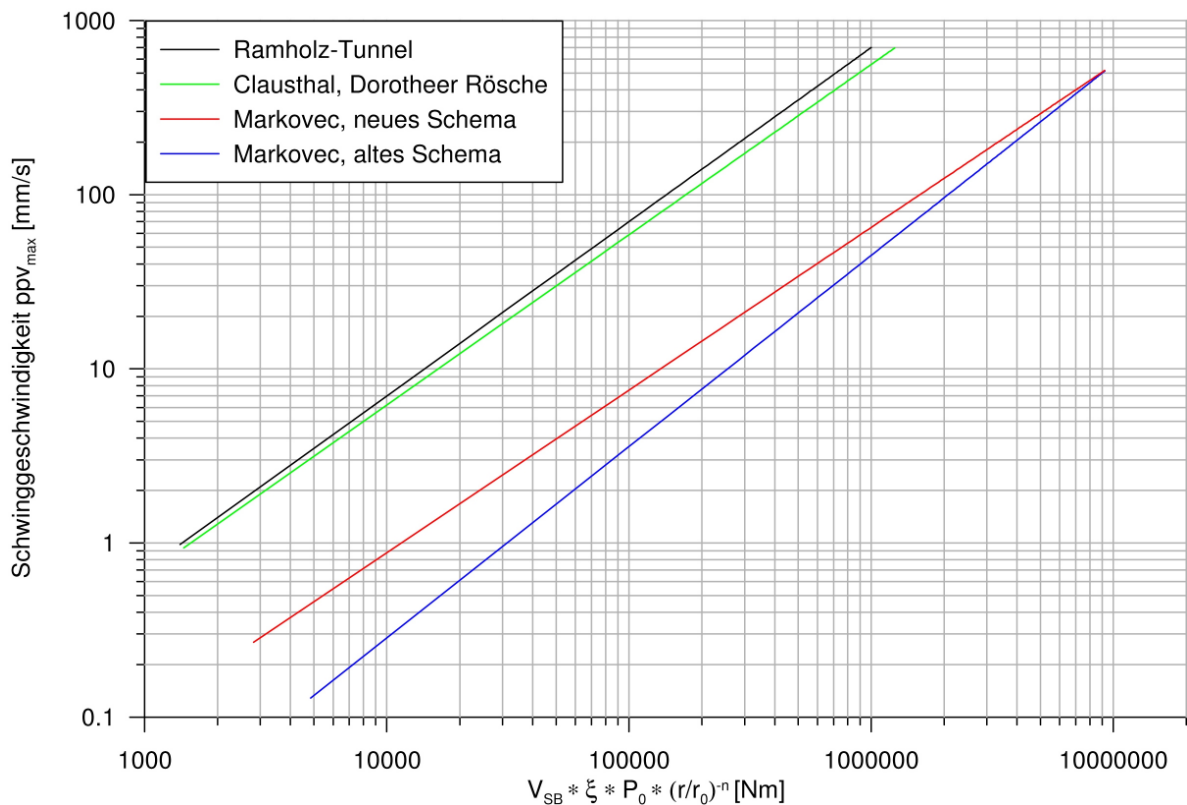


Bild 5.16: Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen von 3-D-unter-Tage-Sprengungen

Das neue Sprengmodell gilt sowohl für Sprengungen im Festgebirge über als auch unter Tage. Die Vorgänge sind direkt vergleichbar.

Aus diesem Zusammenhang abgeleitet, kann man die Regressionsgeraden der Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehungen in einem zusammenfassenden Diagramm miteinander vergleichen (Bild 5.17). Bei der Zuordnung der Prognosebeziehungen muss allerdings beachtet werden, dass die Lage der Geraden von folgenden Einflüssen abhängt:

- ✓ Sonizität der Sprengungen
- ✓ Häufigkeit der Trennflächen
- ✓ Abstrahlrichtung der Erschütterungen.

Die Erschütterungen werden abgemindert durch:

- eine höhere sonische Wirkung
- sehr geringe Trennflächenhäufigkeit
- seitliche Lage von Objekten zur Abstrahlrichtung.

Wenn die bereits mehrfach aufgezeigte Postulation stimmt, dass eine verstärkte Zertrümmerung des Festgebirges bzw. Haufwerkes mit der Erschütterung direkt zusammenhängt, sollte zwischen der Erschütterungsimmission und dem fiktiven, wirksamen Detonationsdruck eine Beziehung bestehen. Dazu wurden mit der Größe der gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeit und dem über die Entfernung des Messortes modifizierten, wirksamen Detonationsdruck $P_{Z0\alpha}$ Mehrfachkorrelationen in jedem Versuchsbetrieb durchgeführt.

Das Ergebnis der Berechnungen findet sich in Bild 5.18. Die Aussage des nachzuweisenden deutlichen Zusammenhanges wird mit dem Diagramm und der Regressionsanalyse nach Bild 5.19 eindrucksvoll belegt. Die sonische Einwirkung auf den gesamten Sprengvorgang und die Erschütterungen ist damit von verschiedenen Seiten der Betrachtung und unabhängig voneinander nachzuweisen. In der Tabelle 5.2 sind die Korrelationskoeffizienten der Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energieabstands- bzw. fiktiven, wirksamen Detonationsdruckbeziehungen gegenübergestellt. Zwangsläufig sind die energiebezogenen Prognosebeziehungen die gesicherten Beziehungen. Der Detonationsdruck hat demnach einen erheblichen Einfluss auf die Erschütterungen.

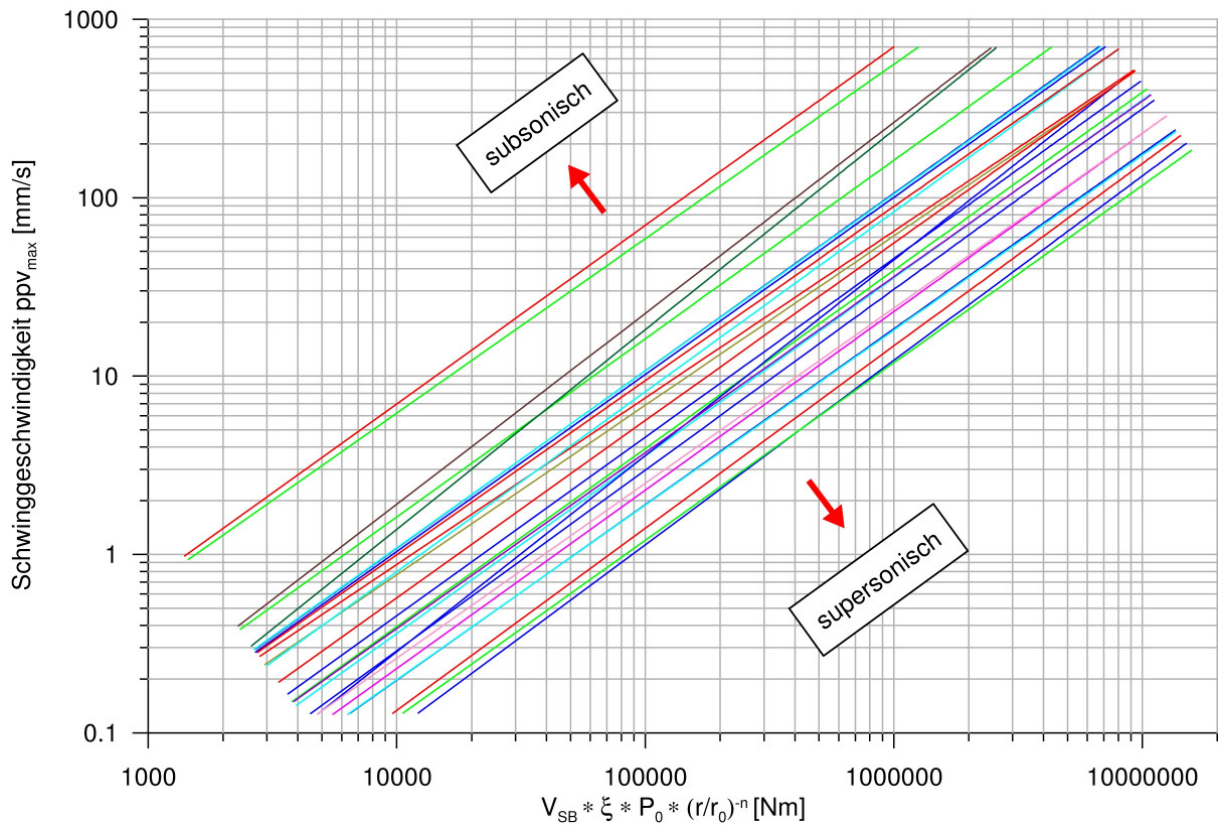


Bild 5.17: Zusammenfassendes Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstands- beziehungsdiagramm verfügbarer, statistisch gesicherter Regressions- gleichungen von allen Sprengungen mit unterschiedlicher Zielstellung

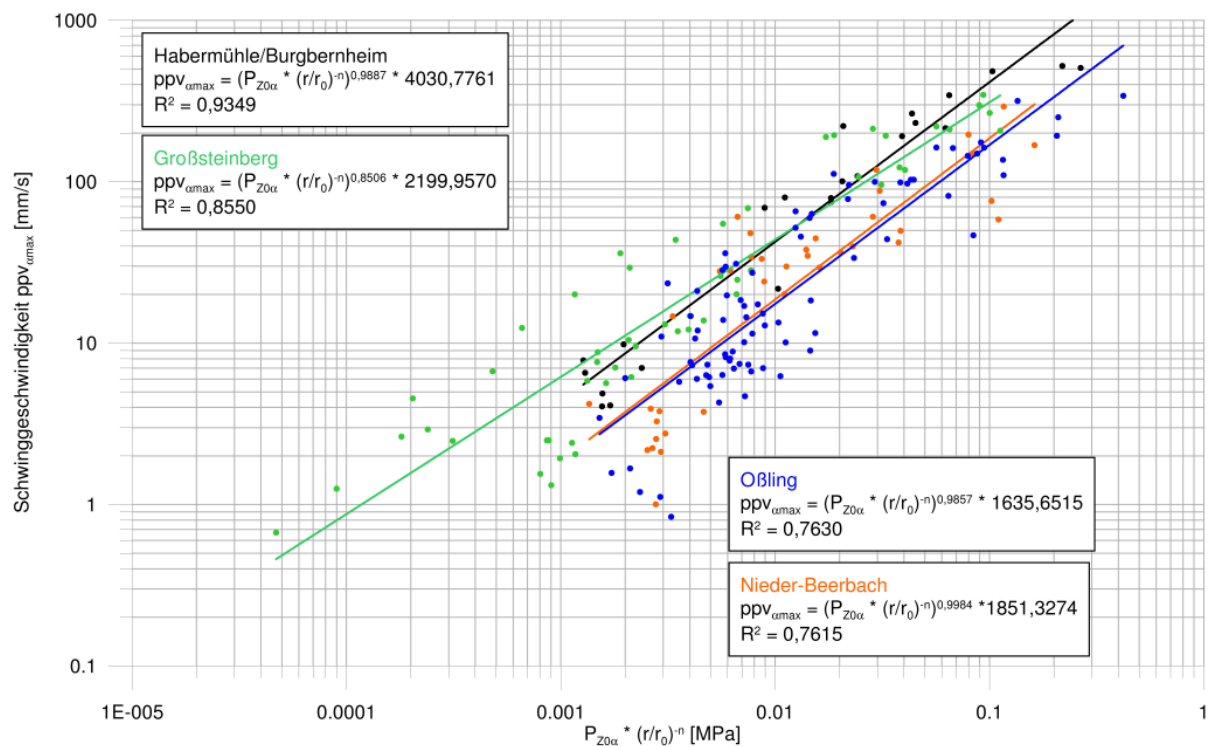


Bild 5.18: Schwinggeschwindigkeits-fiktiver, wirksamer Detonationsdruck-Abstands- Diagramm der Versuchsbetriebe mit den Tagebauen Oßling, Großsteinberg, Burgberheim und Nieder-Beerbach

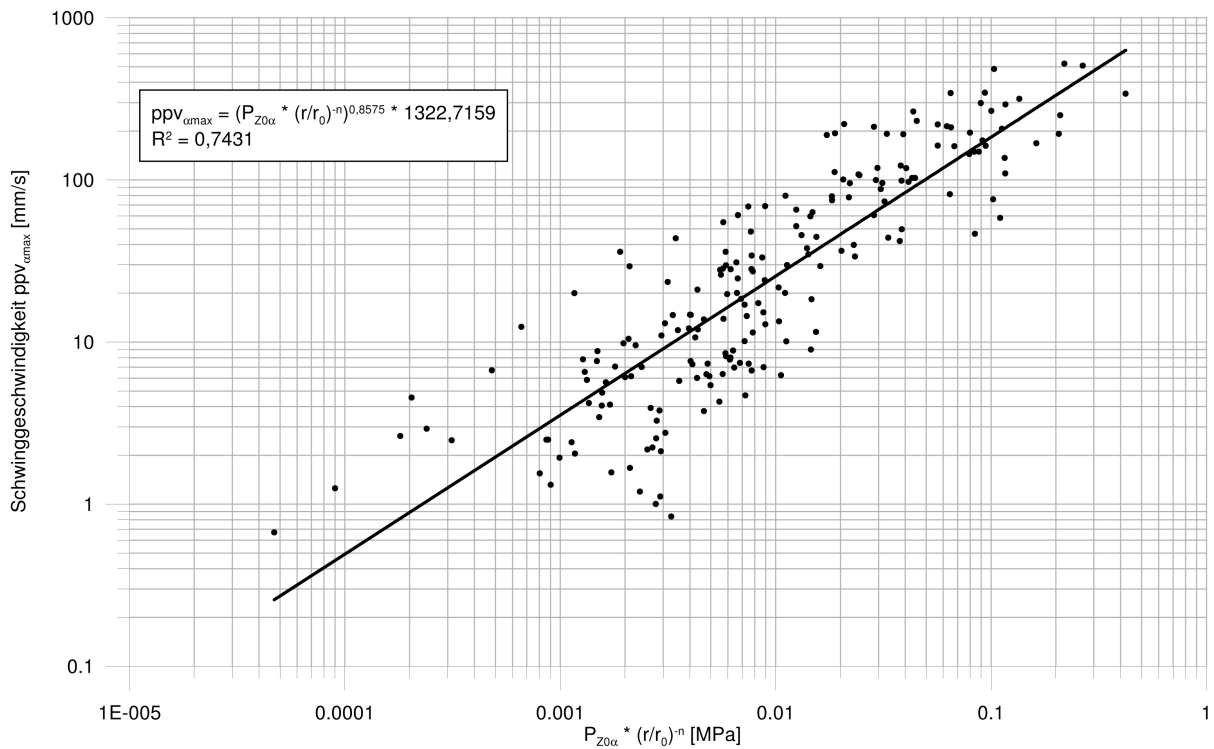


Bild 5.19: Zusammenfassendes Schwinggeschwindigkeits-fiktiver, wirksamer Detonationsdruck-Abstandsdiagramm der Messergebnisse aus den Versuchsbetrieben

Tabelle 5.2: Vergleich der Korrelationskoeffizienten der Regressionsgleichungen von der Schwinggeschwindigkeit zu den fiktiven Energie-Abstands- und fiktiven, wirksamen Detonationsdruckbeziehungen

Tagebau	Korrelationskoeffizient Schwinggeschwindigkeits-fiktive Energie-Abstandsbeziehung	fiktive, wirksame Detonationsdruckbeziehung
Oßling	0,7679	0,7630
Großsteinberg	0,9601	0,8550
Burgbernheim	0,9340	0,9349
Nieder-Beerbach	0,8026	0,7615

Zum Verständnis und Überprüfung der vorgenannten Ergebnisse wurden im Bild 5.20 die tatsächlich erzielten sonischen Wirkungen im M_S - M_P -Diagramm dargestellt. Die meisten Sprengungen hatten einen transsonischen Effekt. Durch die Verschiedenartigkeit der Festgebirge konnte die ganze Bandbreite der Sonizität erfasst werden, so dass die Ergebnisse objektive Aussagen ermöglichen.

5.2 Praktische Auswirkungen der sonischen Wirkung auf die Sprengtechnik

Nachdem mit analytischer Auswertung der Versuchssprengungen in den verschiedensten Festgebirgen der umfassende Nachweis der Gültigkeit des sonischen Effektes geführt werden konnte gilt es, die Auswirkungen auf die künftige sprengtechnische Praxis nachstehend zusammenzustellen:

Sprengtechnische Parameter

- Sprengungen sollten mit Sprengstoffen gleichmäßig ausgeladen werden, die die gleiche Dichte und Detonationsgeschwindigkeit aufweisen

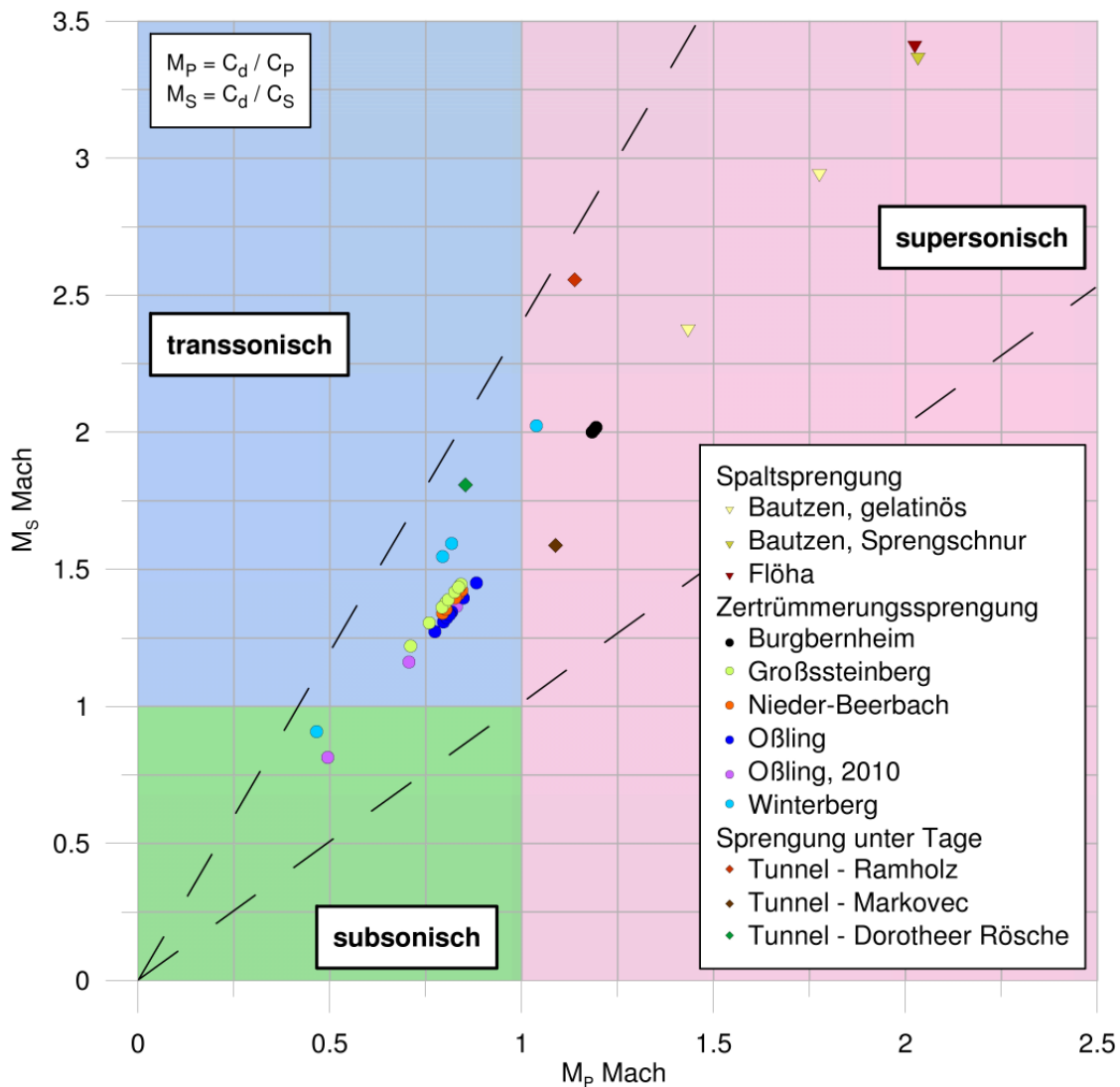


Bild 5.20: Die Auswertung der Sonizität der wichtigsten, beurteilten Sprengungen im M_S - M_P -Diagramm

- Die Auswahl der Sprengstoffe für Sprengungen über und unter Tage erfolgt nach der Detonationsgeschwindigkeit in Auswertung des Verhältnisses der P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Festgesteine des zu sprengenden Festgebirges gemäß der Machzahl.
- Je höher die Machzahl der P- oder/und S-Wellengeschwindigkeit, umso größer ist die zertrümmernde Wirkung im Sprengmedium und umso geringer ist die Erschütterungsimmission.
- Aus der reziproken Machzahl wird der Winkel α der Stoß- oder Machwellenfront berechnet; je kleiner der Winkel, umso größer ist die zerstörende bis zerschneidende Kraft. Auf diese Weise kann der Winkel des sich bildenden Schneidstrahles einer Hohlladung ermittelt werden. Bei einer Machzahl $> 16,5$ ist der Winkel des Schneidstrahles $\leq 3,5^\circ$ und zeigt eine hohe Wirksamkeit (Bild 3.7).
- Die Machzahl unter 1 bewirkt kaum eine zerstörende Wirkung; das Gebirge zerfällt in Kluft- und/oder Festgebirgskörper; die umgesetzte Energie des Sprengstoffes erzeugt hohe Erschütterungen.
- Mit der Größe des Füllungsgrades ξ sollte der Wert 1 (= 100 %) angestrebt werden, damit die Ladesäule an der Bohrlochwandung anliegt und die teuren Bohrmeter vollständig für die Ladung ausgenutzt werden.
- Der spezifische Sprengstoffverbrauch ist in Abhängigkeit von der Größe des mittleren Trennflächenkörpers für 2-D-Zertrümmerungssprengungen nach Bild 5.21 abzuschätzen.
- Für 3-D-Sprengungen unter Tage ist bei bekannter Ausbruchfestigkeit der spezifische Sprengstoffverbrauch mit dem geplanten Ausbruchquerschnitt zu wählen.
- Die Lademenge eines Bohrloches für 2-D-Zertrümmerungssprengungen ist einerseits je nach Ausrichtung des Tagebaues oder der Felsbaustelle entsprechend der Wandhöhe/Bohrlochtiefe sowie Bohrlochdurchmesser und andererseits nach den möglichen Erschütterungsimmissionen im Umfeld auszulegen.
- Die 3-D-Sprengungen unter Tage werden hinsichtlich der Lademenge eines Bohrloches von der Abschlagtiefe sowie dem Bohrlochdurchmesser bestimmt, die ihrerseits von der Ausbruchfestigkeit und den möglichen Erschütterungsimmissionen über Tage abhängt.

Geometrische Parameter

- Die Größe der Vorgabe, des Reihenabstandes und des Bohrlochabstandes leitet sich aus dem spezifischen Sprengstoffverbrauch unter Beachtung des Bohrlochdurchmessers ab.

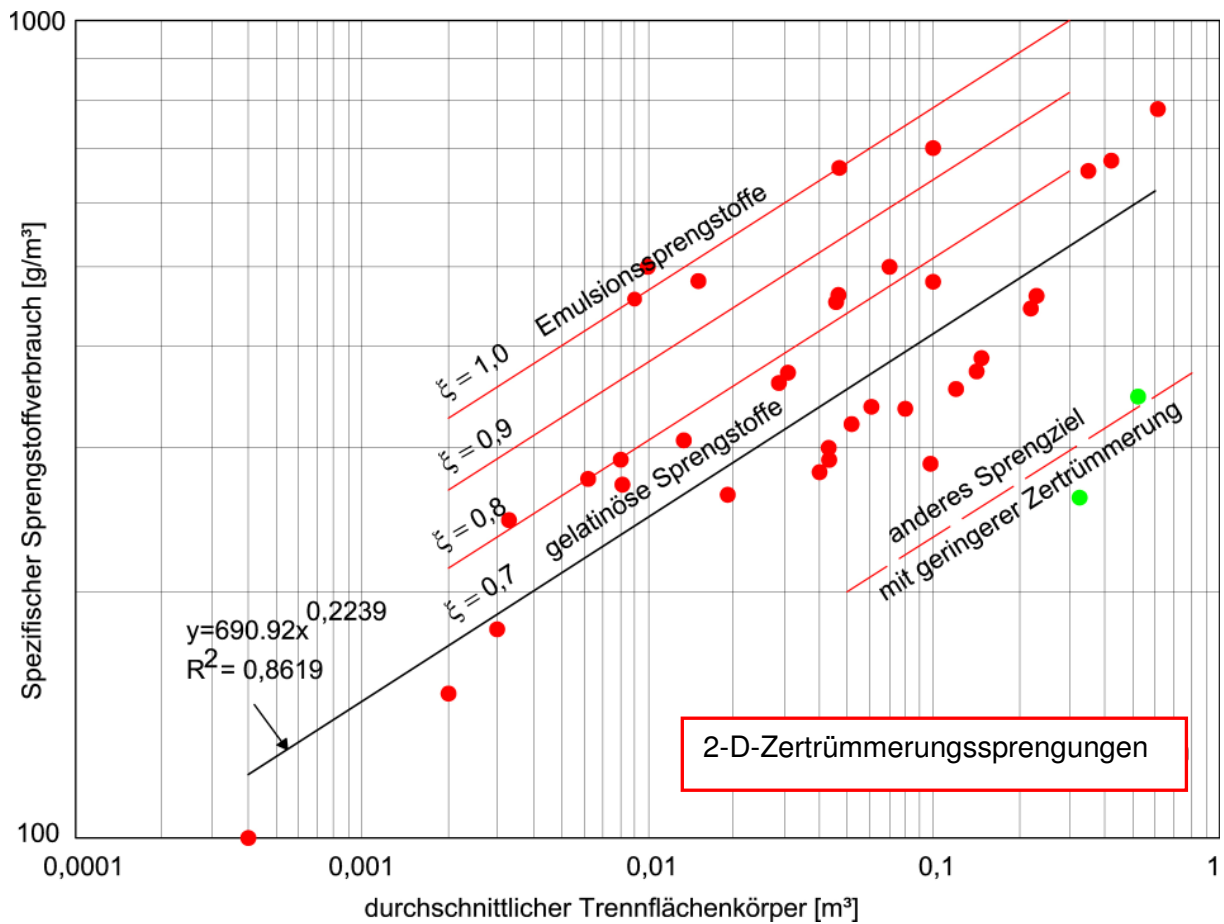


Bild 5.21: Zusammenhang zwischen durchschnittlichen Trennflächenkörpern, dem spezifischen Sprengstoffverbrauch und Füllungsgrad [nach MÜ 09a] für Zertrümmerungssprengungen (2-D-Sprengungen)

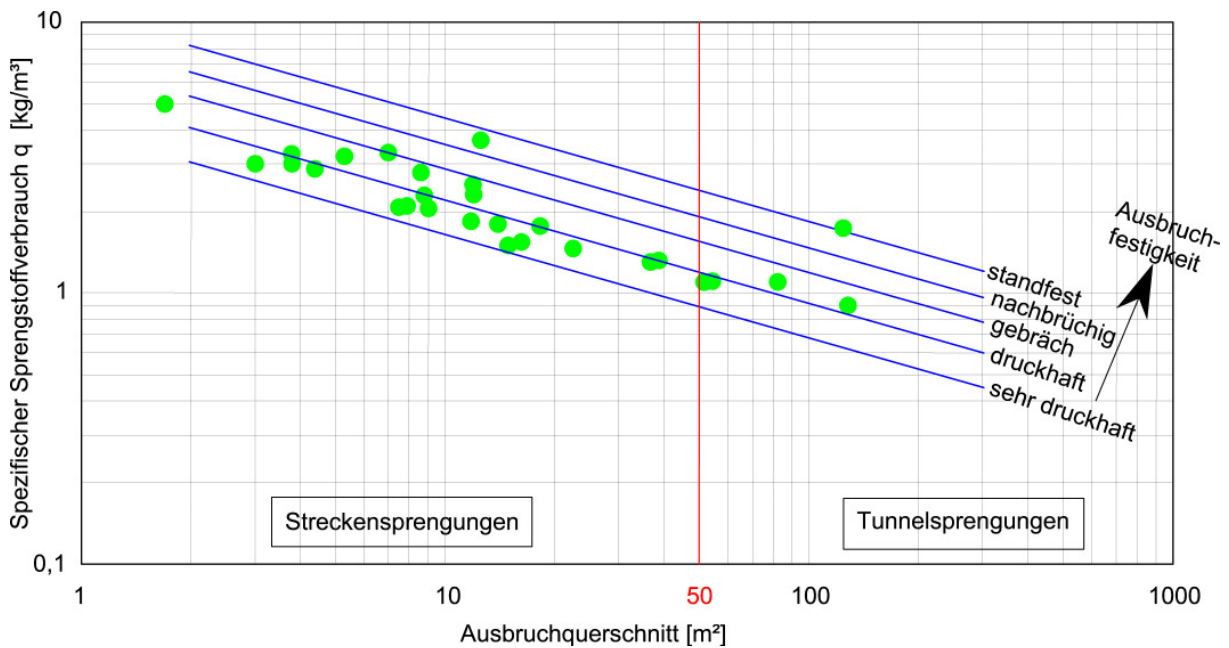


Bild 5.22: Abhängigkeit des spezifischen Sprengstoffverbrauches vom Ausbruchquerschnitt und der Ausbruchfestigkeit für 3-D-Sprengungen unter Tage

- Je kleiner die Abschlagtiefe unter Tage bzw. die Bohrlochlänge über Tage ist, umso enger muss das Bohrlochraster unter Einbeziehung des Besatzes bei gleichem spezifischen Sprengstoffverbrauch gewählt werden.
- Der kritische Bohrlochabstand a_{Bkrit} (nach Bild 3.9) für 2-D-Zertrümmerungssprengungen und 3-D-Sprengungen im Einbruch- sowie Hilfslochbereich darf nicht erreicht oder unterschritten werden.
- Das Seitenverhältnis λ_s sollte 1 ... 1,3 betragen oder durch eine entsprechende Zündfolge nach der Impulstheorie zündtechnisch beeinflusst bzw. vergrößert werden.
- Der Bohrlochdurchmesser ergibt sich aus der erforderlichen Fördermenge pro Zeiteinheit, den möglichen Erschütterungsimmissionen und den optimalen Umsetzungsbedingungen der eingesetzten Sprengstoffe. In Festgebirgen mit sehr geringer Trennflächenhäufigkeit sind Bohrlochdurchmesser ≤ 100 mm und in solchen mit geringer ... mittlerer Häufigkeit ≥ 100 mm empfehlenswert, wenn es die Erschütterungsimmissionen zulassen.
- Zur Verringerung der Umweltbeeinflussung und Belästigungen durch Sprengerschütterungen ist es angezeigt, die Sprenganlagen hinsichtlich Reihenanzahl, Bohrlochanzahl bzw. Haufwerksvolumen entsprechend den Möglichkeiten im Tagebau oder auf der Felsbaustelle über Tage zu vergrößern.

Zündtechnische Parameter

- ❖ Bei Sprengungen im Festgebirge über und unter Tage können die verfügbaren Zündverfahren elektrisch, nichtelektrisch und elektronisch zum Einsatz kommen.
- ❖ Die gleichzeitige Zündung von Bohrlochladungen nach der Impulstheorie mit progressiver Zündfolge bewirkt eine bessere Zertrümmerung gegenüber der Einzellochzündung.
- ❖ Mit gleichzeitig initiierten, elektronischen Zündern wird dieser Zertrümmerungseffekt optimiert, die Erschütterungen werden nicht erhöht.
- ❖ Die Erschütterungen werden weder durch veränderte Zündzeitstufen noch die Genauigkeit von Zündzeiten bei elektronischer Zündung erhöht oder erniedrigt.
- ❖ Die Zündfolge ist harmonisch und gleichmäßig nacheinander zu konzipieren. Die Verzögerungszeiten sollten nicht die Rissgeschwindigkeit des zu sprengenden Gesteines unterschreiten und keine Resonanzen infolge Anregung der Eigenfrequenz des Gebirges erzeugen.
- ❖ Die Lademenge pro Bohrloch und nicht die pro Zündzeitstufe ist maßgebend für die Erschütterungsimmissionen bei 2-D-Zertrümmerungssprengungen oder 3-D-Sprengungen im Einbruch-Hilfslochbereich.

- ❖ Die Gesamtdauer der Zündfolge ist aus umweltfreundlichen Gründen so einzurichten, dass eine Sekunde möglichst nicht überschritten wird. Je kürzer die Zündfolge ausgelegt wird, umso mehr wird eine Sprengung von den Anwohnern der Umgebung akzeptiert.

Der bisher nicht bekannte und mit dieser Forschungstätigkeit eindeutig nachgewiesene Zusammenhang zwischen Zertrümmerung und Erschütterung infolge der sonischen Wirkung gestattet auf der Grundlage der Beziehungen (10) und (6)

$$P_{Z0\alpha} = \frac{\xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) V_{S0}}{w'^2 \cdot l_{B0} \cdot (\sin \alpha_P \cdot \sin \alpha_S)^P} \quad (10)$$

$$ppv_{\max} (\epsilon_{\max}) = k \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n} \right]^m \quad (6)$$

jede Sprengung mit den darin enthaltenen Parametern optimal, umweltfreundlich und nach den wirtschaftlichen Zwängen auszulegen.

Für die Erhöhung der Zertrümmerung und Reduzierung von Erschütterungen können die nachstehenden Größen bei der Festlegung der Bohr- und Sprengtechnik bewusst genutzt werden:

- Füllungsgrad $\xi \Rightarrow$ Beziehung zum Bohrl Lochdurchmesser und der Art des Sprengstoffes wie flüssig, pulverförmig oder patroniert
- Sprengstoffdichte ρ_s und Detonationsgeschwindigkeit c_d des eingesetzten Sprengstoffes
 - \Rightarrow Beziehung zum sonischen Effekt, P- und S-Wellengeschwindigkeit des Sprengmediums, abhängig vom Sprengziel
- Volumen des Sprengstoffes pro Bohrmeter V_{S0}
 - \Rightarrow Beziehung zum Bohrl Lochdurchmesser, spezifischen Sprengstoffverbrauch; Sprengziel
- Volumen des Sprengstoffes pro Bohrl Loch V_{SB}
 - \Rightarrow Beziehung zur Bohrl Lochtiefe, zum Bohrl Lochdurchmesser, spezifischen Sprengstoffverbrauch; Sprengziel
- gezündete Vorgabe w' /gezündeter Reihenabstand a'_R
 - \Rightarrow Beziehung zum spezifischen Sprengstoffverbrauch, Zündfolge; Sprengziel

- Winkel der Machfronten von M_P und M_S
 - ⇒ je kleiner der Winkel α_P, α_S , umso größer der zerstörende Effekt/
umso besser die Erschütterungsminderung
- P-Exponent des Produktes ($\sin\alpha_P \cdot \sin\alpha_S$)
 - ⇒ je größer P, desto günstiger ist die Zerkleinerung

Daraus ist zu schlussfolgern, dass man mit neun wichtigen Parametern die Zertrümmerung und Erschütterungen von Sprengungen im Festgebirge über und unter Tage nachhaltig beeinflussen kann.

6 Grundsätze für die Dimensionierung von Sprengungen über und unter Tage

6.1 Wichtige Definitionen

Bevor die Grundsätze formuliert werden können, ist es notwendig, die wichtigsten Bohr- und Sprengparameter zu definieren [RU 11]. Für eine weitergehende Benennung und Beschreibung von Begriffen sollte [RU 07, RU 11] herangezogen werden.

Jede Sprenganlage setzt sich aus mehreren Wirkungsprinzipien zusammen, deren Definition im Bild 6.1 dargestellt wird. Im neuen Sprengmodell (Bild 3.12) wird das Einheitsvolumen mit

$$V_0 = w' \cdot a'_B \cdot l_{B0} \text{ (m}^3\text{)} \quad (11)$$

verwendet. Auf dieses Volumina wird die Sprengstoffladung bezogen. Das Bild 6.2 vermittelt die stets genutzten geometrischen Parameter von 1-D- und 2-D-Sprenganlagen über Tage.

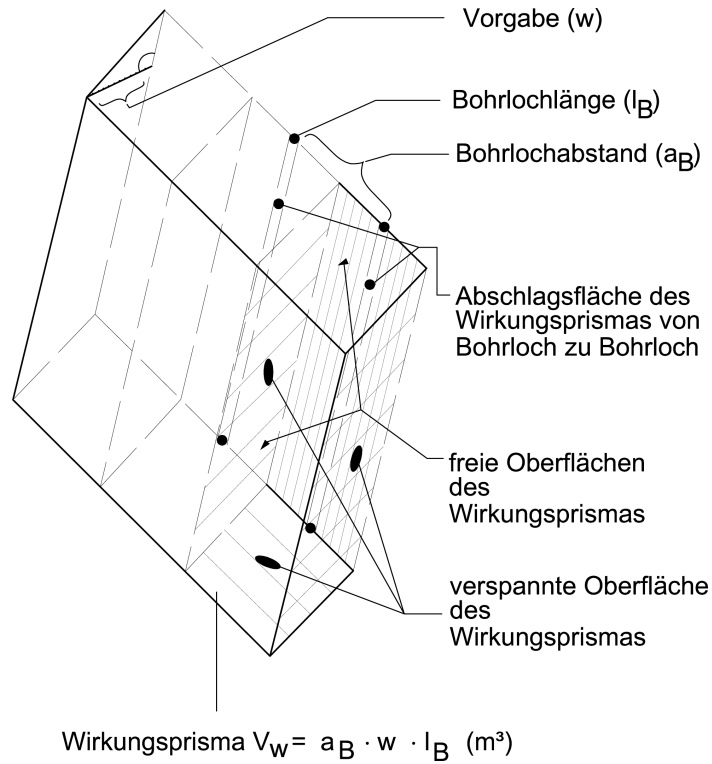


Bild 6.1: Das Wirkungsprisma einer Sprenganlage ist ein bohrlochbezogenes Volumenelement

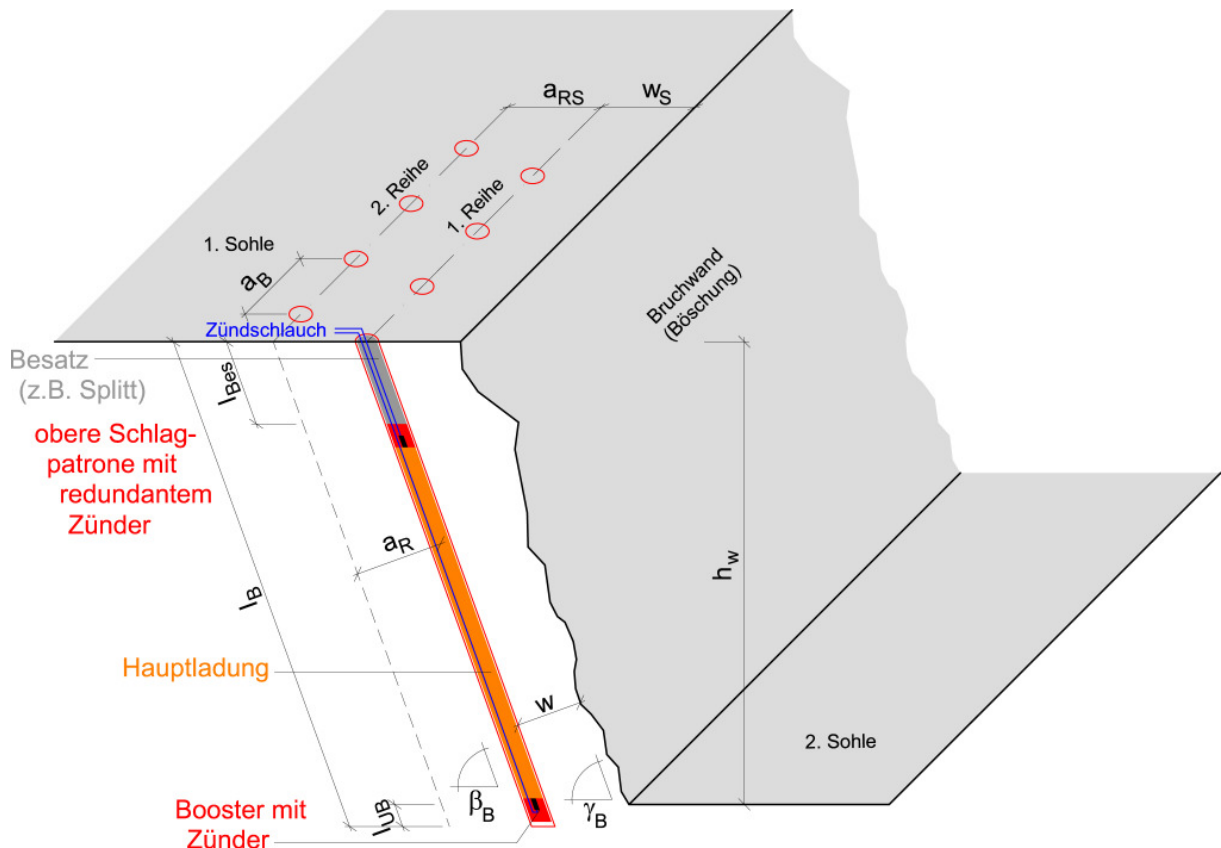


Bild 6.2: Wichtige geometrische Parameter von 1-D- und 2-D-Sprenganlagen über Tage

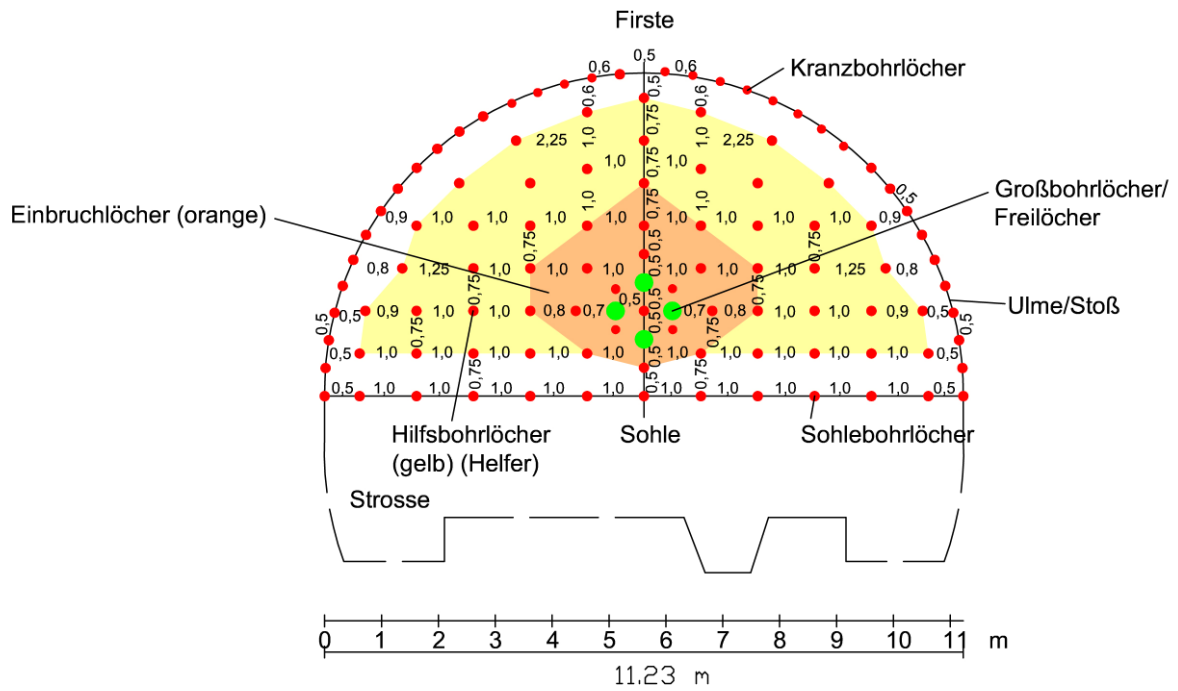


Bild 6.3: Bohrschema einer 3-D-Sprengung unter Tage einer Kalotte mit wichtigen Bezeichnungen

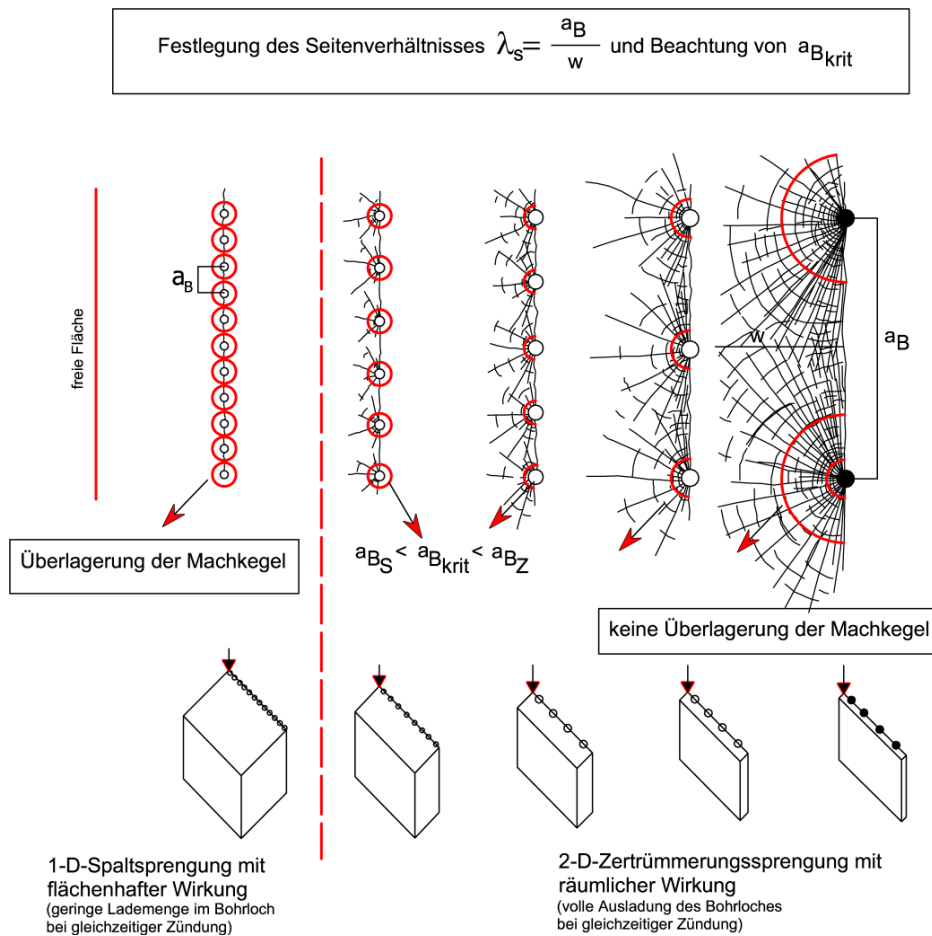


Bild 6.4: Festlegung der jeweiligen Seitenverhältnisse $\lambda_s = \frac{a_B}{w}$ nach dem Sprengziel unter Beachtung der sonischen Wirkung für 1-, 2- und 3-D-Sprengungen

Das Bohrschema einer 3-D-Sprengung unter Tage mit allgemein wichtigen Bezeichnungen enthält Bild 6.3.

Die Ausladung jeder Sprenganlage sollte möglichst gleichmäßig unter Beachtung harmonischer, geometrischer Bedingungen wie Vorgabe, Bohrlochabstand, Bohrlochdurchmesser, Bohrlochtiefe und -neigung sowie unter Verwendung eines einheitlichen Sprengstoffes erfolgen.

Die jeweils gewünschte oder erforderliche Wirkung einer Sprengung ist entsprechend der Darstellung in Bild 6.4 dem Sprengziel unter Berücksichtigung der Sonizität und hinsichtlich des Seitenverhältnisses anzupassen. Mit größerem Seitenverhältnis und steigender Lademenge eines Bohrloches erhöht sich die räumliche Zertrümmerung. Bei ausreichend größeren Bohrlochabständen ($> a_{\text{Bkrit}}$) überlagern sich die Machkonusse nicht, so dass generell die Einzelladung eines Bohrloches für die Erschütterungen maßgebend ist. Das Prinzip der Spaltsprengung gilt auch für 3-D- Sprengungen unter Tage im Bereich der Kranz- und Sohllöcher (Bild 6.3).

Jede Gewinnungssprengung sollte nach dem Prinzip des optimalen Seitenverhältnisses ausgelegt werden.

6.2 Sprengungen über Tage als Spaltsprengungen (1-D-Sprengungen)

Die Spaltsprengungen erfordern einen spezifischen Sprengstoffverbrauch von 0,1 - 1,0 kg/m² je nach Größe des Trennflächenkörpers und der Gesteinsfestigkeit. Auf der Grundlage der Berechnung des fiktiven, wirksamen Detonationsdruckes $P_{Z0\alpha}$ (10) ist eine Abschätzung des spezifischen Sprengstoffverbrauches möglich. Die Berechnung sollte auf eine Fläche von 1 m² bezogen werden. Die Beziehung (10) ist wegen der quasi-1-dimensionalen Wirkung wie folgt anzupassen:

$$P_{Z0\alpha} (\text{Spalt}) = \frac{\xi \cdot \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \cdot V_{S0}}{w'^2 \cdot l_{B0} \cdot (\sin \alpha_P \cdot \sin \alpha_S)^2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (12)$$

⇒ Für $w'^2 = 1^2 \text{ m}^2$ wegen der flächenhaften Wirkung zu setzen

Der berechnete fiktive, wirksame Detonationsdruck sollte die Zugfestigkeit der zu sprengenden Festgesteine überschreiten.

Berechnungsbeispiel: Baustelle Bautzen (Eingangswerte Kapitel 4.7)

Ergebnis $P_{Z0\alpha}$ (Spalt) nach (12) = 20,39 N/mm²
 σ_z = Zugfestigkeit Granodiorit = 12 - 16 N/mm²
 $P_{Z0\alpha}$ (Spalt) > σ_z Granodiorit
Spaltsprengung erfolgreich \Rightarrow vergleiche Bild 6.5

Die Sprengstoffauswahl muss zwingend supersonisch erfolgen, damit der spaltende, flächenhafte Effekt sicher erfolgen kann. Die Bohrlochladung ist einheitlich, gestreckt über das gesamte Bohrloch zu verteilen. Die Bohrungen sollten mit gleichen Abständen und Neigungen über die gesamte Länge gleichmäßig in das Festgebirge eingebracht werden. Die Zündung der gesamten Bohrlochreihe ist gleichzeitig unter Beachtung der zulässigen Erschütterungen vorzunehmen. Die Zündeinleitung bzw. die Lage des Zünders sollte etwa in gleicher Höhe zwischen den Ladungen am Bohrlochmund sein, damit sich das Gebirge von oben nach unten öffnen kann. Bei erforderlicher Reduzierung der Lademenge der Spaltsprengung infolge zu hoher Erschütterungsimmissionen ist die geringstmögliche Spaltflächenbildung mit vier gleichzeitig gezündeten Ladungen erreichbar.

Die Spaltsprengungen werden oft mit Zertrümmerungssprengungen kombiniert. In diesem Fall sind die Spaltsprengungen entweder vor oder mit der Zertrümmerungssprengung über Tage zu zünden. Unter Tage sind Spaltsprengungen generell nach dem Einbruch und den Hilfslöchern also nach der Zertrümmerungssprengung zu zünden.

Der Ringraum zwischen der Ausladung mit einem gleichen Sprengstoff und der Bohrlochwandung ist mit Sand oder Splitt aufzufüllen.

Das Seitenverhältnis der Spaltsprengung ist nach Bild 6.4 so zu wählen, dass sich die Machkegel der Ladungen überlagern können und eine flächenhafte, spaltende Bruchbildung zwischen den Bohrlöchern garantieren (Bild 6.5). Die auf der sich neu gebildeten Spaltfläche vorhandenen schwarzen Überreste der Schwaden weisen den vorhergesagten, sprengtechnisch erzeugten Bruchvorgang nach (Bild 6.5).

Ist für die Felsbaustelle oder den Tagebau die fiktive Energie-Abstandsbeziehung bekannt und sind schutzwürdige Objekte vorhanden, ist die Gesamtlademenge der Spaltsprengung danach festzulegen.



Bild 6.5: Spaltsprengung mit Bruchbildung durch Überlagerung der Machkonusse und den sich sekundär auf der Spaltfläche ausgebreiteten Schwaden

Die supersonische Wirkung von Spaltsprengungen ermöglicht das sprengtechnische Lösen im unmittelbaren Nahbereich von Gebäuden, ohne dass Risssschäden entstehen [MA 12].

6.3 Sprengungen über Tage als Zertrümmerungssprengungen (2-D-Sprengungen)

Der spezifische Sprengstoffverbrauch ist nach den Trennflächenabständen resp. dem durchschnittlichen Trennflächenkörper abzuschätzen (Bild 5.21). Die Wahl des einzusetzenden, einheitlichen Sprengstoffes für eine Sprenganlage ist je nach erforderlicher oder verfügbarer

mindestens transsonischer, besser supersonischer

Wirkung vorzunehmen (Bilder 3.3 und 3.4). Subsonisch sollte nur dann gesprengt werden, wenn es das Trennflächengefüge, die Erschütterungen oder/und das beauftragte Sprengziel zulassen. Es gibt Tagebaubetriebe insbesondere die der Kalk- und Zementindustrie die kein Unterkorn verwerten können, so dass durch die Sprengungen keine intensive Zertrümmerung des Festgebirges mit hohem Feinanteil erwünscht ist. In diesen Fällen sinkt der spezifische Sprengstoffverbrauch auf die in Bild 5.21 dargestellte Größenordnung ab, die ihrerseits größere Bohrlochabstände und Vorgaben nach sich zieht.

Mit den ausgewählten Sprengstoffen ist im Regelfall eine 100 %ige Ausladung der Bohrlöcher unter der Besatzzone anzustreben. In der ersten Reihe kann es in Bereichen mit

starker Auflockerung oder/und zu geringer Vorgabe erforderlich werden, die Ladesäule zu verjüngen oder mit Zwischenbesatz zu trennen.

Durch die volle Ausladung soll erreicht werden, dass der Sprengstoff im direkten Kontakt mit dem Festgebirge die sonische Wirkung voll umsetzen kann.

Weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der Fragmentierung und Anpassung der Erschütterungsimmissionen erschließen sich, wenn die Zertrümmerungssprengungen mindestens als 3- und Mehrreihensprengungen projektiert werden. Mehrreihensprengungen haben gegenüber Einreihensprengungen folgende Vorteile:

- Die Vergrößerung der Sprenganlage verringert die Anzahl der Sprengungen pro Zeiteinheit. Das Umfeld wird weniger belastet.
- Die größten Gefahren eines Steinfluges gehen vom Bereich der 1. Reihe aus. Durch Mehrreihensprengungen wird diese Gefährdung erheblich eingeschränkt und kann durch eine entsprechende Vermessung der Sprenganlage vor der Sprengung weitestgehend vermieden werden.
- Mehrreihensprengungen können mit progressiver simultaner Zündung nach der Impulstheorie abgetan werden, die ihrerseits eine höhere Zertrümmerung erzeugen, ohne dass der Sprengstoffverbrauch ansteigt.

Letztlich sollte eine 2-D-Zertrümmerungssprengung eine harmonische, gleichmäßige Geometrie aufweisen und mit einem einheitlichen Sprengstoff, der gleiche Eigenschaften besitzt ausgeladen werden.

Mit den in der Beziehung (10) enthaltenen Eingangsgrößen

- | | | |
|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| ▪ ξ | - | Füllungsgrad |
| ▪ $\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4}$ | - | Detonationsdruck Sprengstoff |
| ▪ V_{S0} | - | Sprengstoffvolumen je Einheitsvolumen |
| ▪ w' | - | gezündete Vorgabe |
| ▪ α_P | - | Winkel der P-Machfront |
| ▪ α_S | - | Winkel der S-Machfront |
| ▪ P-Exponent | - | 1 - 1,5 - 2 je nach Anzahl der Reihen |

ist es effektiv möglich, die Zerkleinerung des Haufwerkes systematisch zu verbessern.

Eine besondere Bedeutung hat dabei die gezündete Vorgabe, die allein durch zündtechnische Maßnahmen verändert werden kann. In den Bildern 6.6 bis 6.10 werden die

vielfältigen Möglichkeiten der Einflussnahme beispielhaft mit den verschiedenen Zündverfahren dargestellt.

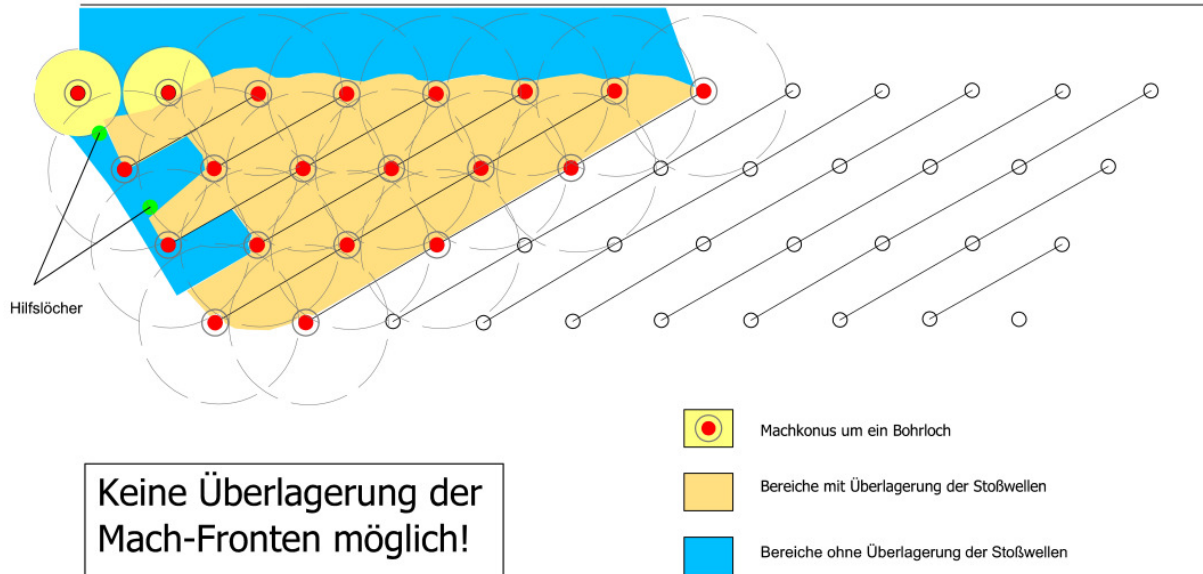


Bild 6.6: Prinzip der Auslegung einer progressiven, simultanen Zündfolge einer Mehrreihensprengung nach der Impulstheorie mit Öffnung/Einbruch der Sprengung auf einer Seite und Ausbruch im stumpfen Winkel [MÜ 11b]

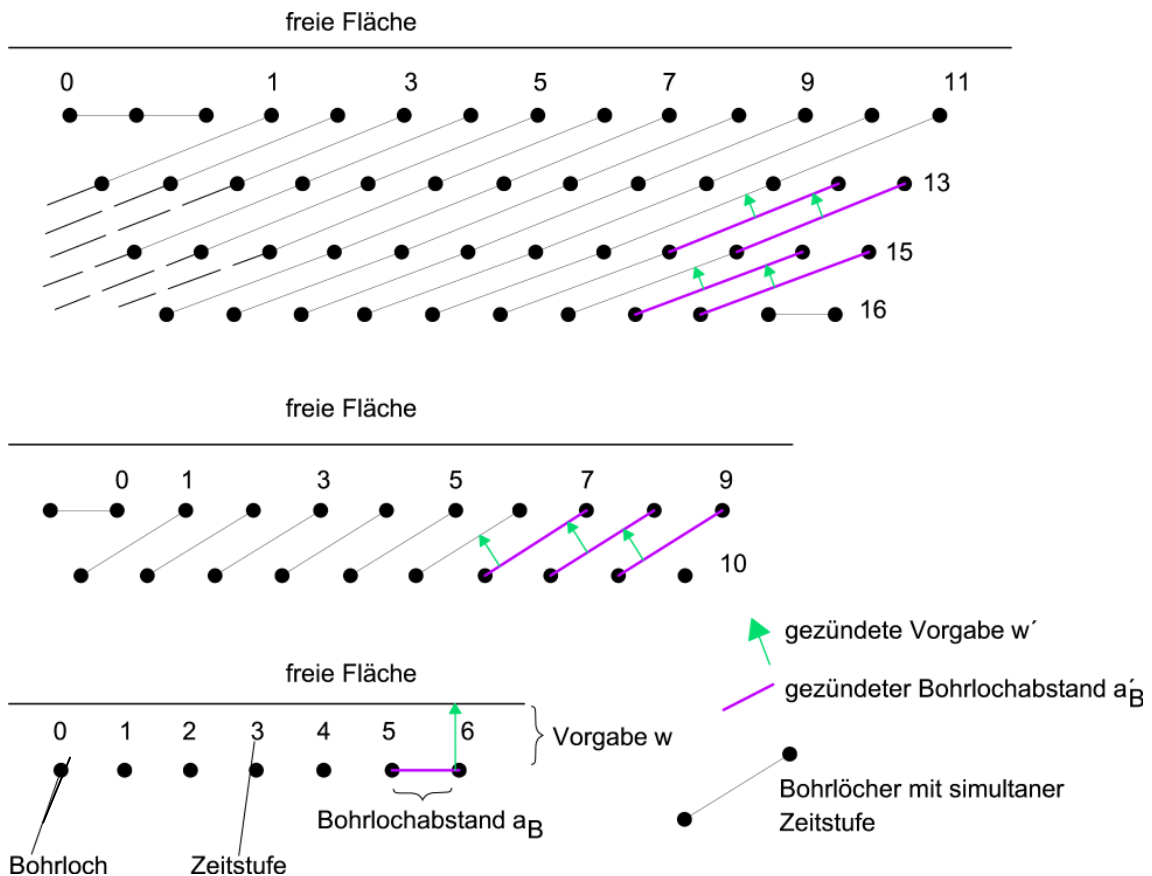
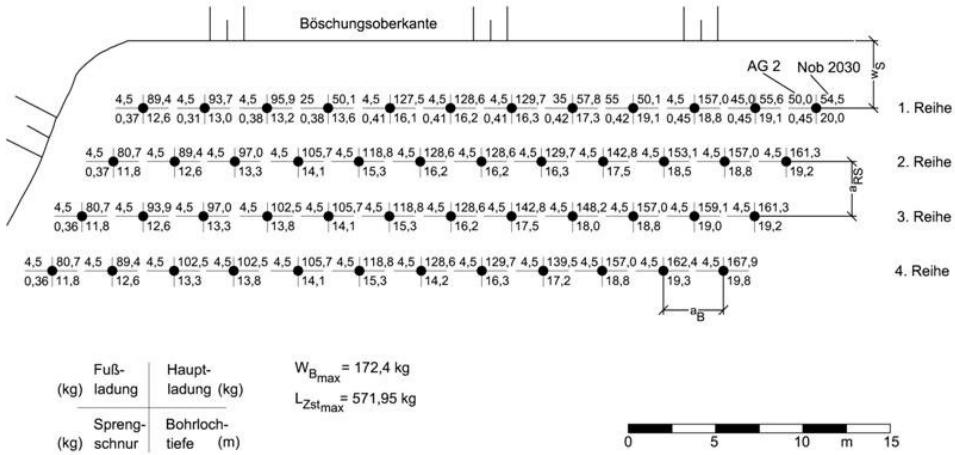
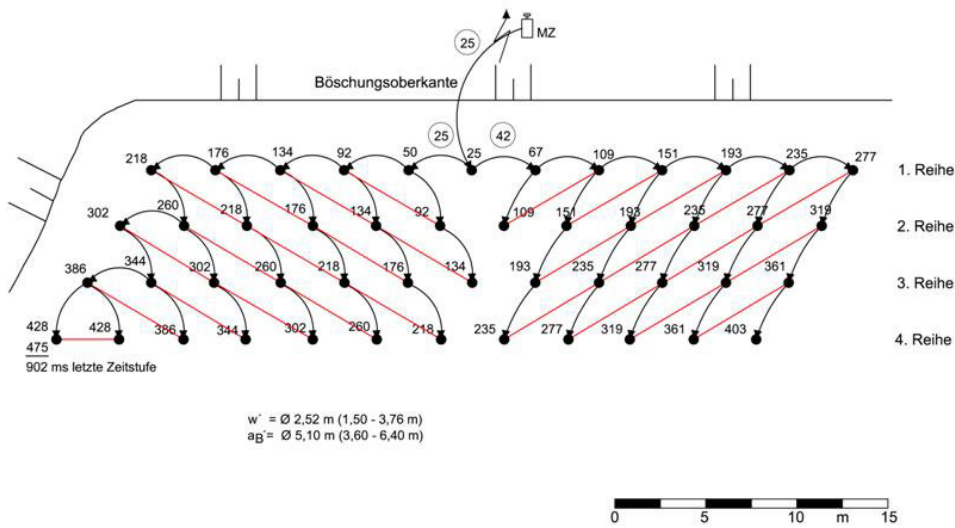


Bild 6.7: Variationen der Zündfolge am Beispiel der elektrischen Zündung mit gleichem Bohrloch- und Reihenabstand

a) Bohr- und Ladeschema



b) Zündschema



c) 3-D-Laserscanneraufnahme nach der Sprengung

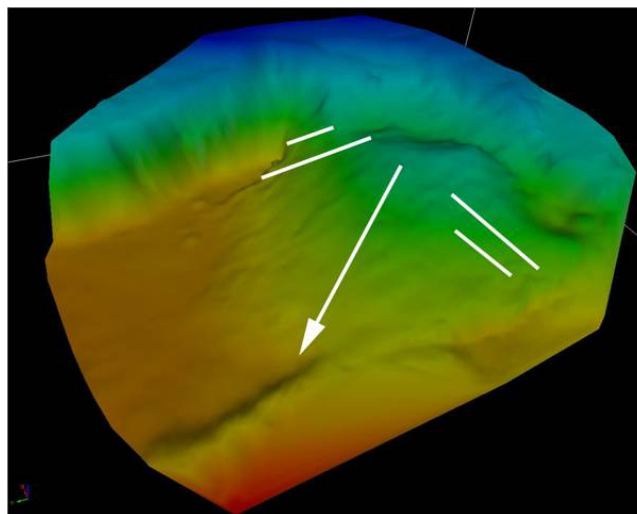


Bild 6.8: 4-Reihensprengung nichtelektrisch gezündet nach der Impulstheorie im Tagebau Görzdorf/Gneis

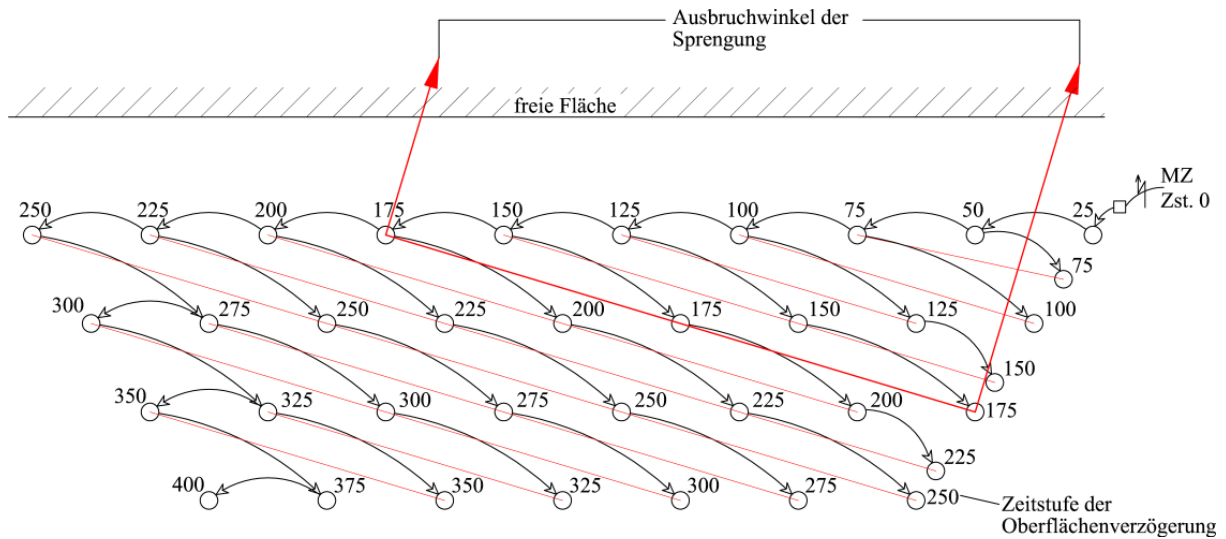


Bild 6.9: Beispiel einer nichtelektrischen Zündung nach der Impulstheorie mit Vergrößerung des gezündeten Seitenverhältnisses λ_s von $\frac{a_B}{w}$ (gebohrt) 1,39 auf $\frac{a'_B}{w'}$ (gezündet) mit 7,65

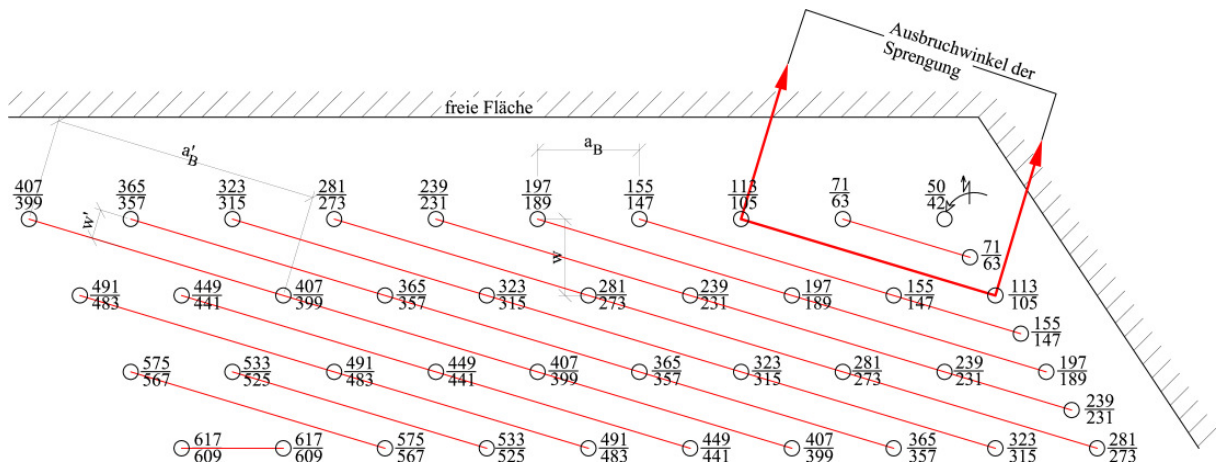


Bild 6.10: Beispiel einer elektronisch gezündeten 4-Reihen-Sprengung nach der Impulstheorie mit optimaler Zertrümmerung im extrem schwer sprengbaren Festgestein

Es bedeuten im Bild 6.10: untere Zahl = Zündzeit im Bohrloch tiefsten
 obere Zahl = Zündzeit des redundanten Zünders am Bohrlochmund
 Zündverzögerung zwischen den simultanen Reihen 21 ms

Das geeignete Zündverfahren ist vom Anwender auszuwählen. Mit der nichtelektrischen und elektronischen Zündung können die modernen Vorgehensweisen am günstigsten und wirkungsvollsten umgesetzt werden. Die Tabelle 6.1 enthält die wichtigsten Vor- und Nachteile der gegenwärtig verfügbaren Zündverfahren.

Tabelle 6.1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Zündverfahren [VO 00] (vereinfacht)

Zündverfahren	Züandschnurzündung	elektrische Zündung	nichtelektrische Zündung	elektronische Zündung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - keine Umsetzung moderner Zündfolgen möglich - begrenzte Anwendung - Sicherheitsrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> - begrenzte Anzahl von Ladungen - wenig Verzögerungszeiten - Prüfung Erdschluss - störanfällig 	<ul style="list-style-type: none"> - nur visuelle Kontrolle möglich - Plasterückstände im Haufwerk - begrenzte Verzögerungszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> - z. Zt. teuerstes Zündverfahren - erfordert hohe Sachkenntnis des Sprengberechtigten - nach Zündfreigabe hoher Zeitaufwand - Resonanzgefahr
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - keine Resonanz - billig - einfach handhabbar 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Resonanz möglich - einfach auslegbar - kontrollierbar durch Widerstandsmessung - berechenbar - preiswert 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Resonanz möglich - quasi unendlich große Sprenganlagen - kostengünstig - einfach umsetzbar - mit speziellen Zündern fernzündbar <li style="text-align: center;">↓ umweltfreundlich, sicher 	<ul style="list-style-type: none"> - quasi unendlich große Sprenganlagen - viele Verzögerungen denkbar je nach System - kontrollierbar - sehr genaue Zündzeiten und Verzögerungen einstellbar - Fernzündung möglich <li style="text-align: center;">↓ umweltfreundlich, sehr sicher



Für die Reduzierung von Erschütterungen sind weder die Verzögerungszeit noch einzelne Verfahren wirksam. Die wesentlichste Bedeutung der nichtelektrischen und elektronischen Zündtechniken besteht darin, die Sprenganlagen sehr groß auslegen zu können. Die Einstellung der Zündverzögerer ist nur bei elektronischen Zündern flexibel möglich. Die

nichtelektrische Zündung ist mit 17, 25, 42, 67 ms-Stufen eingeschränkt aber bisher ausreichend einsetzbar.

Physikalisch darf die Zündverzögerung zwischen den Lademengen oder Ladungsreihen nicht schneller sein als die Rissgeschwindigkeit c_c . Diese liegt etwa unter der Rayleighwellengeschwindigkeit.

Es können z. Zt. wegen fehlender Erkenntnisse keine genauen Verzögerungszeiten für die einzelnen, unterschiedlich sprengbaren Festgebirge vorgegeben werden. Folgende Tendenzen sind für Zertrümmerungssprengungen über Tage bekannt:

- ❖ Je kleinklüftiger und teilbeweglicher das Festgebirge ist - wie leicht bis mittelschwer sprengbar - umso kürzer sollte die Verzögerungszeit sein (z. B. < 25 ms).
- ❖ Je massiver ein Festgebirge ist - wie schwer bis extrem schwer sprengbar - umso langsamer sollte die Verzögerungszeit gewählt werden (z. B. > 25 ms). Es kann auch wegen Verkürzung der Dauer einer Sprengung eine kürzere Verzögerung verwendet werden.
- ❖ Werden elektronische Zünder simultan gezündet kann es infolge Anregung der Eigenfrequenz des Gebirges zu Resonanzerscheinungen kommen. In diesem Fall sind die dynamischen Auswirkungen entweder messtechnisch zu erfassen oder die Verzögerungszeiten ≤ 17 ms einzustellen.
- ❖ Für einen optimalen Ausbruch von simultan nach der Impulstheorie gezündeten Sprenganlagen sollten gleichmäßige Verzögerungszeiten zur Anwendung kommen.

Die Anordnung der Zünder erfolgt nach Bild 6.11. In den letzten Jahren hat sich die seit 1990 praktizierte redundante Zündung als die sicherste Möglichkeit der Zündeinleitung bewährt. Zur Beschleunigung der Umsetzung der Ladesäule wird bei der redundanten Zündung oft ein Booster bzw. eine Verstärkungsladung im Bohrlochtiefsten eingesetzt. Diese Vorgehensweise wurde in den vier Tagebauen bei allen Sprengungen realisiert und ist ausbruchmechanisch die bestmögliche Variante des Lösens aus dem Festgebirge.

Weitere Schlussfolgerungen sind für die Vorgänge und deren Beeinflussung von Zertrümmerungssprengungen beachtenswert:

Die Zerkleinerung des Gebirges erfolgt sukzessive vom Größtkorn zum Feinkorn. Die größeren Bestandteile werden eher durch die dynamischen Einwirkungen erfasst. Der Sprengenergie- bzw. Detonationsdruckbedarf steigt mit zunehmenden Trennflächenabständen und höheren Anforderungen an das Sprengziel. Die kinetische Energie des Haufwerkes nimmt mit den größeren Anteilen der Korngrößenzusammensetzung zu. Mit dem fiktiven, wirksamen Detonationsdruck lässt sich die Stückigkeit des Haufwerkes steuern. Der Ausbruch des Haufwerkes aus dem Gebirge kann mit der Zündfolge gelenkt werden.

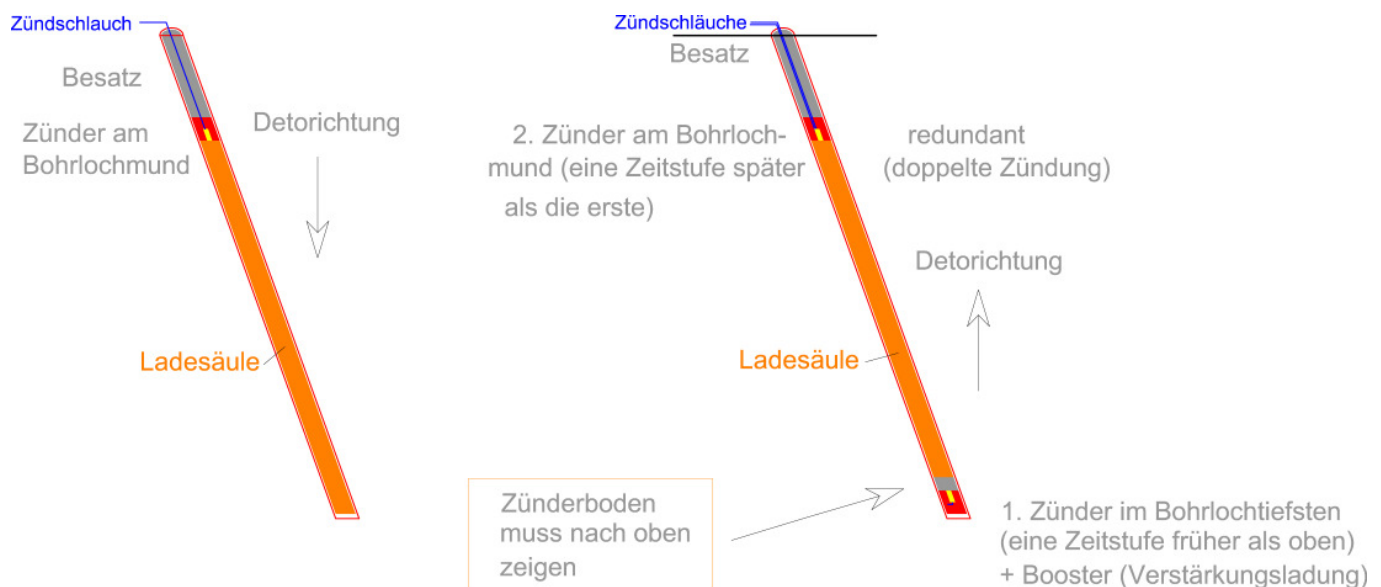


Bild 6.11: Die verschiedenen Positionen von Zündern am Bohrlochmund (linke Seite) und im Bohrlochtiefsten mit einem redundanten Zünder am Bohrlochmund (rechte Seite)

6.4 Sprengvortrieb unter Tage (3-D-Sprengungen)

Auf der Grundlage der Zuordnung des Festgebirges in die Ausbruchfestigkeit nach Bild 4.1.1 bzw. der jeweiligen Ausbruch- resp. Vortriebsklasse und des bekannten Ausbruchquerschnittes kann mit Bild 5.22 der erforderliche spezifische Sprengstoffverbrauch abgeschätzt werden. Im Gegensatz zur Sprengung im übertägigen Bereich spielen die Größe des herzustellenden Hohlraumes mit 3-D-Tunnel- oder Streckensprengungen sowie die Spannungsverhältnisse des Festgebirges eine entscheidende Rolle (Bild 5.11). Für die Wahl der einzusetzenden Sprengstoffe wird die in Bild 3.4 dargestellte Abhängigkeit genutzt, die die Kenntnis der P- und S-Wellengeschwindigkeit der Festgesteine voraussetzt. Es sollte für den Einbruch- und Hilfslochbereich ein einheitlicher, mindestens transsonisch, besser supersonisch wirkender Sprengstoff gewählt werden. Die Bohrlöcher des Einbruches und Helfer sind voll auszuladen und gleichmäßig zu besetzen. Die Zünder sollten ins Bohrlochtiefste mit dem Zünderboden zum Bohrlochmund zeigend und in die gleiche Tiefe wie die benachbarten verbracht werden. Die Zündfolge des Einbruches ist bruchmechanisch harmonisch nacheinander oder hintereinander progressiv, gleichmäßig von innen nach außen zu erweitern. Sprunghafte Zündfolgen sind zu vermeiden. Im Hilfslochbereich kann nach der Impulstheorie simultan in geraden Linien bzw. Reihen gezündet werden. Die Kranz- und Sohllöcher sind wie Spaltsprengungen zu konzipieren, d. h. der Bohrlochabstand ist $\leq 0,5$ m zu wählen und entsprechend der gewünschten Kontur zu bohren. Die besonderen Spannungsverhältnisse in den Kämpferbereichen mit hohen

Tangentialspannungen sind zu beachten. Die Ausladung der Bohrlöcher ist mit supersonisch wirkendem Sprengstoff zwingend erforderlich.

Die Zünder im Kranz und der Sohle sind am Bohrlochmund anzubringen, so dass die Ladung in Richtung zum Bohrlochtieferen durchdetoniert.

Die Dimensionierung eines Bohr- und Sprengschemas geschieht in folgenden Schritten:

- ✓ Wahl des Sprengstoffes
- ✓ Abschätzung und Festlegung des spezifischen Sprengstoffverbrauches
- ✓ Festlegung der möglichen Abschlagtiefe und des gewünschten Ausbruchquerschnittes; mögliche flächenhafte Aufteilung des Ausbruchquerschnittes bei ungünstigen Ausbruchbedingungen
- ✓ Berechnung der erforderlichen Bohrlochanzahl bei bekannten oder möglichen Bohrlochdurchmessern unter Beachtung der vollen Ausladung
- ✓ Festlegung der Einbruchs- und Hilfslöcher je nach Einbruchart und Gebirgsverhältnissen auf der Grundlage der erforderlichen Bohrlochanzahl
- ✓ Auslegung der Zündfolge nach den o. g. Prinzipien und unter Einbeziehung lokaler Bedingungen im Festgebirge

Die Bilder 6.12 bis 6.16 zeigen Beispiele von Bohr- und Zündschematas nach den genannten Grundsätzen mit verschiedenen Einbrucharten. Der im Sinne der Grundsatzempfehlungen optimale Einbruch ist der Paralleleinbruch. Mit diesem Vorgehen können die vorgestellten Wirkungsweisen optimal umgesetzt werden (Bild 6.12).

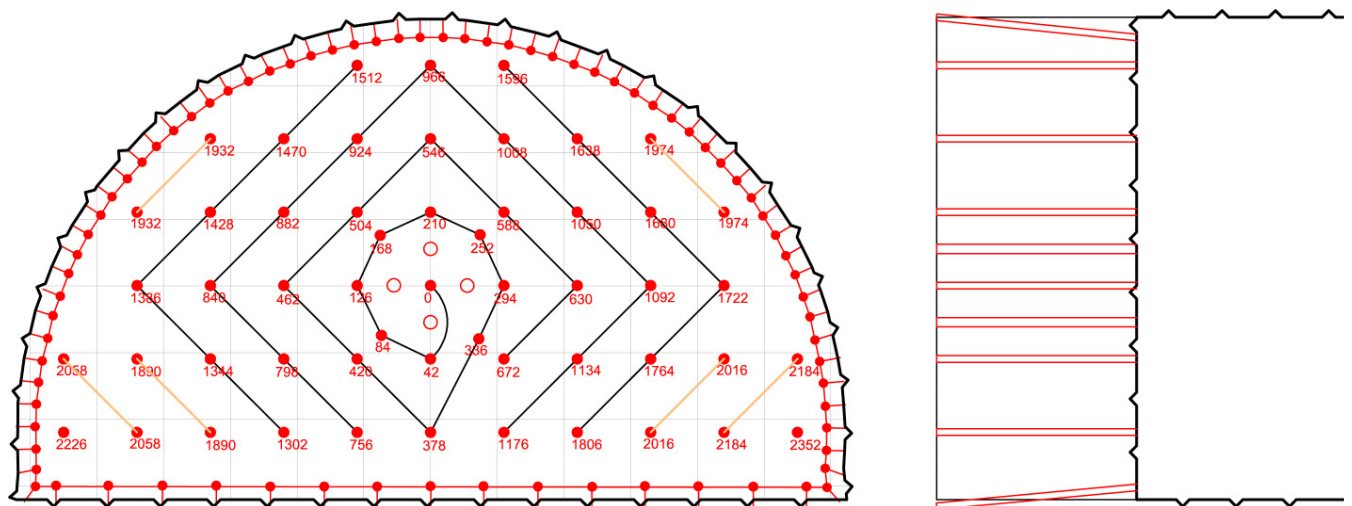


Bild 6.12: Paralleleinbruch mit spiralförmiger Zündfolge (nichtelektrisch) unter Beachtung der Impulstheorie; im Einbruch sind 4 Großbohrlöcher (Freilöcher)

Im Bergbau und Tunnelbau unter Tage können elektrische, nichtelektrische und elektronische Zündverfahren getrennt und kombiniert eingesetzt werden.

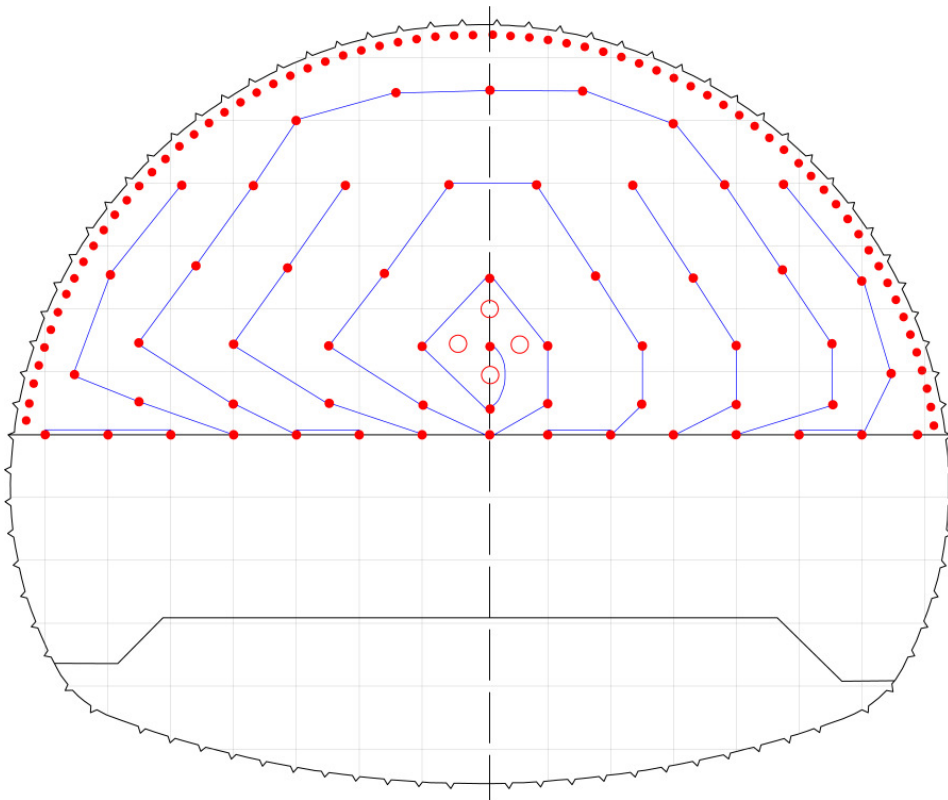


Bild 6.13: Bohrschema eines Paralleleinbruches mit spiralförmiger Zündfolge für ein mittelschwer sprengbares/sehr gebräches Festgebirge

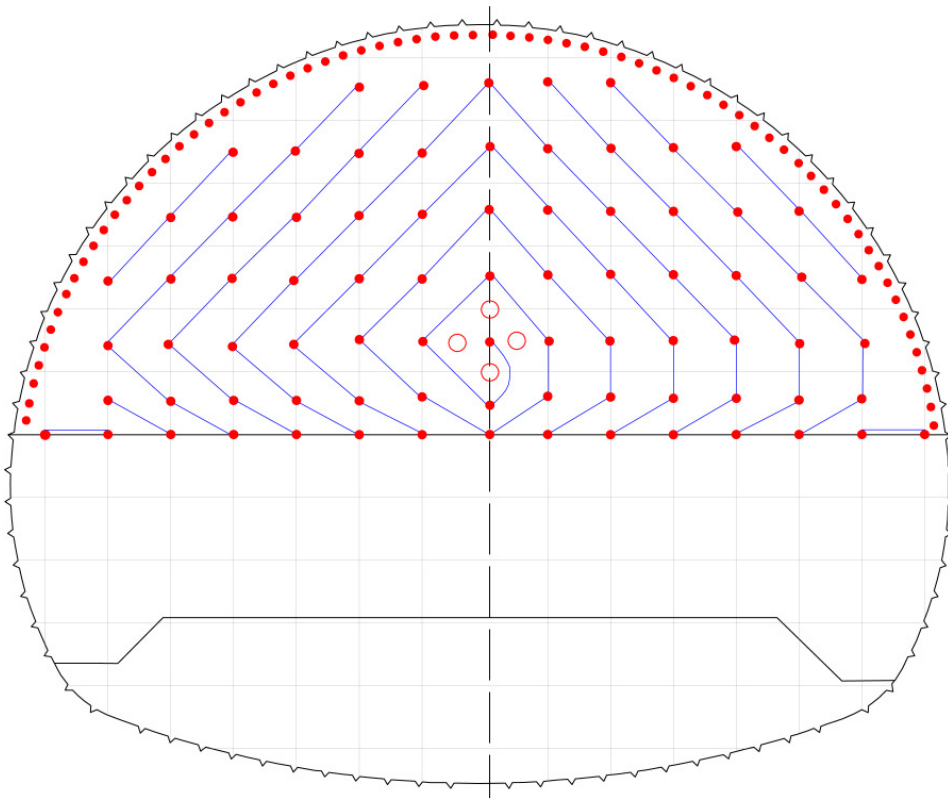


Bild 6.14: Bohrschema eines Paralleleinbruches mit spiralförmiger Zündfolge für ein schwer sprengbares/gebräches Festgebirge

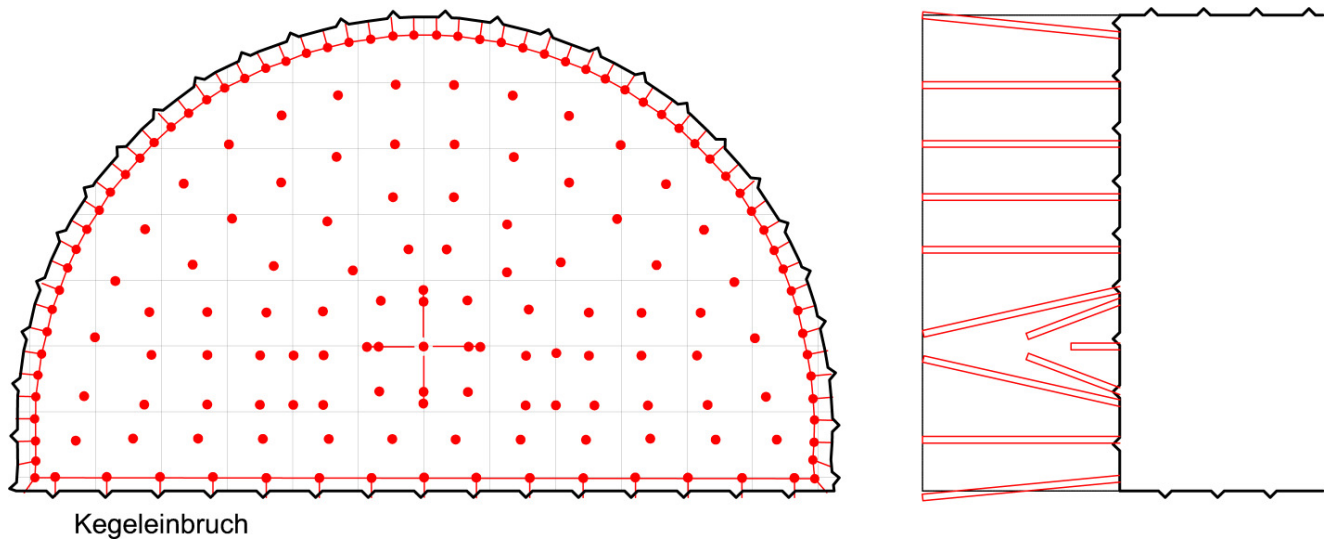


Bild 6.15: Beispielhaftes Bohrschema eines Kegleinbruches

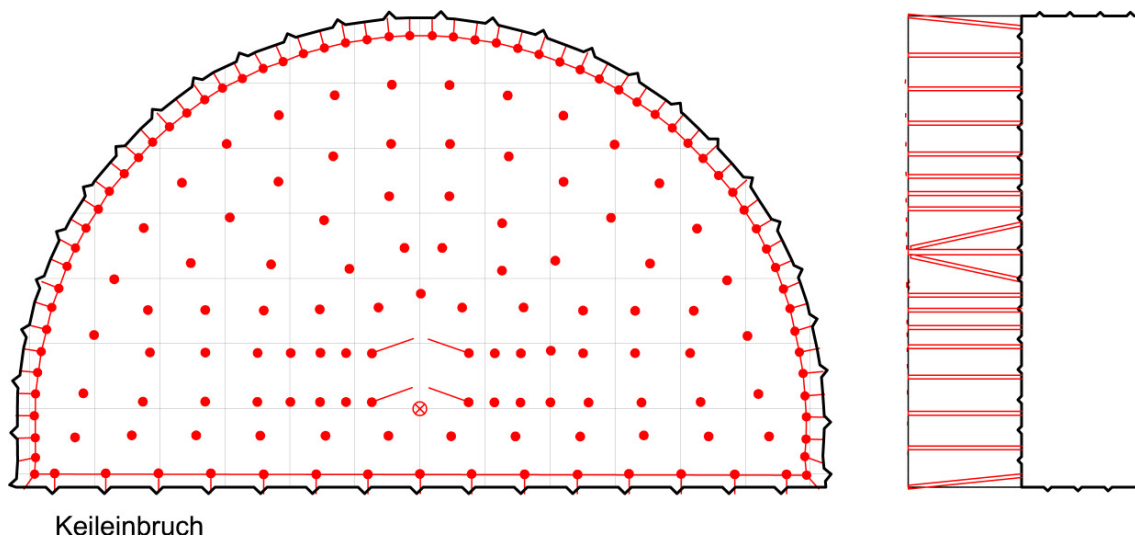


Bild 6.16: Beispielhaftes Bohrschema eines Keileinbruches

Die beschriebenen Grundsätze sind mit nichtelektrischen, elektronischen oder kombinierten Zündverfahren beider Vorgehensweisen realisierbar. Das neue Sprengmodell mit der Berechnung des fiktiven Detonationsdruckes ist für die 3-D-Verhältnisse unter Tage unter Einbeziehung des sonischen Effektes anwendbar.

7 Gesicherte Erschütterungsprognose

7.1 Erarbeitung von statistisch gesicherten Prognose-Beziehungen

Bereits im Forschungsbericht 2009 [MÜ 09a] wurde analytisch und statistisch herausgearbeitet, dass die bisherige, nach wie vor verbreitete Vorgehensweise der Sprengerschütterungsprognose folgende Mängel aufweist [DI 1/97, DI 3/99, KO 58, LÜ 86, MÜ 07, RU 11, SI 00, SP 13, ST 11]:

- Die Lademengen pro Zündzeitstufen - Beziehungen und alle Ableitungen davon sind statistisch nicht gesichert.
- Der Sprengstoff geht als Masse ohne Berücksichtigung der Dichte und Detonationsgeschwindigkeit ein.
- Die sonische Wirkung mit dem komplexen Zusammenhang von Zertrümmerung und Erschütterung wird nicht berücksichtigt.
- k, n, m als zufällige Faktoren und Exponenten werden empirisch ermittelt oder vorgegeben.
- Messungen des Nahbereiches werden unkritisch einbezogen.
- Die Ergebnisse von Dehnungsmessungen bleiben unberücksichtigt.

Aus diesen Mängeln ergeben sich die Nachteile:

- Die Erschütterungsprognose ist willkürlich beeinflussbar.
- Aus den Beziehungen können keine gesicherten bohr-, spreng- oder zündtechnischen Parameter oder Maßnahmen zur Erschütterungsbeeinflussung abgeleitet werden.
- Durch die Festlegung der Lademengen pro Zündzeitstufe werden erhebliche Einschränkungen der Sprengarbeit bewirkt, die insbesondere zu häufigen Sprengungen führen und mit denen keine optimale Zertrümmerung erreicht werden kann.
- Für unter Tage Sprengungen werden keine Prognosebeziehungen angegeben.

Die im Forschungsbericht 2009 [MÜ 09a] enthaltenen neuen, statistisch gesicherten Beziehungen:

- fiktive Impuls-Abstandsbeziehung (Bild 3.12) und
- fiktive Energie-Abstandsbeziehung (Bild 3.12)

werden prinzipiell wie folgt für unter und über Tage Sprengungen in Arbeitsschritten erarbeitet:

- 1) Es werden mindestens drei Sprengungen um die Sprenganlagen mit wenigstens vier 3-Komponenten-Geophonen messtechnisch begleitet.
- 2) Die Entfernungen r zwischen Sprengstelle und Messorten sind variabel sowohl im Nah- als auch im Fernbereich zu gestalten, damit eine objektive Abhängigkeit gemäß Aufgabenstellung zwischen der maximalen Schwinggeschwindigkeit und der Entfernung ermittelt werden kann. Die Bestimmung von r muss m-genau erfolgen.
- 3) Die Geophone sollten mindestens ≥ 2,5 kg Masse aufweisen, damit eine gute Kopplung mit dem Untergrund erfolgt; ggf. sind die Geophone durch Gewichte zu beschweren.
- 4) Im Nahbereich von 0 - 150 m von der Sprengstelle sind vorzugsweise Dehnungssensoren auf FBG-Basis aufzustellen und erforderlichenfalls mit 3-Komponenten-Geophonen zu kombinieren.
- 5) Von den messtechnisch begleiteten Sprengungen sind zusätzlich zu erfassen
 - Füllungsgrad (durchschnittlich ohne Besatz)
 - maximales Sprengstoffvolumen in einem Bohrloch für 2-D-Zertrümmerungssprengungen bzw. 3-D-Sprengungen unter Tage im Einbruch und Hilfslochbereich; oder gesamtes Sprengstoffvolumen einer 1-D-Spaltsprengung bzw. der Kranz-, Sohllöcher mit gemeinsamer Zündung einer 3-D-Sprengung
 - Sprengstoffdichte des Sprengstoffes
 - Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes

Erforderlichenfalls sollten die Sprengstoffeigenschaften vom Lieferanten übergeben oder messtechnisch überprüft werden. Bei der Auswertung der Messergebnisse muss einerseits die Hauptabstrahlrichtung in das stehen bleibende Festgebirge sowie die vorhandene Anisotropie des Trennflächengefüges sowie der Gesteinsfolge beachtet werden.

- 6) Die Messungen werden statistisch gemäß Bild 7.1 ausgewertet. Die berechnete Regressionsgleichung enthält den negativen Exponenten -1,8847. Dieser wird bei der weiteren multiplen Regressionsanalyse verwendet (vergleiche Bild 7.2). Mit 95,4 % ist die Beziehung als statistisch gesichert zu deklarieren und im Rahmen der Eingangswerte gültig. Neue Rahmenbedingungen erfordern eine neue Messung und Berechnung der Erschütterungsprognosebeziehung.

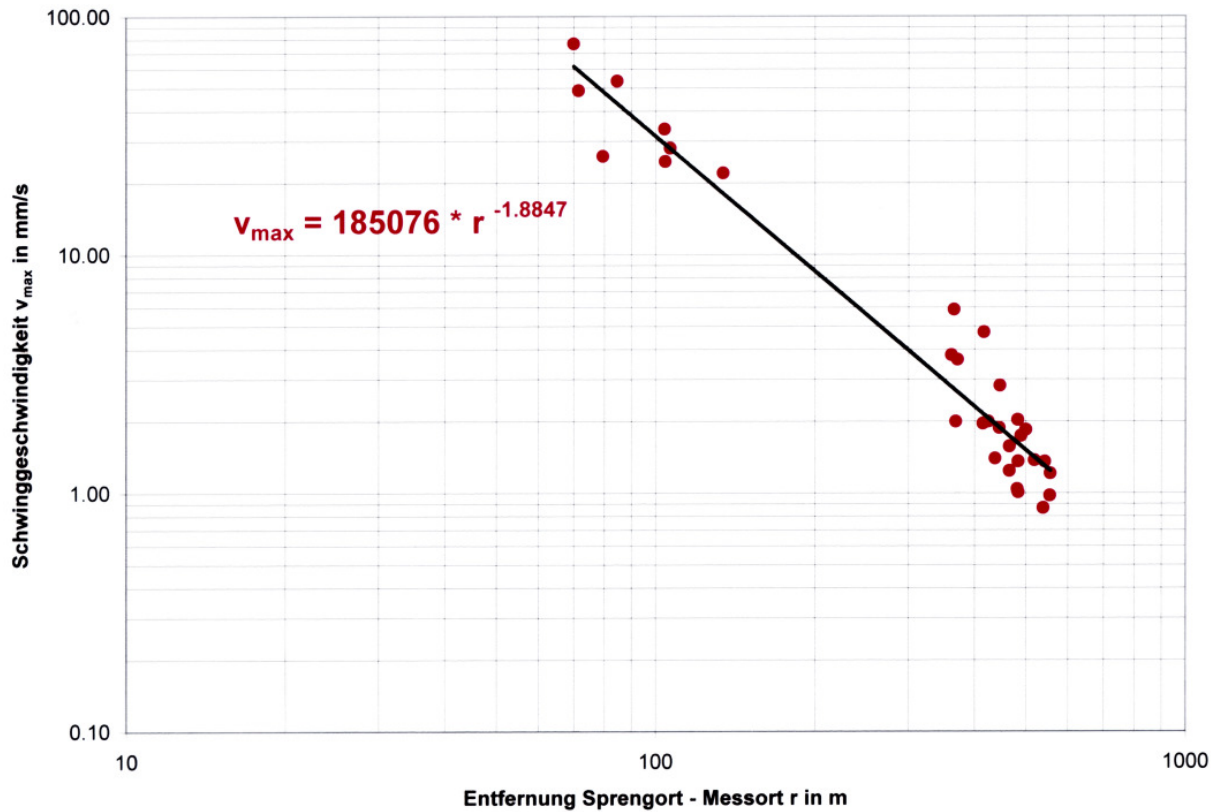


Bild 7.1: Beispiel einer statistischen Auswertung der Erschütterungsmessungen im Schwinggeschwindigkeits-Abstandsdiagramm (Basalt-Tagebau Unter-Widdersheim)

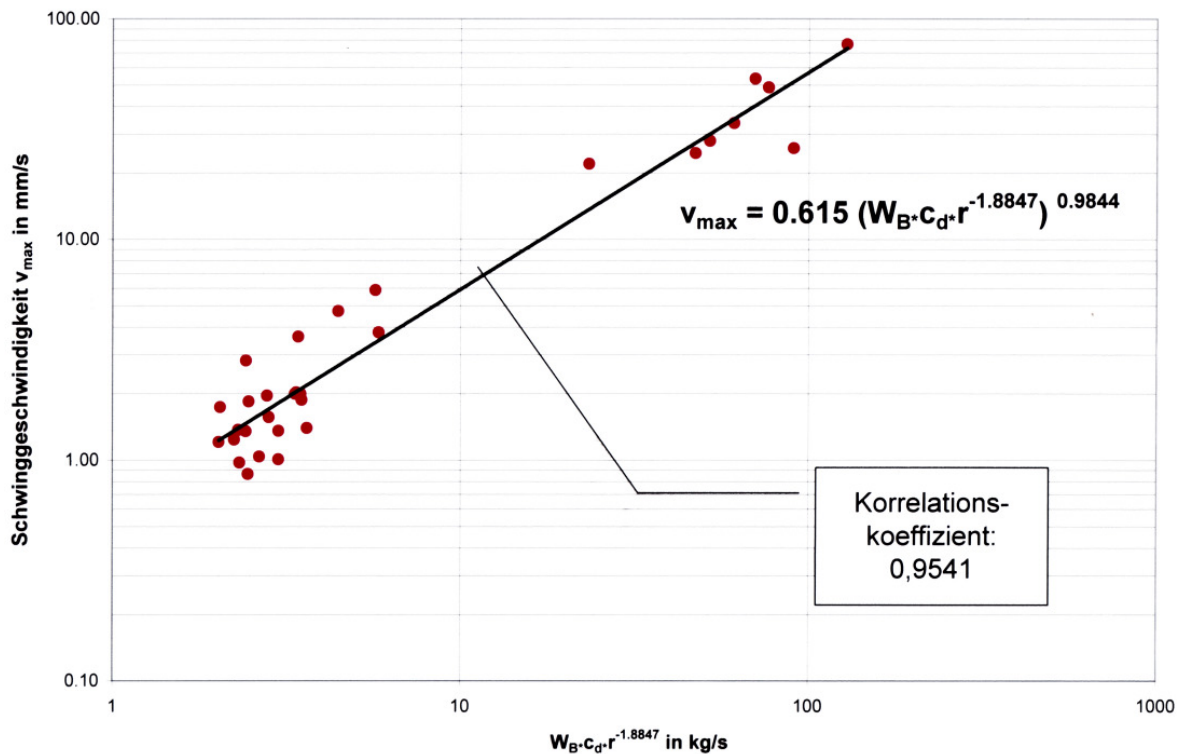


Bild 7.2: Beispiel der multiplen Regressionsanalyse unter Verwendung des Exponenten -1,8847 vom Bild 7.1 zur Ermittlung der statistisch gesicherten, fiktiven Impuls-Abstandsbeziehung (Basalt-Tagebau Unter-Widdersheim)

- 7) Zwischen der Schwinggeschwindigkeit und der dynamischen Dehnung besteht eine lineare Abhängigkeit [MÜ 9a, MÜ 10a, MÜ 11c, MÜ 13, RO 10]. Aus diesem Grunde werden in den Bildern 7.3 bis 7.6 mit den wichtigsten, verfügbaren Messergebnissen die Dehnungs-Abstandsbeziehungen für vier Tagebaue berechnet. An einem Beispiel für den Rhyolith-Tagebau Großsteinberg ist mit den negativen Exponenten der Regressionsgleichung aus Bild 7.6 -2,9998 die Dehnungs-fiktive Energie-Abstandsbeziehung in Bild 7.7 abgeleitet worden. Der Korrelationskoeffizient ist von mittlerer Größenordnung, die durch die Streuung der Messwerte infolge der wechselhaften Bedingungen im Tagebau Großsteinberg verursacht wird.
- 8) Die Gültigkeit der allein auf der Grundlage von Messergebnissen und statistischen Berechnungen objektiv erarbeiteten
- fiktiven Impuls-Abstands- und
 - fiktiven Energie-Abstandsbeziehungen
- ist durch die jeweiligen Eingangswerte begrenzt. Wenn beispielsweise die Entfernung r von 50 - 300 m beträgt, kann man die Regressionsgleichung nicht weiter als $\pm 20\%$ dieser Werte als gültig ansehen. Diese muss nach oben bei $r = 360$ m begrenzt werden. Die gleiche Umsicht ist geboten, wenn verschiedene oder andere Sprengstoffe eingesetzt werden. Infolge des Einflusses der sonischen Wirkung muss bei Änderung der Detonationseigenschaften der verwendeten Sprengstoffe eine neue Messkampagne der Erschütterungserfassung eingeleitet werden. Für die Lademenge und -volumina gilt ebenfalls die 20 % Streubreite.
- 9) Es gibt keine universelle Erschütterungsprognose. Die vorgenannten Beziehungen müssen für jede Felsbaustelle, für jeden Tagebau, Bergbaubetrieb und Tunnelbau unter Tage eigens entsprechend der Bedingungen nach den vorgenannten Punkten ermittelt werden. Die international angebotenen Beziehungen und statistischen Methoden sind nach den in diesem Bericht aufgearbeiteten Ergebnissen nicht brauchbar, um die Umweltbedingungen gezielt und bewusst zu beeinflussen.

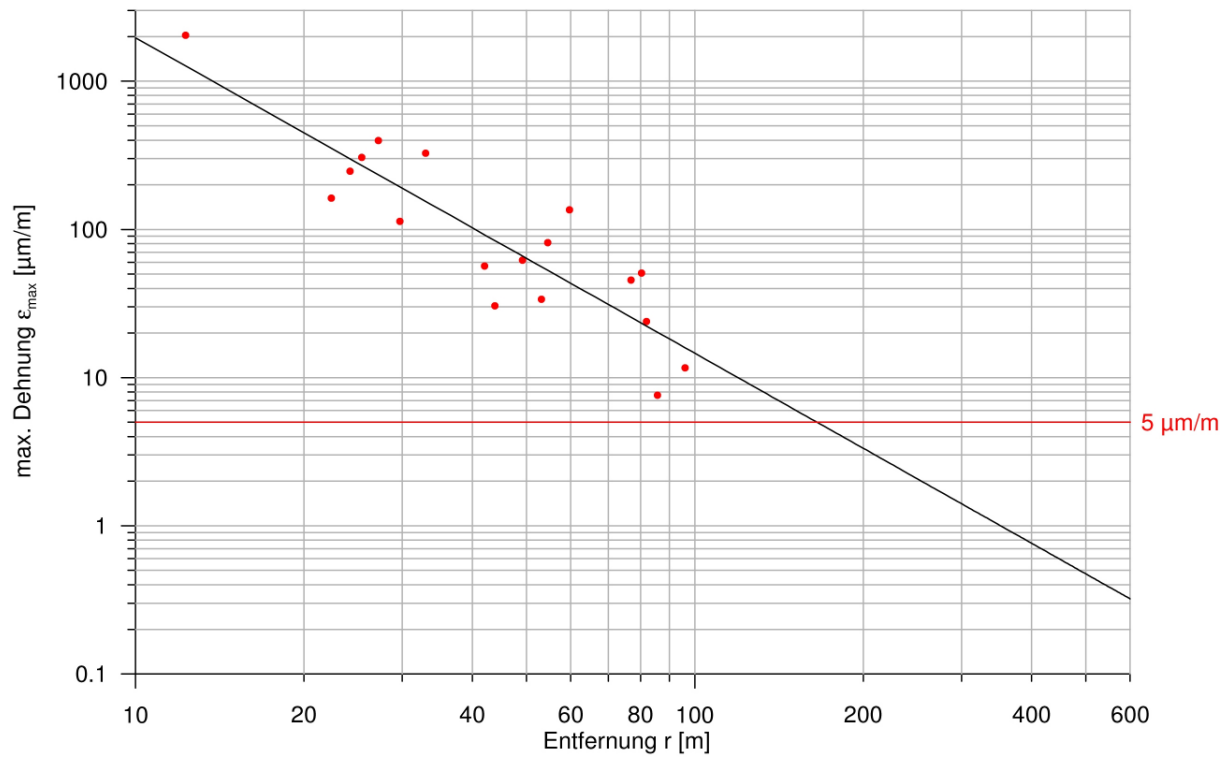


Bild 7.3: Dehnungs- Abstandsdiagramm für den Tagebau Oßling

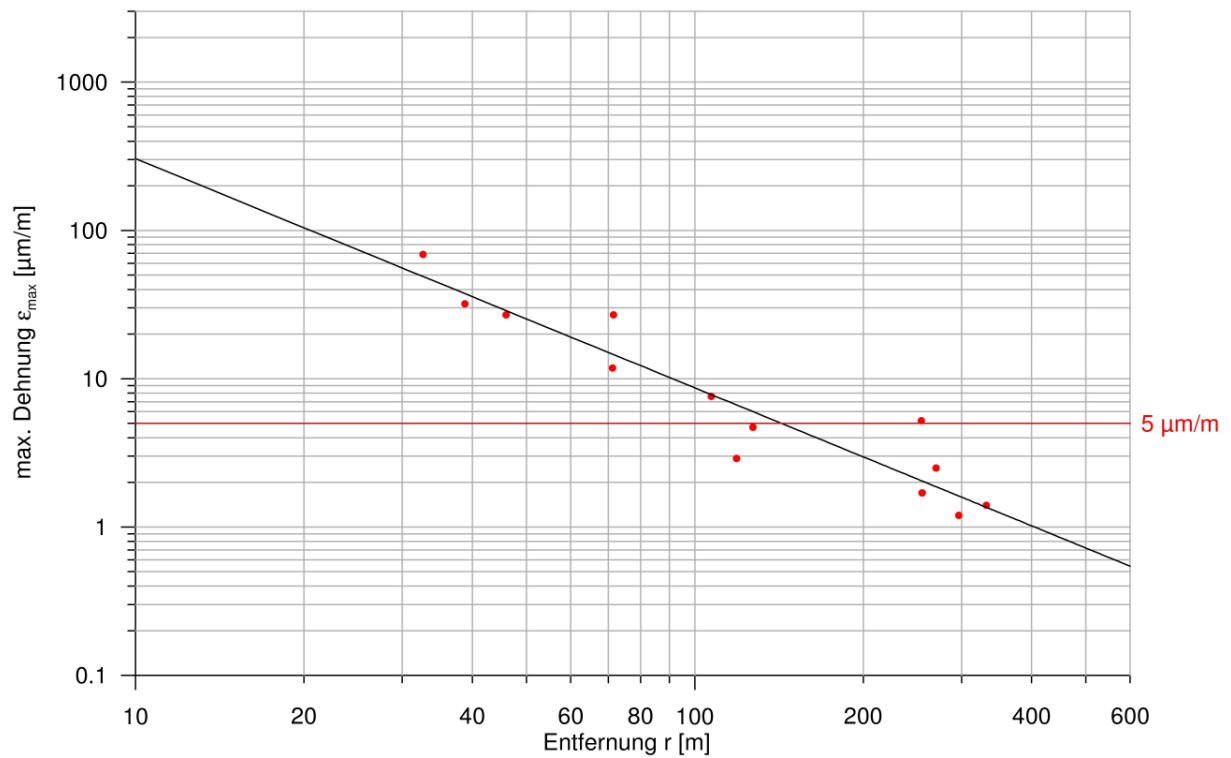


Bild 7.4: Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Koschenberg

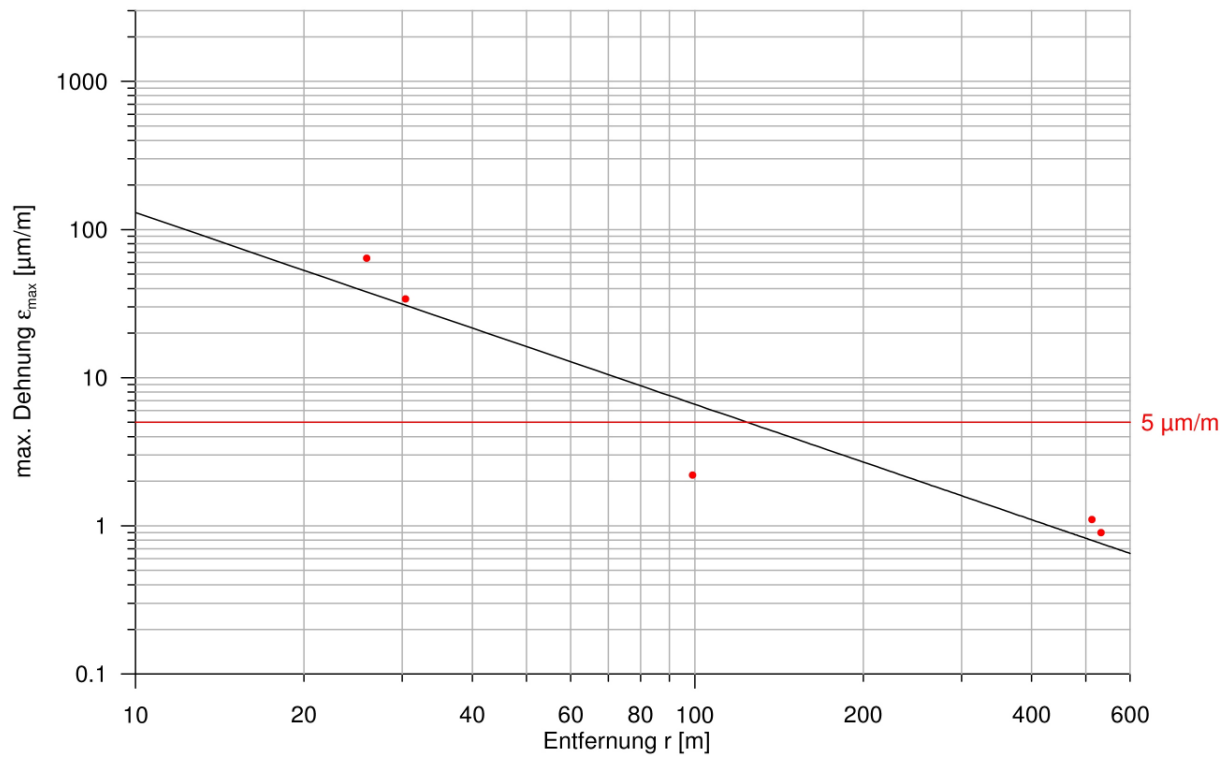


Bild 7.5: Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Görzdorf

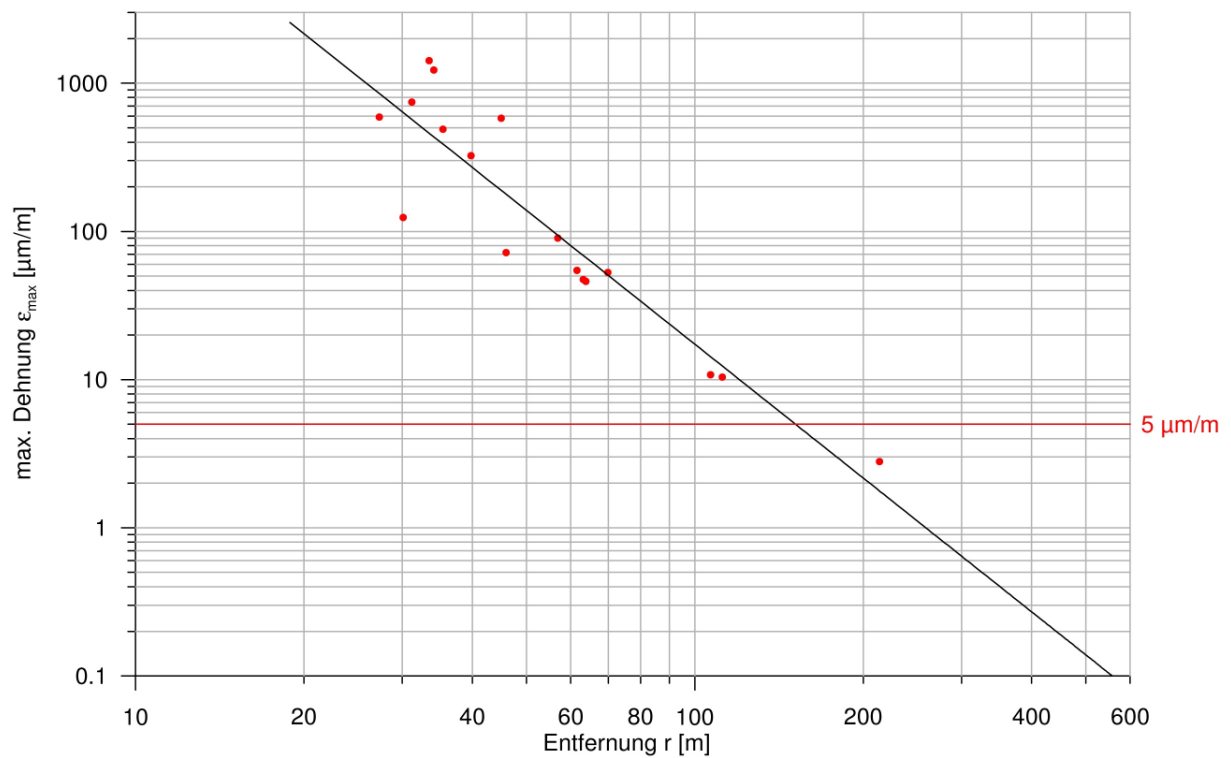


Bild 7.6: Dehnungs-Abstandsdiagramm für den Tagebau Großsteinberg

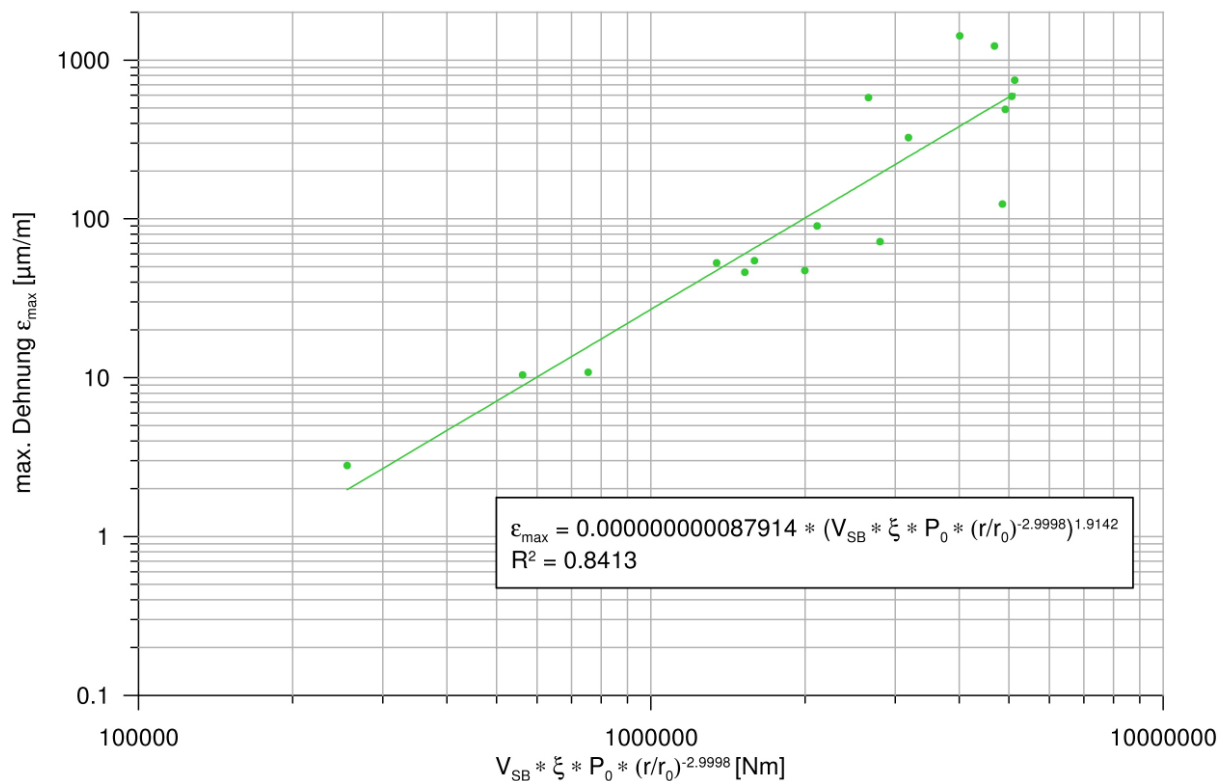


Bild 7.7: Beispielhafte Dehnungs-fiktive Energie-Abstandsbeziehung für die Erschütterungsprognose im Tagebau Großsteinberg

10) Wenn letztlich für die Sprengbereiche über und unter Tage eine solche statistisch gesicherte Prognosebeziehung für die entstehenden Erschütterungen vorliegt, kann die Umweltbeeinflussung bewusst gesteuert werden:

- Die Lademenge pro Bohrloch bestimmt die Erschütterungsimmissionen und es können bei entsprechender Änderung die möglichen Erschütterungen angepasst werden (Beispiel: Oßling, Burgbernheim, Nieder-Beerbach, Koschenberg, Tunnel Ramholz, Markovec).
- Für bestimmte Sprenganlagen ist die Möglichkeit der erheblichen Vergrößerung der Sprengungen gegeben, so dass die Häufigkeit gesenkt werden kann (Beispiel: Tagebau Koschenberg, Oßling, Burgbernheim, Nieder-Beerbach, Elbingerode, Winterberg).
- Die Erhöhung der sonischen Wirkung vermindert die Erschütterungen (Beispiel: Tagebau Winterberg, Oßling, Burgbernheim, Tunnel Markovec, Bautzen).

Die sicheren Prognosebeziehungen (13, 14, 15, 16) für Erschütterungen gestatten die Umwelteinwirkungen bewusst zu steuern und bei Erfordernis zu verbessern:

fiktive Impuls-Abstandsbeziehung

$$ppv_{\max} = k \left(W_B \cdot c_d \cdot \frac{r^{-n}}{r^0} \right)^m \quad (13)$$

oder

$$\varepsilon_{\max} = k' \left(W_B \cdot c_d \cdot \frac{r^{-n'}}{r^0} \right)^{m'} \quad (14)$$

fiktive Energie-Abstandsbeziehung

$$ppv_{\max} = k \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \frac{r^{-n}}{r^0} \right]^m \quad (15)$$

oder

$$\varepsilon_{\max} = k' \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \frac{r^{-n'}}{r^0} \right]^{m'} \quad (16)$$

Ihre Gültigkeit wurde durch verschiedene Untersuchungen im Rahmen der Forschungsarbeit mehrfach objektiv nachgewiesen und in der Praxis bestätigt.

7.2 Erschütterungszonen und Vorschlag von zulässigen Anhaltswerten

Die vielfältigen Messergebnisse der Sprengerschütterungsimmissionen im Rahmen der Forschungsthemen mit FBG-Dehnungssensoren und Geophonen führten zu der Überlegung, die vorhandenen Normen zur Beurteilung der Erschütterungen zu überprüfen. Durch die Möglichkeit des statistischen Vergleiches der Schwinggeschwindigkeits- mit den Dehnungsmessungen ist eine objektive Beurteilung der Einwirkung auf die Bausubstanz geschaffen worden. Gelingt es eindeutige Erkenntnisse abzuleiten, können die vorhandenen Anhaltswerte der DIN 4150 - 1 bis 3 - kritisch hinterfragt und durch aktuelle, nachgewiesene Zusammenhänge ergänzt oder gar verbessert werden. Somit wird man in der Lage sein, die realen Umweltbelastungen durch dynamische Einwirkungen objektiv einzuschätzen.

In den Dehnungs-Abstandsdiagrammen Bilder 7.3 bis 7.6 wurde mit der roten Linie die Dehnungsgröße 5 µm/m markiert. Alle Messwerte die kleiner als 5 µm/m sind, können auch bei ständiger Belastung einem Baustoff oder Bauwerk physikalisch begründbar keinen Schaden zufügen.

Vergleicht man die Regressionsgeraden aller Tagebaue fällt auf, dass in einer Entfernung von durchschnittlich ≥ 150 m kein Messwert die 5 µm/m Marke überschreitet bzw. nur geringfügig um diese Größe streut.

Das bedeutet für die Praxis, dass über eine Entfernung von ≥ 150 m von der Sprengstelle keine bauwerksschädigenden Erschütterungen auftreten. Die Sprenganlagen sollten allerdings mit maximalen Bohrlochdurchmessern von 110 mm abgebohrt werden. Höhere Lademengen in größeren Bohrlochdurchmessern können die für 150 m im Zusammenhang mit den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit belegbaren Erfahrungen auf 180 ... 200 m verändern.

Nutzt man diese empirisch festgelegte, grenzwertige Größe der Dehnung von $5 \mu\text{m/m}$ im Vergleich mit der Schwinggeschwindigkeit gemäß Bild 7.8, so ergibt sich auf der Grundlage von Messungen aus den verschiedenen Tagebauen Oßling, Großsteinberg und Koschenberg eine

Schwinggeschwindigkeit von 26,6 mm/s.

Das bedeutet, dass Schwinggeschwindigkeiten unter 26,6 mm/s mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit einem Bauwerk gleich welcher Art keinen Schaden zufügen können.

Vor diesem nachweisbaren Hintergrund ist es anzuraten, die viel zu niedrigen Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 den Erkenntnissen neu anzupassen (Bild 7.8). Diese niedrigen Werte führten in der Praxis zu umweltschädigenden, -belästigenden Sprengungen, zu Betriebsstilllegungen und zahlreichen gerichtlichen Auseinandersetzungen mit hohem wirtschaftlichen Schaden.

Die ermittelten bleibenden Verformungen ϵ_{f} im Nahbereich der Sprengungen aus 6 Tagebauen stellen eine wichtige Neuheit für die Behandlung von Erschütterungsproblemen dar (Bild 7.9). Derartige Verformungen sind mit Geophonen nicht erfassbar, so dass empfohlen wird, künftig für den Nahbereich bis 150 m besser Dehnungssensoren einzusetzen. Wenn an einem Bauwerk, Objekt oder Gebäude mehrfach eine bleibende Verformung zurückbleibt, wird nach entsprechend häufiger Belastung ggf. ein Riss aufbrechen. Glücklicherweise ist es im Bergbau über und unter Tage allerdings infolge des Fortschreitens vom Abbau nicht möglich, an einem Gebäude mehrfach größere dynamische Belastungen bei gleichem Abstand r zu erzeugen.

Dennoch wird vorsorglich eine Verformungszone um eine Sprengung in einem Radius von 150 m abgegrenzt. Im Einzelfall kann die Größe durch entsprechende Messungen erforderlichenfalls verändert werden.

In Auswertung der Messergebnisse mit dem FBG-Dehnungssensor und mehreren Geophonen in unterschiedlichsten Festgebirgen werden für die Verhältnisse über Tage und Sprengungen mit Bohrlochdurchmessern ≤ 110 mm die Zonen der Verformung und

Erschütterungen im Bild 7.10 abgegrenzt. Die angegebenen Werte von ε_{if} (Verformung), ε (Dehnung) und ppv (Schwinggeschwindigkeit) sind als Anhaltswerte zu verstehen. Im Einzelfall können die Werte der Schwinggeschwindigkeit stärker streuen als in der vorgeschlagenen Einteilung.

Durch die Zonierung der Erschütterungsimmissionen wird belegt, dass in einem Abstand r von ≥ 150 m Gebäude, Objekte und Bauwerke mit großer Wahrscheinlichkeit und in einem solchen von ≥ 300 m mit hoher Sicherheit keinen Schaden erleiden.

Die Verformungszone bis 150 m bedarf einer besonderen Beachtung, weil neben den Größenordnungen der Schwingungen gleichzeitig bleibende Verformungen des Untergrundes oder am Bauwerk auftreten können. In die Einteilung der Zonen gemäß Bild 7.10 gingen die Ergebnisse nach Bild 7.8 und 7.9 ein, so dass im Bereich der Verformungszone

- ❖ Schwinggeschwindigkeiten ppv ≥ 25 mm/s
- ❖ bleibende Verformungen $\varepsilon_{if} \geq 1$ $\mu\text{m}/\text{m}$ und
- ❖ Dehnung von ≥ 5 $\mu\text{m}/\text{m}$

erwartet werden. Die vorgeschlagene Zoneneinteilung wird die Bewertung von Erschütterungsproblemen und die zahlreichen Auseinandersetzungen mit den Betroffenen erleichtern. Man muss den durch Erschütterungen ausgesetzten Bürgern in den Gebäuden allerdings den Unterschied zwischen der

- Schadenswirkung von dynamischen Einwirkungen in Form der Sprengerschütterungen auf Bauwerke sowie Gebäude und der
- Erschütterungsempfindlichkeit, Wahrnehmbarkeit bzw. Sensibilität des Menschen gegenüber Erschütterungen

physikalisch besser erklären. Während der Mensch oft bereits eine Schwinggeschwindigkeit von 0,2 mm/s wahrnimmt, ist das Gebäude in dem er sich aufhält über 100fach unempfindlicher.

Die negative Wahrnehmung des Menschen steht eindeutig im Widerspruch zu den objektiven Auswirkungen der Erschütterungen auf Gebäude [DRI 95].

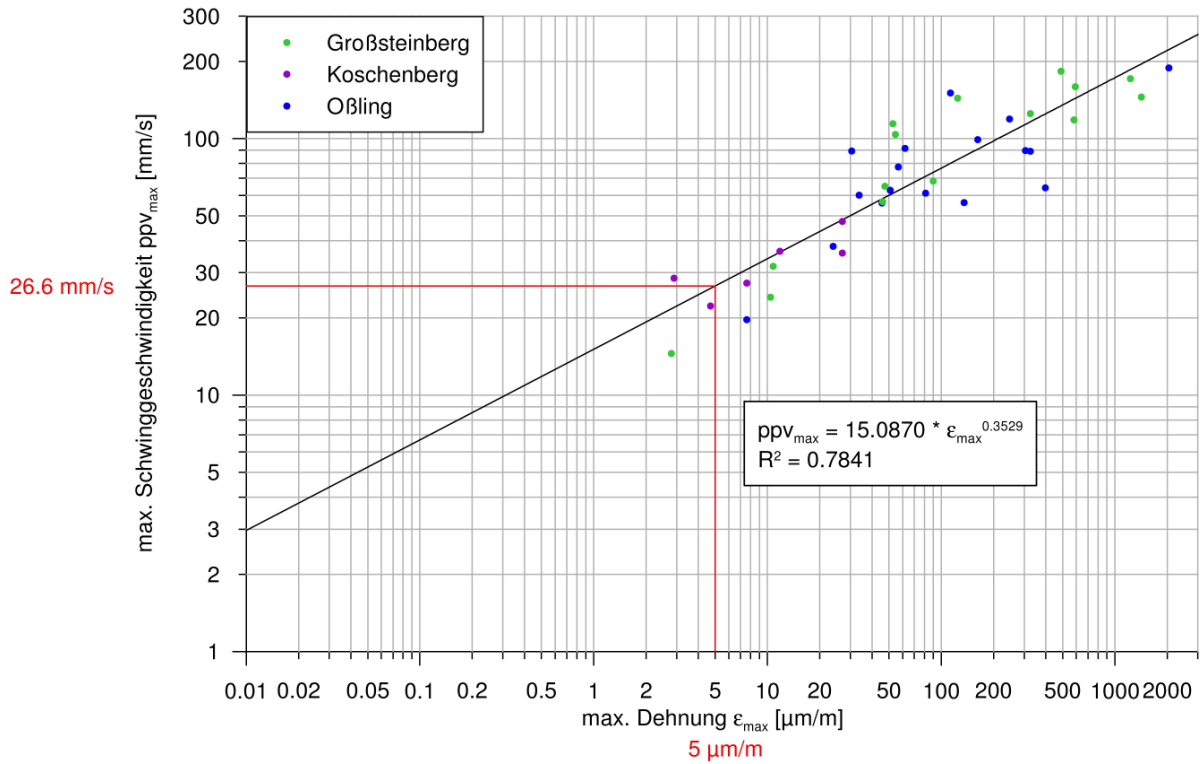


Bild 7.8: Zusammenhang zwischen Schwinggeschwindigkeit und Dehnung (Maximalwerte) - Messergebnisse aus drei Tagebauen Großsteinberg, Koschenberg und Oßling

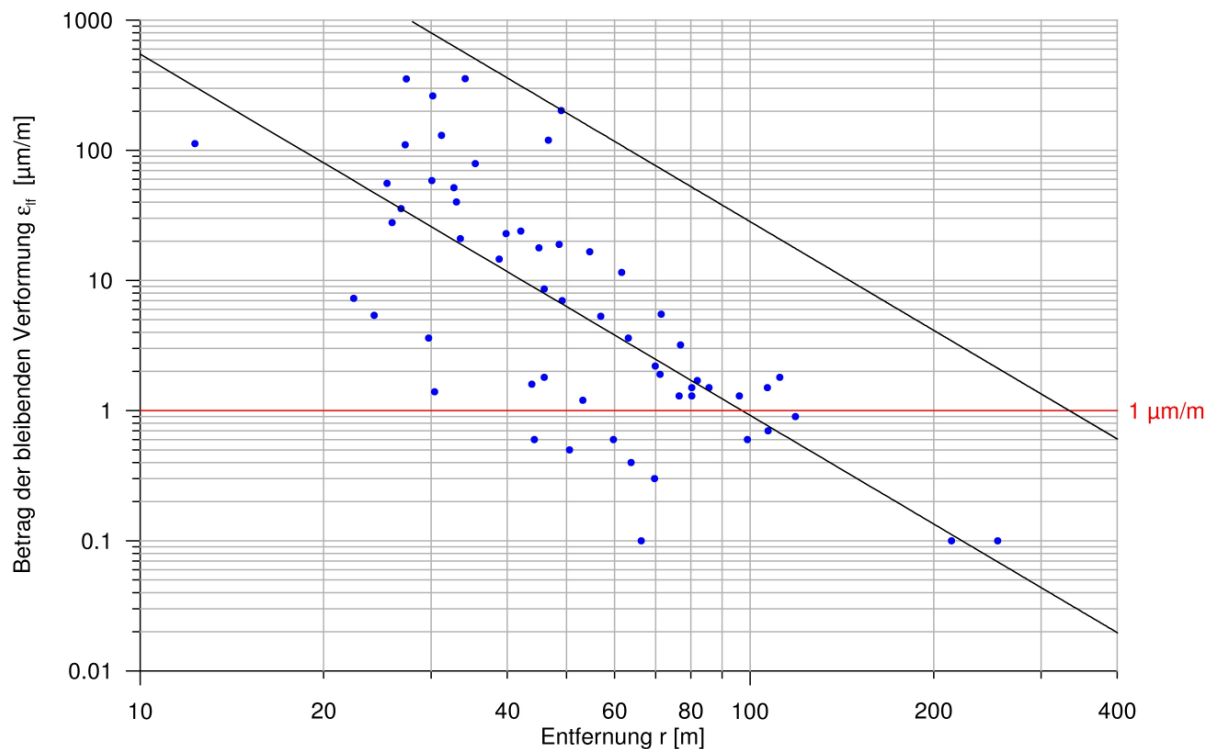


Bild 7.9: Die ermittelte bleibende Verformung ϵ_{If} bei den Dehnungssensoren in Beziehung zur Entfernung r von der maximalen Sprengladung zum Messpunkt; die rot markierte $1 \mu\text{m/m}$ Linie ist der festgelegte Grenzbereich; bei Werten $< 1 \mu\text{m/m}$ kann in einem Festgestein/Baustoff auch bei zig-facher Belastung kein Bruch/Riss entstehen

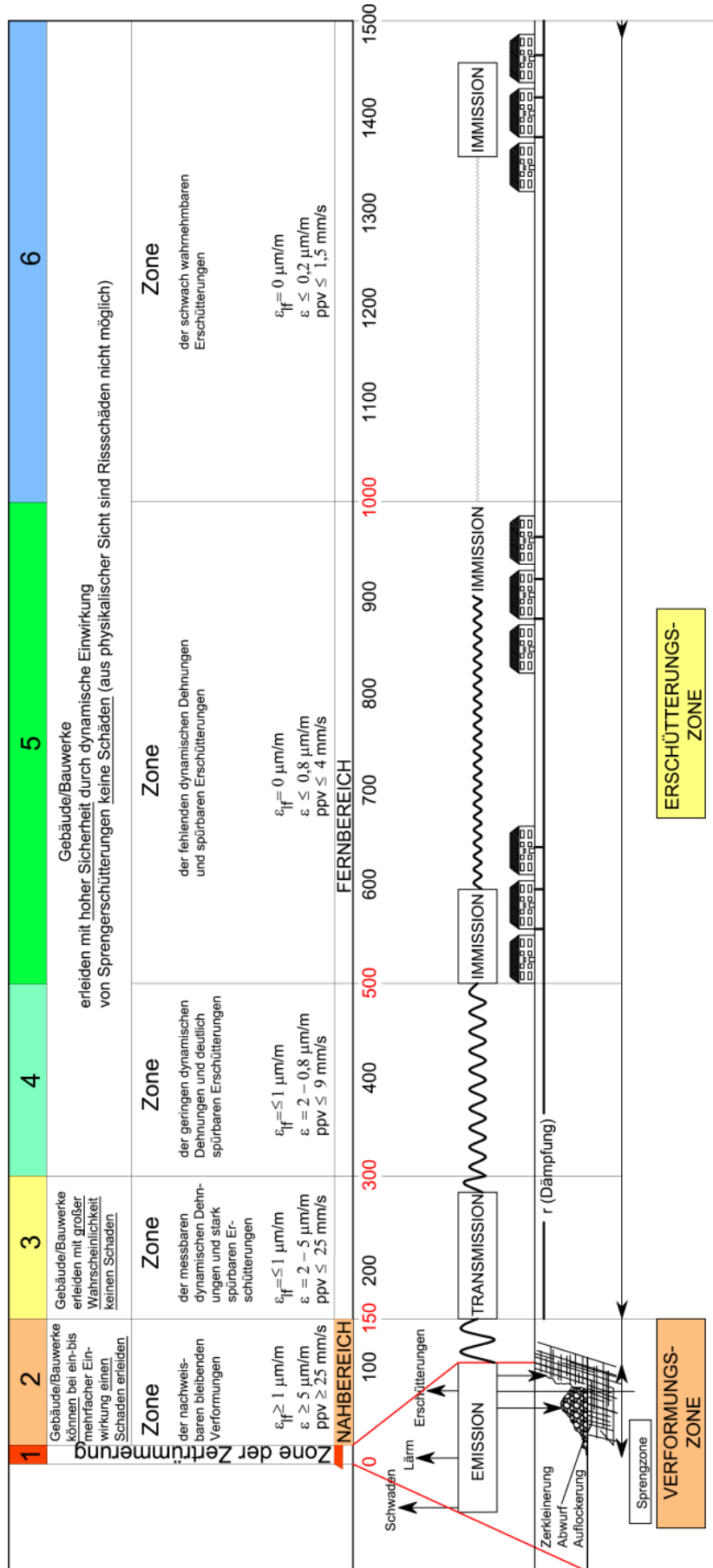


Bild 7.10: Die Zonen der Verformung und Erschütterungen um eine Sprengung über Tage mit Bohrlochdurchmesser $\leq 110 \text{ mm}$ (die angegebenen Werte von ε_{if} , ε und ppv sind als Anhaltswerte zu verstehen)

Eine Schwinggeschwindigkeit von 25 mm/s könnte bei bestimmten, empfindlichen Anwohnern ernsthafte Ängste auslösen. Es muss in diesem Zusammenhang vermerkt werden, dass Sprengerschütterungen kurzzeitige Beeinträchtigungen von meist < 1 s darstellen. Eine solche Einwirkung ist eher von den meisten Betroffenen hinnehmbar, als eine dauerhafte Erschütterung von 25 mm/s. Dazu gibt es berechtigterweise besondere Festlegungen.

Die Erhöhung der Anhaltswerte für kurzzeitige Erschütterungen von ≤ 2 s Dauer könnte daher bei entsprechender Aufklärung in der Sprengpraxis, den Medien und im Internet auf der Grundlage der Ergebnisse mit dem zuständigen Normenausschuss (NA 005-51-05 AA „Schwingungsfragen im Bauwesen; Einwirkungen auf Bauwerke und Bauteile“) behandelt werden.

Für die Änderung der DIN 4150, Teil 3 sprechen nicht nur die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit, sondern die zahlreichen Beobachtungen und Erfahrungen in den letzten Jahren [DO 00, FL 93, KI 03, MA 12, ST 11]. Die Tabelle 7.1 enthält die Vorschläge für die zulässigen Anhaltswerte der

- maximalen Dehnung ϵ in $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen senkrecht zur Quelle
- maximalen Schwinggeschwindigkeit ppv in mm/s gemessen in allen Ebenen x, y und z.

Die Bauwerke werden in 5 Kategorien eingeteilt. Die bisherige Einteilung genügt den praktischen Anforderungen nicht, so dass eine Erweiterung vorgenommen werden musste. Das Bild 7.11 vermittelt im Vergleich zur bisherigen Vorgehensweise die neuen Änderungen der Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz. Es ist zu erkennen, dass die Wohnbauten, Geschäftshäuser und solche mit höherer Erschütterungsempfindlichkeit unter der festgestellten Grenze bei $5 \mu\text{m}/\text{m}$ Dehnung bzw. 25 mm/s Schwinggeschwindigkeit liegen. Für diesen Bereich sind Schäden mit großer Wahrscheinlichkeit bzw. hoher Sicherheit auszuschließen.

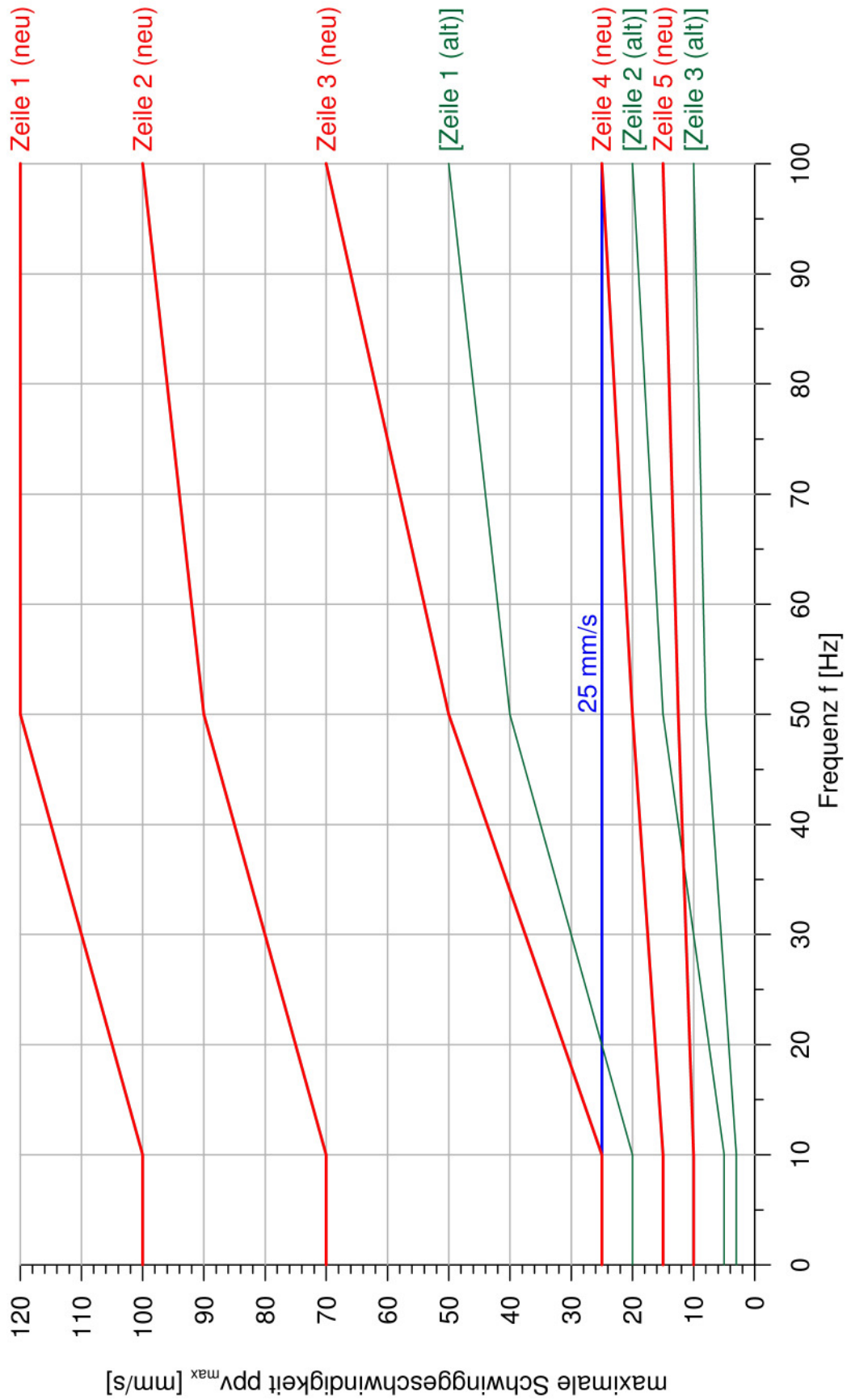


Bild 7.11: Vorschlag einer Änderung der DIN 4150, Teil 3 für die zulässigen Anhaltswerte der Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Frequenz der Messwerte in/auf den jeweiligen Bauwerken

Tabelle 7.1: Vorschlag für die zulässigen Anhaltswerte der Dehnung und Schwinggeschwindigkeit in Beziehung zur Frequenz für Bauwerke nach Zeile 1 bis 5 (kurzzeitige Einwirkungen)

Zeile/ Kategorie	Gebäudeart/Bauwerk/ Verkehrsweg	Anhaltswert ε der maximalen Dehnung $\mu\text{m/m}$	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v_i in mm/s			
			Fundament Frequenzen für v_x, v_y oder v_z ¹⁾			oberstes Vollgeschoss Deckenebene
			1-10 Hz	10-50 Hz	50 \geq 100 Hz	alle Frequenzen für v_x, v_y
1	Verkehrswege, Eisenbahnstrecken	220 - 350	100	100-120	120	-
2	Stahlbetonbauten, Stahlmasten, Brücken; Untertagebauten wie Kavernen, Tunnel, Stollen mit dimensionierter Sicherung	80 - 220	70	70-90	90-100	-
3	Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten; Untertagebauten wie Tunnel, Kavernen, Stollen mit Mauerwerksauskleidung bzw. ohne Sicherung	5-80	25	25-50	50-70	60
4	Gebäude mit Wohnungen, Gewerbenutzung und gleichartige Bauten	1-5	15	15-20	20-25	25
5	Bauten mit besonderer Erschütterungs- empfindlichkeit	0,3-1	10	10-12,5	12,5-15	15
v_x = Schwinggeschwindigkeit der horizontalen x-Ebene senkrecht zur Quelle v_y = Schwinggeschwindigkeit der horizontalen y-Ebene parallel zur Quelle v_z = Schwinggeschwindigkeit in der vertikalen Ebene ε = maximale Dehnung senkrecht zur Quelle						

8 Empfehlungen und Schlussfolgerungen

Die Auswertung der zahlreichen Messergebnisse unter Einbeziehung des Sprengmodells und der sonischen Wirkung ergab, dass dieser sonische Effekt eine universelle Bedeutung für die Sprengtechnik hat. Das Phänomen der Explosion und der zusammenhängende Komplex der Zertrümmerung und Erschütterung sind auf neue physikalische Weise besser erklärbar. Je weniger anisotrop und geklüftet ein Festgebirge ist, umso besser setzt sich die sonische Wirkung um.

Mit der Größe von $P_{Z0\alpha}$ kann die Zertrümmerung des Festgebirges beeinflusst werden:

$$P_{Z0\alpha} = \frac{\xi \cdot \left(\frac{\rho_s \cdot c_d^2}{4} \right) \cdot V_{S0}}{w'^2 \cdot l_{B0} \cdot (\sin \alpha_P \cdot \sin \alpha_S)^P} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (12)$$

Die Größe des Exponenten P wird durch die simultane Zündfolge nach der Impulstheorie geändert. Mit dieser Vorgehensweise wird die gezündete Vorgabe kleiner und $P_{Z0\alpha}$ wird größer, ohne dass der Sprengstoffeinsatz erhöht wird.

Die Beziehung (12) gilt für alle 1-D-, 2-D-Sprengungen über Tage und 3-D-Sprenganlagen unter Tage. Bei Spaltsprengungen wird $w'^2 = 1^2 \text{ m}^2$ gesetzt. Für 3-D-Sprengungen gilt als Vorgabe der zwischen zwei gezündeten Ladungen senkrechte Abstand zur jeweils inneren Reihe.

Die Erschütterungen werden verringert durch

- höhere Sonizität
- sehr geringe Trennflächenhäufigkeit bzw.

scheinbar abgemindert in seitlich zur Hauptabstrahlrichtung vorhandenen Gebäuden/Bauwerken.

Der Zusammenhang von Erschütterung und Zertrümmerung muss insbesondere bei der Veränderung der sonischen Wirkung beachtet werden. Je höher die Machzahl M_P und M_S , umso stärker ist die Zerkleinerung und geringer die Erschütterungen. Subsonische Sprengungen zeigen die geringste Zertrümmerung und vergleichsweise die höchsten Erschütterungen. Für die 1-D-, 2-D- und 3-D-Sprengungen wurden unter Einbeziehung der sonischen Wirkung 22 verallgemeinerungswürdige Grundsätze abgeleitet. Jedes Sprengziel wird dazu einzeln so beschrieben, dass eine allgemeine, sichere und verständliche Vorgehensweise für die Dimensionierung der Sprenganlagen übernommen werden kann. Auf der Grundlage entsprechender Erschütterungsmessungen mit FBG-Dehnungssensoren oder/und 3-Komponenten-Geophonen kann nach der Beziehung

$$ppv_{\max} = k \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot C_d^2}{4} \right) \left(\frac{r}{r^0} \right)^{-n} \right]^m \quad (\text{mm/s}) \quad (15)$$

oder

$$\epsilon_{\max} = k' \left[V_{SB} \cdot \xi \left(\frac{\rho_s \cdot C_d^2}{4} \right) \left(\frac{r}{r^0} \right)^{-n'} \right]^{m'} \quad (\text{mm/m}) \quad (16)$$

für jede 1-D-, 2-D- oder 3-D-Sprengung eine statistisch gesicherte fiktive Energie-Abstandsbeziehung mit dem gleichen Vorgehen ermittelt werden. Die sicheren Prognosebeziehungen gestatten dem jeweiligen Betrieb, die Erschütterungen bewusst zu steuern und damit die Umwelteinwirkungen positiv zu beeinflussen. Die Einteilung in definierte Erschütterungszonen gestattet die Abgrenzung bauwerksschädigender und nicht schädigender dynamischer Einwirkungen:

Verformungszone mit (1)	Verformungen $\epsilon_{if} = \geq 1 \mu\text{m/m}$ Dehnungen $\epsilon \geq 5 \mu\text{m/m}$ Schwinggeschwindigkeiten $ppv \geq 25 \text{ mm/s}$	}	bauwerks- schädigende Einwirkungen
Erschütterungszonen mit (2) bis (6)	Verformungen $\epsilon_{if} = \leq 1 \mu\text{m/m}$ Dehnungen $\epsilon \leq 5 \mu\text{m/m}$ Schwinggeschwindigkeiten $ppv \leq 25 \text{ mm/s}$	}	mit großer Wahr- scheinlichkeit bis hoher Sicherheit keine Bauwerksschädigung

Damit werden die Auswirkungen der Sprengarbeiten auf eine gesicherte Umweltbelastung eingegrenzt.

Aus diesen Ergebnissen abgeleitet, wurden neue zulässige Anhaltswerte für fünf Gebäude/Bauwerkskategorien gesichert zusammengestellt, die über die DIN 4150, Teil 3 in die Praxis eingeführt werden sollten.

Für die einzelnen Versuchsbetriebe ergaben sich nachstehende ausgewählte Schlussfolgerungen:

Tagebau Obling

Die elektronisch nach der Impulstheorie gezündeten Sprenganlagen führen erschütterungsseitig und hinsichtlich der Zertrümmerung zu gleichen Ergebnissen. Es konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass elektronisch simultan gezündete Lademengen zu

keinen höheren Erschütterungen als Einzellochzündungen führen. Die Verkürzung der Gesamtzündzeit mit einer Verzögerungszeit von 17 ms gegenüber 25 ms gestattet es, sehr große Sprenganlagen bis 200 Bohrlöcher umzusetzen, ohne die Bewohner länger als 1 s zu belästigen. Auf diese Weise kann die Häufigkeit der Sprengungen weiter gesenkt werden.

Tagebau Großsteinberg

Die elektronisch gezündete Einzellochzündung ist gegenüber der simultanen Zündung der Mehrreihensprengungen nach der Impulstheorie deutlich ungünstiger für die Zertrümmerung des Festgebirges. Die mit 17 ms gegenüber 25 ms verzögerten Sprenganlagen erbrachten ähnliche Ergebnisse, so dass eine kurze Verzögerungszeit für die Verringerung der Gesamtzündzeit genutzt werden kann. Die Dauer der Umweltbelastung wird verkürzt oder die Sprenganlagen können vergrößert und damit die Häufigkeit verringert werden.

Tagebau Nieder-Beerbach

Die Stückigkeit des Haufwerkes wurde gegenüber der bisherigen Vorgehensweise drastisch verbessert, so dass die Durchsatzleistung am Vorebrecher um etwa 50 % erhöht werden konnte. Die Ladeleistung wurde gesteigert und somit die Förderzeit verkürzt. Es wurde ferner mit der Zündung von 1,3625 t Sprengstoff gleichzeitig nachgewiesen, dass die Lademenge pro Zündzeitstufe keinen Einfluss auf die Erschütterung hat, sondern die in diesem Bericht erklärten Zusammenhänge. Die absolute, gleichzeitige Initiierung mit elektronischen Zündern erbrachte wie im Tagebau Oßling keine erhöhten Erschütterungen. Die behördlichen Einschränkungen der Lademengen sollten umgehend aufgehoben werden, damit der Tagebaubetrieb die neuen Erkenntnisse mit hohem praktischen Nutzen umsetzen kann. Es wird empfohlen, die Größe des spezifischen Sprengstoffverbrauchs generell auf 600 - 650 g/m³ zu erhöhen. Auf diese Weise wird in der „1. Brechstufe“ der Gewinnungssprengung die Stückigkeit des Haufwerkes für den weiteren Aufbereitungsprozess verbessert. Das wird im Tagebau-Aufbereitungsbetrieb zu erheblichen Einsparungen führen.

Tagebau Habermühle/Burgbernheim

Mit dem Übergang zu Mehrreihensprengungen verringert sich durch weniger Sprengungen die Umwelteinwirkung bei gleichzeitiger Kostensenkung. Die Neubewertung der Bahnstrecke mit den Masten und der Stahlbetonbrücke ermöglicht dem Tagebaubetrieb einen schadlosen Abbau in Richtung Nordwesten. Mit der statistisch gesicherten, fiktiven Energie-Abstandsbeziehung können die Zertrümmerung und die Erschütterungen allen Anforderungen angepasst werden. Die Umstellung der Sprengtechnik im Tagebau gestattet die optimale Ausnutzung der sonischen Wirkung.

Baustelle Flöha

Die Spaltsprengungen konnten ohne Vorversuche optimal umgesetzt werden. Die Erschütterungen waren grenzwertig vorausberechnet und führten zu keinen bleibenden Schäden. Ein Brunnen 2,5 m hinter der Spaltsprengung wurde nicht beschädigt. Mit den Erschütterungsmessergebnissen konnte objektiv nachgewiesen werden, dass die fiktive Energie-Abstandsbeziehung in der definierten Form (15) Gültigkeit besitzt.

Baustelle Bautzen

Die Sprengungen im Nahbereich 3,20 bis 5,80 m von Gebäuden und Mehrfamilienhäusern entfernt wurden mit Erfolg deutlich supersonisch ausgelegt, ohne dass durch die induzierten Erschütterungen ein Schaden entstand. Die zahlreichen unabhängigen Nachkontrollen in den Gebäuden zeigten keinerlei Risschäden trotz festgestellter Schwinggeschwindigkeiten bis 60 mm/s im Fundamentbereich. Die sonischen Effekte wurden auf dieser Baustelle erfolgreich und ohne Einschränkung genutzt. Nur mit der Kenntnis der neuen Zusammenhänge ist die sprengtechnische Herstellung des Tunnleinschnittes mitten im Wohngebiet möglich gewesen. Die sorgfältige, 1,5 m mächtige Abdeckung sorgte für die absolute Vermeidung von Steinflug.

Die Messergebnisse bei diesem Bauvorhaben ergeben den objektiven Nachweis, dass die Sonizität eine große Wirkung auf die Erschütterung und Zertrümmerung ausübt. Bei der Erfassung der Erschütterungen hat es sich erwiesen, dass im Nahbereich ≤ 150 m die dynamischen Einwirkungen besser und genauer mit FBG-Sensoren ermittelt werden. Mit zunehmender Annäherung der Messpunkte an die Erschütterungsquelle werden Schwinggeschwindigkeitsmessungen mit Geophonen ungenauer bzw. bedürfen einer stärkeren Ankopplung.

Tunnelbaustelle Ramholz

Die nach den modernen Prinzipien ausgearbeitete Bohr-, Spreng- und Einbruchtechnik zeigte mit der ersten Sprengung einen erfolgreichen Abschlag, ohne die zulässigen Anhaltswerte der Erschütterungen zu überschreiten. Das gesamte umgestellte Tunnelbauprojekt konnte erfolgreich ohne Schädigung des bestehenden Tunnels bei vollem Bahnverkehr abgeschlossen werden. Der Spiraleinbruch wurde in dieser Form das erste Mal angewandt. Die hohe Rissigkeit und die zahlreichen Trennflächen schwächten die sonische Wirkung. Die fiktive Energie-Abstandsbeziehung konnte nutzbringend eingesetzt werden.

Tunnelbaustelle Markovec

Nach den systematischen Sprengungen mit Spiraleinbruch und Dimensionierung unter Beachtung der sonischen Wirkung konnte erreicht werden, dass die zulässige Schwinggeschwindigkeit von 7 mm/s 20 m über der Firste auf der darüber befindlichen Geländeoberfläche nicht überschritten wurde. Dem Auftraggeber konnte eine Einbruchvariante mit Bohr-, Spreng- und Zündtechnik für den Sprengvortrieb übergeben werden. Der Nachweis der Gültigkeit der fiktiven Energie-Abstandsbeziehung für unter Tage Sprengungen ist bei diesem Bauvorhaben objektiv erfolgt.

Danksagung

Die Bearbeiter bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung und Unterstützung des Forschungsvorhabens mit dem Az: 29049-21/0.

Wir danken für die messtechnische Begleitung der Sprengungen in den vier Versuchsbetrieben mit dem Radarsensor und dem 3-D-Laserscanner beim Institut für Bergbau/Spezialtiefbau sowie Markscheidewesen/Vermessungstechnik der TU Bergakademie Freiberg.

Weiterhin sind wir den Versuchsbetrieben und Firmen mit den Bauleitern, Sprengberechtigten und -verantwortlichen

Herrn Scheffler, Geschäftsführer Lausitzer Grauwacke GmbH (Oßling)

Herrn Wiessner, Betriebsleiter Lausitzer Grauwacke GmbH (Oßling)

Herrn G. Lunkewitz, MAXAM Deutschland GmbH

Herrn A. Wagner, MAXAM Deutschland GmbH

Herrn Hempel, Betriebsleiter Tagebau Großsteinberg (BAG)

Herrn G. Lau, Tagebau Großsteinberg (BAG)

Herrn H. Krüger, MAXAM Deutschland GmbH

Herrn F. Muschler, MAXAM Deutschland GmbH

Herrn L. Fleischhauer, Betriebsleiter MHI Tagebau Nieder-Beerbach

Herrn Eichelberger, Orica Germany

Herrn Chr. Schor, Geschäftsführer Tagebau Habermühle/Burgbernheim,

Schotterwerk Burgbernheim GmbH

Herrn Marek, Tagebau Habermühle

Herrn Beck, Tagebau Habermühle

Herrn U. Mann, NL-Leiter Dexplo Sprengtechnik (Objekt Flöha und Bautzen)

Herrn F. Wölfl, Dexplo Sprengtechnik

Herrn H. Göhringer, Oberbauleiter Deutschland Alpine-BEMO Tunneling GmbH

Herrn Tergl, Bauleiter Tunnel - Ramholz

Herrn Schuhmacher, Bauleiter Alpine-BEMO Tunneling GmbH Markovec Tunnel

Herrn Ganster, Austin Powder GmbH

zu großem Dank für die Unterstützung unserer Arbeiten sowie die gute Zusammenarbeit verpflichtet. Ohne die kreative Mitwirkung der verantwortlichen Leiter wären die Ergebnisse nicht zu erzielen gewesen.

Fazit

Mit den durch die breit angelegten Untersuchungen für die wichtigsten Sprengungen im Festgebirge über und unter Tage erbrachten Ergebnissen von verschiedenen Zusammenhängen konnte eindrucksvoll die universelle Bedeutung der Sonizität für die Sprengtechnik belegt werden. Es bleibt offen, inwieweit die sprengstoffherstellende Industrie auf diese Ergebnisse reagiert. Bisher diktierte der Preis und die betriebliche Zielstellung die angewandte Bohr-, Spreng- und Zündtechnik. Nach den Ergebnissen ist es angezeigt, Sprengstoffe mit hohen Detonationsgeschwindigkeiten zu entwickeln, die direkt im Laderaum einzubringen sind und an der Bohrlochwandung anliegen. Eine viel versprechende, gegenwärtig noch nicht ausgereifte Sprengstoffmischung stellt der Kryosprengstoff als Flüssigsauerstoff-Sprengstoff auf Polymethylmethacrylat-Basis und seine Weiterentwicklung dar [BE 13]. Die Sprengstoffmischungen auf der Basis von Flüssigsauerstoff können mit hoher Detonationsgeschwindigkeit > 8000 m/s gefertigt werden und haben generell ungiftige Schwaden, so dass künftig auch schallhärtere Festgesteine umweltfreundlich supersonisch gesprengt werden könnten.

Als offenes Problem ist weiterhin die Auswirkung der Verzögerungszeit zwischen den Ladungen oder simultan gezündeten Bohrlochreihen anzusehen. Es gilt für die nichtelektrische und elektronische Zündung als gesichert, dass eine Resonanzwirkung unter 25 ms Verzögerungszeit nicht eintritt. Derartige Erscheinungen dürften bei elektronischer Zündung mit Verzögerungszeiten von ≥ 30 ms zu erwarten sein. Genauere, systematische Untersuchungen stehen noch aus.

Die Zündfolge insbesondere mit elektronischen Zündern initiiert ist nicht geeignet, Erschütterungen zu minimieren.

Nicht zuletzt muss festgehalten werden, dass die sprengstoffherstellende Industrie auf ihren Datenblättern vorrangig für die Sprengstoffe unzureichende bis fehlende Angaben zu den Sprengstoffeigenschaften und der toxischen Zusammensetzung der entstehenden Schwaden mitteilt, d. h. diese Datenblätter sind umweltbezogener und anwendungsfreundlicher zu gestalten oder ggf. für den internen Gebrauch sichtbar zu machen.

Anhang mit Anlagenverzeichnis

Der Anhang enthält die Bilder zum Kapitel 4 und ist in einem gesonderten Band dem Abschlussbericht beigelegt.

Der Inhalt des Anhanges ist mit dem Verzeichnis der enthaltenen Bilder versehen.

Literaturverzeichnis

- [BA 73] BARRICK, D. E.: FM/CW radar signals and digital processing. Technical report, NOAA Environmental Research Laboratories, -
URL: http://www.codaros.com/images/about/1973Barrick_FMCW.pdf, 1973 - letzter Zugriff im Januar 2013.
- [BA 00a] BAUMANN, I. & MÜLLER, B. (2000): Neues Messverfahren für die Erfassung von Sprengerschütterungen und anderen dynamischen Einwirkungen im Bauwesen. - Spreng-Info **22**(2):19 - 32.
- [BE 13] BECKER, C. & SCHWARK-WERWACH, B. (2013): Flüssigsauerstoff-Sprengstoffe - Entwicklungen und Anwendungen. - 18. Kolloquium Bohr- und Sprengtechnik, TU Clausthal-Zellerfeld, S. 177 - 191.
- [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.
- [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 00] DOWDING, CH. H. (2000): Construction Vibrations.- Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [DR 13] DREBENSTEDT, C. & ORTUTA, J. (2013): Use radar reflectivity as possibility for measurements of fragmentation during the blasting. - Proc. of the Fragblast **10**, New Delhi, India, 26. - 29. 11. 2012, Eds. Pradeep K. Singh & Amalendu Sinha, pp. 105 - 110.
- [DRI 95] DRISCH, L. & SCHÜRKEN, J. (1995): Bewertung von Bergschäden und Setzungsschäden an Gebäuden. - Th. Oppermann Verlag.
- [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.
- [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.

- [FU 13] FURTNEY, J. K.; SELLERS, E. & ONEDERRA, J. (2013): Simple models for the complex process of rock blasting. - Proc. of the Fragblast **10**, New Delhi, India, 26. - 29. 11. 2012, Eds. Pradeep K. Singh & Amalendu Sinha, pp. 275 - 282. Taylor & Francis Group, London.
- [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.
- [HE 93] HEINZE, H. (HRSG.) (1993): Sprengtechnik - Anwendungsgebiete und Verfahren. - 2. überarb. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig - Stuttgart.
- [HEN 06] HENNIGSEN, D. & KATZUNG, G. (2006): Einführung in die Geologie Deutschlands. - 7. überarb. u. erweit. Aufl., Elsevir - Spektrum Akademischer Verlag München, 234 S.
- [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].
- [HOR 03] HORT, M., SEYFRIED, R. & VÖGE, M.: Radar doppler velocimetry of volcanic eruptions: theoretical considerations and quantitative documentation of changes in eruptive behavior at Stromboli volcano, Italy. - Geophysical Journal International. URL: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01982.X.2003>.
- [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.
- [KO 58] KOCH, H. W. (1958): Zur Möglichkeit der Abgrenzung von Lademengen bei Steinbruchsprengungen nach festgestellten Erschütterungsstärken. - Nobel Hefte, **24**:92 - 96.
- [LÜ 86] LÜDELING, R. & HINZEN, K.-G. (1986): Erschütterungsprognose und Erschütterungskataster - Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Sprengerschütterungen. - Nobel Hefte, **213**:105 - 123.
- [MA 12] MANN, U. & MÜLLER, B. (2012): Sprengen vor der Haustür - Durchführung von Sprengarbeiten zur Herstellung eines Tunnels in offener Bauweise im Stadtgebiet Bautzen. - Spreng-Info **34** (3) (2012), Seite 36 - 44.
- [MAR 06] MARTIENßEN, TH. & MÜLLER, B. (2006): Komplexe Anwendung der Photogrammetrie für die Sprengtechnik und Tagebausicherheit. - Spreng-Info **28**(3):37 - 44.
- [MY 73] MEYER, R. (1973): Explosivstoffe. - 3. Aufl., Chemie Verlag, Weinheim / Bergstraße.

- [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.
- [MÜ 90] MÜLLER, B. (1990): Erarbeitung der Sprengtechnologie für verschiedene Festgebirge und die Beurteilung des Sprengergebnisses. - Nobel Hefte, **5**(3/4):92 - 102.
- [MÜ 98] MÜLLER, B. (1998): Das Phänomen der Trennflächen und ihre Bedeutung für geotechnische Aufgabenstellungen. - Freiburger 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 01] 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 02] MÜLLER, B. (2002): Impulstheorie - Eine neue Berechnung von Sprenganlagen und Bewertung von Sprengerschütterungen. - **5**. Symp. Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, EMPA Dübendorf, Schweiz, 17 S.
- [MÜ 03a] MÜLLER, B. & BÖHNKE, R. (2003): Gesicherte Sprengerschütterungsprognose und Vorschlag einer einheitlichen Festlegung von Anhaltswerten für kurzzeitige Erschütterungen. - Tagungsband „Fachdienstberatung Sprengstoffrecht“. 25. 11. 2003, Freiberg, Freistaat Sachsen, Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- [MÜ 03b] 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 03c] 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 04] 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 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 06] 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 07] 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 09a] MÜLLER, B. et al. (2009): Entwicklung eines Verfahrens zur definierten Berechnung von Gewinnungssprengungen und deren Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit. - Abschlussbericht des Forschungsprojektes Az: 2458-21/0 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.
- [MÜ 09b] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2009): Wichtige Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Umweltfreundliche Sprengtechnik“ - Spreng-Info, Mitteilungsblatt des Deutschen Sprengverbandes e. V. , **31** (2): 13 - 24.
- [MÜ 10a] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2010): Sprengtechnik nach neuesten Erkenntnissen - Grundsätze, Möglichkeiten und Konsequenzen. - Spreng-Info **32**, 14 - 21.
- [MÜ 10b] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2010): Prediction and minimisation of vibrations during production blasts. *Vibration from Blasting*. - Eds. Spathis & Noy - Workshop hosted by Fragblast **9** - Granada, Spain, 12. - 13. Sept. 2009, pp. 47 - 55. Taylor & Francis Group London.
- [MÜ 10c] MÜLLER, B., HAUSMANN, J. & NIEDZWIEDZ, H. (2010): Control of rock fragmentation and muckpile geometry during production blasts (environmentally friendly blasting technique). - Proc. of the Fragblast **9**, Granada, Spain, 13. - 17. Sep. 2009, pp. 277 - 286. Taylor & Francis Group, London.
- [MÜ 11a] MÜLLER, B. & PIPPIG, U. (2011): Praktikable geotechnische Klassifikationen von Festgesteinen und Festgebirgen für das Bauwesen sowie den Bergbau. - Felsbaumagazin, Heft **1**, S. 10 - 31.
- [MÜ 11b] MÜLLER, B., LANGE, PH. & PIPPIG, U. (2011): Die sonische Wirkung von Sprengungen. - Spreng-Info **33** (2011) 3, S. 8 - 19.
- [MÜ 11c] MÜLLER, B. & PIPPIG, U. (2011): Physikalische Zusammenhänge revolutionieren die Bohr- und Sprengtechnik und ermöglichen eine statistisch gesicherte Erschütterungsprognose. - Felsbaumagazin Heft **4**, S. 253 - 272.
- [MÜ 13] MÜLLER, B. & ROSSMANITH, H. P. (2013): New physical findings revolutionize the drilling and blasting technology as well as the prediction of ground vibrations - Part 1: The new drilling model; Part 2: Practical applications above ground and underground. - *Blasting in Mines - New Trends* - Ghose & Joshi (Eds.); Workshop hosted by Fragblast **10**, New Delhi, India, 24. - 25. Nov. 2012; pp. 29 - 50. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [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.
- [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.
- [RO 98a] ROSSMANITH, H. P. et al. (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 10] ROSSMANITH, H. P. & MÜLLER, B. (2010): Success in Advanced Blasting on the Basis of sonicity - or - What a Blaster should know about Wave Dynamics in Rock, - Blasting and Fragmentation, Vol. **4**, Number 1, May 2010, pp. 1 - 34.
- [RO 11] ROSSMANITH, H. P. & MÜLLER, B. (2011): The importance of sonicity in blasting. - Lisbon Conferenz Proc. 2011, Sixth EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Ed. Holmberg, R., pp. 401 - 413.
- [RU 07] RUSTAN, A. Ed. IN CHIEF (2007): Rock Blasting Terms and Symbols. - Taylor & Francis Group, London.
- [RU 11] RUSTAN, A. Ed. IN CHIEF (2011): Mining and Rock Construction Technology - Desk Reference. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [SH 98] SCHMÜCKER, G. (1998): Die Messung der Detonationsgeschwindigkeit in Bohrlöchern. - Spreng-Info, **20**(3):19 - 25.
- [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.
- [SP 13] SPATHIS, A. T. (2013): Innovations in blast measurement. Reinventing the past. - Proc. of the Fragblast **10**, New Delhi, India, 26. - 29. 11. 2012, Eds. Pradeep K. Singh & Amalendu Sinha, pp. 23 -39, Taylor & Francis Group, London.
- [ST 11] STIEHR, J. F. (ED.) (2011): ISEE Blaster´s Handbook. - 18th Edition, USA, Ohio.
- [TH 78] THUM, W. (1978): Sprengtechnik im Steinbruch und Baubetrieb. - Bauverlag, Wiesbaden-Berlin, 400 S.
- [VD 09] VDI/VDE/GESA 2660 (2/09): Experimentelle Strukturanalyse - Optischer Dehnungssensor, basierend auf Faser-Bragg-Gitter; Grundlagen sowie Kenngrößen und deren Prüfung. - Verband Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik, GESA-Fachausschuss AK 17 Faseroptische Messverfahren.
- [VO 00] VOGEL, G. (2000): Zünden von Sprenganlagen. - L. Hartmann, Sondheim v. d. Rhön.
- [YI 13] YI, C. ET AL. (2013): Numerical simulation for the influence of delay time on the rock fragmentation. - Proc. of the Fragblast **10**, New Delhi, India, 26. - 29. 11. 2012, Eds. Praadep K. Singh & Amalendu Sinha, pp. 213 - 220. Taylor & Francis Group, London.

- [YO 04] YOUNG, H. D. & FREEDMANN, R. A. (2004): University Physics with modern physics. - 11th Edition, Int. Ed. Texas A & M University, Pearson, Addison Wesley, San Francisco USA.