

PROGNOSE ABBAUINDUZIERTER SEISMISCHER  
EREIGNISSE MITTELS EINES MARKSCHEIDERISCHEN  
GEBIRGSBEWEGUNGSMODELLS

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und  
Bergbau  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Math. Jörn Wolff  
geboren am 19.08.1974 in Münster

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. A. Sroka, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. A. Preusse, Aachen  
Dr.-Ing. R. Fritschen, Essen  
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Drzęźła, Gliwice

Tag der Verleihung 27.06.2006



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Bergbauinduzierte Erschütterungen</b>	<b>5</b>
2.1	Seismische Ereignisse und mögliche Ursachen . . . . .	5
2.1.1	Gruppierung induzierter seismischer Ereignisse . . . . .	6
2.1.2	Ortung seismischer Ereignisse und Zuordnung zu einer Bauhöhe . . . . .	8
2.1.3	Unterschiedliche Bruchtypen . . . . .	10
2.2	Bruchtypen im deutschen Steinkohlenbergbau und deren Einteilung . . . . .	11
2.3	Die seismische Energie und die lokale Magnitude . . . . .	14
2.3.1	Die seismische Energie . . . . .	14
2.3.2	Die lokale Magnitude . . . . .	16
2.4	Die Bewertung von Erderschütterungen . . . . .	17
2.5	Gutenberg-Richter-Beziehung . . . . .	19
2.6	Natürliche Faktoren und Einfluss von Altabbauen . . . . .	21
2.6.1	Natürliche Faktoren . . . . .	21
2.6.2	Der Einfluss von Altabbauen . . . . .	22
2.7	Einfluss des Abbaufortschritts und der Stillstandszeiten auf die Erderschütterungen . . . . .	24
2.8	Zusammenfassung . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Prognose seismischer Ereignisse und ihrer Energie</b>	<b>34</b>
3.1	Prognosedefinition . . . . .	34
3.2	Prognose mittels einer Wahrscheinlichkeitsaussage . . . . .	35
3.2.1	Volumen und seismische Energie . . . . .	35
3.2.2	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses . . . . .	35
3.3	Prognose mittels einer Korrelation . . . . .	37
3.3.1	Berechnung der Gebirgsbewegungen . . . . .	37
3.3.2	Berechnung der Indizes . . . . .	38
3.3.3	Korrelation mit den registrierten seismischen Ereignissen . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Berechnung der Gebirgs- und Bodenbewegungselemente</b>	<b>42</b>
4.1	Skizzierung des Senkungsvorganges . . . . .	42
4.2	Senkungen durch ein Abbauelement . . . . .	43
4.3	Einfluss geneigter Lagerung und richtungsabhängiger Eigenschaften . . . . .	45
4.4	Zeitliche Aspekte der Senkungsberechnung . . . . .	48
4.5	Bestimmung von Deformationen . . . . .	53
4.6	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen . . . . .	55
4.7	Gesamter Abbau - mehrere Abbaue . . . . .	57
4.8	Vergleich von Senkungsmessungen und Berechnungen . . . . .	58
4.9	Hebungen . . . . .	62
4.10	Mathematische Modellierung der Hebungen . . . . .	68

---

4.11	Hebungsberechnung anhand eines realen Beispiels . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Deformationskennziffern und bergbauinduzierte Ereignisse</b>	<b>80</b>
5.1	Anwendung auf ein bestehendes Prognosemodell . . . . .	80
5.2	Weitere Zusammenhänge . . . . .	83
5.2.1	Festlegung der verwendeten Indizes . . . . .	84
5.3	Anwendung auf verschiedene Messfälle . . . . .	86
5.4	Abbau mit Restfeste im Hangenden . . . . .	89
5.5	Doppelbetrieb ohne Altabbau im Hangenden . . . . .	93
5.6	Zusammenfassung . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zur erschütterungsmindernden Abbauplanung</b>	<b>104</b>
6.1	Mögliche Einflussfaktoren . . . . .	104
6.2	Einfluss der Abbauart und des Abbaurhythmus . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>108</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>112</b>
<b>Anhang</b>		<b>i</b>
Anhang A	. . . . .	i
Begriffe	. . . . .	ii



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Skizzierung der Druckverteilung im Bereiche des Streb	6
2.2	Verteilung der Anzahl der Ereignisse $N$ und ihrer seismischen Energie $E$ gegenüber der Entfernung zum Streb - theoretische Werte der vertikalen Spannungen $\sigma$	8
2.3	Umstellung der Bauhöhe S708 (BW Ost, Flöz Sonnenschein) mit drei Stationen und Darstellung des Ereignisortes (Kreuz)	9
2.4	Unterschiedliche Bruchtypen im kanadischen Bergbau	10
2.5	Darstellung der Bruchfläche eines Scherbruchs und die Herdparameter	11
2.6	Unterschiedliche Bruchtypen im deutschen Steinkohlenbergbau	12
2.7	Anzahl der Ereignisse nach Typen an einem Beispiel aus dem Saarland	13
2.8	Zusammenhang zwischen dem Abbaufortschritt und der Ereignisanzahl für einen selektierten Abbau	14
2.9	Maximale Energie nach Typen	16
2.10	Darstellung der Energie-Häufigkeitsbeziehung für achtzehn Monate: BW Saar Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost	20
2.11	Seismische Energie und Anzahl seismischer Ereignisse und der Zusammenhang zu Problemen bei der Streckenauffahrung - BW Ost: Wilhelm W751	21
2.12	Schematische Darstellung der Vertikaldruckverteilung unterhalb eines Abbaupfeilers	23
2.13	Darstellung der Erschütterungssituation und der Lage der Restpfeiler für die Bauhöhe 474 (BW Prosper-Haniel)	24
2.14	Ereignisanzahl für Typ 1 vom 01.03.2000 - 30.09.2000 über die Woche: Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost	25
2.15	Verteilung der Schnitte vom 01.03.2000 - 30.09.2000 über die Woche: Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost	25
2.16	Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen und Ereignishäufigkeiten Sonnenschein S708	26
2.17	Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen und Ereignishäufigkeiten Wilhelm W751	27
2.18	Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen und Ereignishäufigkeiten 8.7o / 8.8o Typ 1	28
2.19	Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen und Ereignishäufigkeiten 8.7o / 8.8o Typ 2 und Typ 4	28
2.20	Ereignisse in Stillstandszeiten: BW Ost, Flöz Wilhelm, Bauhöhe W751	29
2.21	Ereignisse in Stillstandszeiten: BW Saar, Flöz Schwalbach, Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost	29
2.22	Zusammenhang zwischen der Energiefreisetzung und dem Abbaufortschritt pro Tag - BW Ost: Wilhelm W751	31
2.23	Zusammenhang zwischen der Energiefreisetzung und dem Abbaufortschritt pro Tag - BW Ost: Wilhelm W751	32

3.1	Prognose der Ereignisanzahl . . . . .	40
4.1	Darstellung der Superposition zweier Einzelsenkungen . . . . .	43
4.2	Skizzierung des Vollflächenradius im Gebirge in Abhängigkeit von $n$ . . . . .	45
4.3	Verschiebung der Senkungsmulde in Richtung des Einfallens . . . . .	46
4.4	Abhängigkeit des Vollflächenradius von der horizontalen Lage . . . . .	47
4.5	Einfluss des Einfallens $\alpha$ und des Vollflächenradius auf die Senkungsmulde .	48
4.6	Skizzierung der verwendeten Zeitfunktion in Abhängigkeit der Parameter $c$ bzw. $m$ . . . . .	49
4.7	Darstellung einer Beispielsenkung für $m=1$ (durchgezogener Graph) und $m=0,4$ (gestrichelter Graph) zu verschiedenen Zeitpunkten . . . . .	51
4.8	Darstellung einer Beispielsenkung für $m=1$ (durchgezogener Graph) und $m=0,4$ (gestrichelter Graph) zu verschiedenen Zeitpunkten (Fortsetzung) .	51
4.9	Skizzierung von $\dot{f}(t)$ in Abhängigkeit der Parameter . . . . .	52
4.10	Situation der Altabbau oberhalb des Schwenkbetriebs . . . . .	59
4.11	Abbausituation für den Schwenkbetrieb . . . . .	59
4.12	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 14 . . . . .	60
4.13	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 28 . . . . .	61
4.14	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 16 . . . . .	61
4.15	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 24 . . . . .	62
4.16	Skizzierung von $h(z)$ für einen Abbau in 1000 m Teufe nach Gleichung (4.42)	64
4.17	Lage der Messpunkte zum Abbau und der Überbauungsabstand des Querschlags . . . . .	65
4.18	Hebungskurven für drei Messpunkte . . . . .	65
4.19	Hebungskurve - 69 Tage nach der Überbauung . . . . .	66
4.20	Betrachtete Abbausituation bei <i>Kirsch</i> ([Kirs], 1998) . . . . .	66
4.21	Skizzierung der unterschiedlichen zeitlichen Abschnitte des Hebungsverlaufs im Liegenden und der vertikalen Druckverteilung im Strebniveau . . .	67
4.22	Senkung des Hangenden nach Hoffmann für unterschiedliche Gesteine . . .	70
4.23	Ansatz für $R(z)$ im Liegenden . . . . .	71
4.24	Hebungen bei unterschiedlichen Überbauungsabständen $z$ . . . . .	72
4.25	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen Endhebungen (gestrichelte Linie) nach Gleichung (4.44) . . . . .	74
4.26	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen Endhebungen (gestrichelte Linie) nach Gleichung (4.44) . . . . .	75
4.27	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Hebungen (gestrichelte Linie) . . . . .	78
4.28	Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Hebungen (gestrichelte Linie) . . . . .	79
5.1	BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704 (blau) und Altabbau im Flöz Dickebank (rot) sowie der georteten Ereignisse . . . . .	81

5.2	Prognose der Anzahl und der seismischen Energie nach Abschnitt (3.3) sowie den 95% Konfidenzintervallen für die Regressionsgerade (BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704) . . . . .	82
5.3	Streb (rot) und Bereich $U_r$ für die relevanten Berechnungspunkte mit Abstand $r$	84
5.4	Regressionsgerade und Konfidenzintervall (95%) für die Anzahl mit den Indizes aus Gleichung (5.1) . . . . .	87
5.5	Prognose (gestrichelt) der Erschütterungsanzahl (durchgezogene Linie), Berechnungszeitraum (punktierter Bereich): BW Ost, S704, Flöz Sonnenschein . . . . .	88
5.6	Prognose (gestrichelte Linie) der seismischen Energie (durchgezogene Linie), Berechnungszeiträume (punktierte Bereiche): BW Ost, S704, Flöz Sonnenschein . . . . .	88
5.7	Abbausituation für die Bauhöhe 20.3 Ost (schwarz), Flöz Grangeleisen, BW Saar, Altabbau im Flöz Wahlschied (rot) . . . . .	89
5.8	Starke Ereignisse der Bauhöhe 20.3 Ost, Flöz Grangeleisen, BW Saar . . . . .	90
5.9	Zeitliche Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden starken Ereignissen: BW Saar, Flöz Grangeleisen, 20.3 Ost . . . . .	90
5.10	Darstellung der Erschütterungssituation mit den berechneten Indizes $d_i$ für die Bauhöhe 20.3 Ost, Flöz Grangeleisen, BW Saar . . . . .	91
5.11	Darstellung der Erschütterungssituation (starke Ereignisse) mit den berechneten Indizes $d_i$ für die Bauhöhe S704 (BW OST, Flöz Sonnenschein) . . . . .	92
5.12	Abbausituation für die Doppelbetriebe 8.7 Ost / 8.8 Ost (blau) und 8.9 Ost / 8.10 Ost (schwarz) (BW Ensdorf, Flöz Schwalbach) . . . . .	94
5.13	Ereignisanzahl über die Zeit nach Typen (BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost) . . . . .	95
5.14	Zeitliche Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden starken Ereignissen: BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost . . . . .	96
5.15	Gegenüberstellung der registrierten Ereignisanzahl und zweier Prognosen für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1 . . . . .	97
5.16	Gegenüberstellung der registrierten Ereignisanzahl und der zweiten Prognose für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1 . . . . .	97
5.17	Gegenüberstellung der registrierten Energie und der zweiten Prognose für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1 . . . . .	98
5.18	Gegenüberstellung der registrierten Energie und zweier Prognosen für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1 . . . . .	98
5.19	Gegenüberstellung der registrierten Ereignisanzahl und zweier Prognosen für den Doppelbetrieb 8.9 Ost / 8.10 Ost (BW Saar, Flöz Schwalbach) - Typ 1 . . . . .	99
5.20	Zusammenhang zwischen den Typ 4 Ereignissen und den Indizes $d_i$ für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost . . . . .	101
5.21	Zusammenhang zwischen den Typ 4 Ereignissen und den Indizes $d_i$ für den Doppelbetrieb 8.9 Ost / 8.10 Ost . . . . .	101
5.22	Zusammenhang zwischen den Indizes und der Änderung der Abbaugeschwindigkeit für den Doppelbetrieb 8.9 Ost / 8.10 Ost . . . . .	102
6.1	Darstellung der Erschütterungssituation mit den berechneten Indizes $d_i$ für den ersten Messfall aus Abschnitt (5.4) . . . . .	106



6.2	Darstellung der Erschütterungssituation mit den berechneten Indizes $d_i$ für den zweiten Messfall aus Abschnitt (5.4)	107
7.1	Ellipse	i



# Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften seismischer Ereignisse nach Gruppen . . . . .	7
2.2	Lokale Magnitude einiger starker Erschütterungen im Saarland . . . . .	17
2.3	Maximale Schwinggeschwindigkeit, zugehörige Frequenz und Beschleunigung einiger starker Erschütterungen im Saarland und deren Dauer . . . . .	18
2.4	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeiten bei kurzzeitigen Erschütterungen nach DIN 4150-3 . . . . .	19
3.1	Durchschnittliche Werte von B für ausgewählte Bergwerke . . . . .	36
4.1	Unterschiedliche Werte für den Gebirgsparameter n . . . . .	45
4.2	Durchschnittliche Dichte, Kompressionswellengeschwindigkeit und Scherwellengeschwindigkeit von Sandstein . . . . .	56
7.1	Im Text nicht definierte Begriffe . . . . .	iii



# 1 Einleitung

Die Förderung von Steinkohle wird in den Bergbaugebieten Deutschlands von seismischen Ereignissen begleitet. Diese als Erderschütterungen an der Tagesoberfläche wahrnehmbaren Ereignisse werden von der Bevölkerung mit zunehmender Beunruhigung und Unverständnis wahrgenommen. Obwohl das Phänomen der seismischen Ereignisse schon seit langem bekannt ist und in allen Bergbaugebieten weltweit beobachtet werden kann, führen insbesondere starke Erschütterungen zu einer Verängstigung und steigendem Unmut in der Bevölkerung. Die Folge sind Proteste gegen den Steinkohlenabbau, die auch von politischer Seite zur Kenntnis genommen werden und bereits zu Forderungen nach Abbaustopps geführt haben. Die Situation zwingt die Bergbaubetreibenden Möglichkeiten zu finden, die das Auftreten der seismischen Ereignisse bzw. die Intensität der Erschütterungen beeinflussen können.

Im Saarland wurden Versuche unternommen, starke seismische Ereignisse durch gezielte Rissbildung in einzelnen Schichten (Fracen) bzw. durch Sprengungen in ihrer Stärke zu mindern oder sogar das Auftreten starker Ereignisse ganz zu verhindern. Daneben besitzt der Bergbaubetreibende mehrere Möglichkeiten in das Abbaugeschehen einzugreifen. Zu nennen sind dabei die Abbaugeometrie, die Abbauart und die zeitliche Abbauführung. Diese Faktoren sind bei der Abbauplanung in Bezug auf Bergschäden von Bedeutung. Ergebnisse von Untersuchungen zu seismischen Ereignissen weltweit lassen auf die Existenz zweier Gruppen von seismischen Ereignissen schließen. Die erste Gruppe besteht aus den induzierten seismischen Ereignissen, die sich mit dem Abbaufortschritt korrelieren lassen und in der Nähe der Abbaufront stattfinden. In die zweite Gruppe fallen diejenigen Ereignisse, die an großen geologischen Störungen bis zu 3 km von der Abbaufront entfernt auftreten. Die seismischen Ereignisse, die im deutschen Steinkohlenbergbau induziert werden, können der ersten Gruppe zugeordnet werden, das heißt sie stehen mit dem Abbaugeschehen in engem Zusammenhang. Somit kann vermutet werden, dass die oben erwähnten Faktoren auch für die Erschütterungssituation von Belang sind.

Die Frage, wie genau der Zusammenhang zwischen dem Abbaugeschehen und den seismischen Ereignissen aussieht, ist ein Aspekt der vorliegenden Arbeit. Daneben wird auch der Einfluss der lokal vorliegenden Geologie und der Einfluss von Abbaukanten und Restfesten vorausgegangener Abbaue untersucht. Sowohl die Änderung der lokalen Geologie als auch das Unterfahren von Altabbauen gehen häufig mit wechselnden Erschütterungssituationen einher. Zumeist erhöht sich die seismische Energie der einzelnen Ereignisse. Da im Ruhrbergbau aber auch bei einigen Bauhöhen im Saarland häufig Restfesten oder Abbaukanten unterfahren werden, besteht die Notwendigkeit einen Bezug zu den seismischen Ereignissen für solche Situationen herzustellen. Ob eine Änderung, z. B. der zeitlichen Abbauführung, zu einer Verbesserung der Erschütterungssituation führt, ist eine weitere Fragestellung dieser Arbeit.

Polnische Modelle versuchen das Auftreten seismischer Ereignisse vorherzusagen. Dabei fließt auf der einen Seite das entnommene Volumen entscheidend in das Modell ein und auf der anderen Seite die entstehenden Gebirgsbewegungen. Diese Modelle wurden

auf den deutschen Steinkohlenbergbau übertragen. Die Anwendung auf einzelne Messfälle ergab dabei, dass eine Verwendung der Modelle auch in Deutschland möglich ist, allerdings nicht so gute Prognosen erzielt werden konnten wie in Polen. Ob hierfür die in Deutschland geringere Datenmenge als in Polen ausschlaggebend ist, kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Da beide polnischen Modell auf das eigentliche Abbaugeschehen Bezug nehmen, stellen diese Ansätze gute Möglichkeiten dar, um die Einflüsse des Abbaugeschehens auf die Erschütterungssituation zu untersuchen. Ferner könnte ein Prognosemodell, das die Abbauführung mit einbezieht, in der Lage sein, durch Variieren z. B. der zeitlichen Abbauführung die Auswirkungen theoretisch zu bestimmen.

Um die aufgezeigten Fragestellungen zu untersuchen, werden in dieser Arbeit die folgenden Schritte unternommen: Kapitel (2) gibt einen Überblick über seismische Ereignisse weltweit und vertiefend für die deutschen Steinkohlenabbau. Dabei wird auch auf den Einfluss der zeitlichen Abbauführung eingegangen. Die oben erwähnten Prognosemodelle aus Polen werden in Kapitel (3) genauer besprochen. In Kapitel (4) wird ein dynamisches Gebirgsbewegungsmodell vorgestellt und modifiziert, mit dem sich Gebirgsbewegungen sowohl über als auch unterhalb des Abbaus bestimmen lassen. Dieses bildet die Grundlage für die Berechnungen in Kapitel (5). Hier wird zuerst anhand eines Beispiels ein polnisches Prognosemodell angewendet, um anschließend mit Hilfe eines veränderten Modells nähere Untersuchungen an unterschiedlichen Bauhöhen vorzunehmen. Die in Kapitel (5) gefundenen Zusammenhänge sollen dazu dienen, die Möglichkeiten einer erschütterungsmindernden Abbauplanung für zwei Messfälle zu prüfen. Dieses geschieht in Kapitel (6). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf mögliche Ansätze weiterer zukünftiger Studien wird in Kapitel (7) zum Abschluss der Arbeit vorgenommen.

## 2 Bergbauinduzierte Erschütterungen

Weltweit werden während der untertägigen Gewinnung von Rohstoffen seismische Ereignisse beobachtet. In diesem einführenden Kapitel werden Zusammenhänge zwischen bergbaulichen Aktivitäten und dem Auftreten seismischer Ereignisse dargestellt. Dazu gehören der Einfluss von Stillstandszeiten, Abbaukanten und der lokalen Geologie, welche an Beispielen erläutert werden. Ferner wird auf unterschiedliche Bruchmechanismen und statistische Aussagen, die aus der Seismologie übertragen werden können, eingegangen. Das Hauptaugenmerk soll auf dem Steinkohlenbergbau in Deutschland liegen, der sich zur Zeit auf einige Reviere in Nordrhein-Westfalen und im Saarland beschränkt.

Für die Arbeiter unter Tage können spezielle seismische Ereignisse die sogenannten Gebirgsschläge gefährlich werden. „*Unter einem Gebirgsschlag ist ein schlagartiges Entspannen von Gebirgsschichten mit Einwirkungen auf Grubenbaue zu verstehen*“ (aus *Richtlinien des Landesoberbergamtes NRW* ([Land97], 1997)). Aus dieser Definition geht hervor, dass eine Beschädigung des Grubengebäudes nicht ausgeschlossen ist. Vorhersage und Prävention von Gebirgsschlägen stellen wichtige Grundlagen für die untertägige Entnahme von Rohstoffen dar. Zu dieser Thematik existieren viele Untersuchungen (z. B. *Bräuner* ([Brau94], 1994)), deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit nicht genauer auf sie eingegangen.

### 2.1 Seismische Ereignisse und mögliche Ursachen

Ein plötzlicher Bruch von Gestein im Gebirge mit einer einhergehenden schlagartigen Freisetzung von Energie in Form elastischer Wellen wird als seismisches Ereignis bezeichnet. Diese Definition trifft auch auf Erdbeben zu. In dieser Arbeit werden ausschließlich durch menschliche Eingriffe induzierte seismische Ereignisse betrachtet.

Unter menschlichen Eingriffen wird die Entnahme von Rohstoffen (z.B. Öl, Erz, Steinkohle etc.) aus dem Gebirge verstanden, was zu Spannungsumlagerungen und Ausgleichsbewegungen im Gebirge führt. Allgemein setzt sich der Spannungszustand im Gebirge aus tektonischen und induzierten Spannungen sowie dem Überlagerungsdruck aufgrund der Gewichtskraft des überlagernden Gebirges zusammen. Die induzierten Spannungen können dabei einen großen Einfluss insbesondere in der Umgebung eines Abbaus ausüben. Im Vorfeld eines Strebendes kommt es zu einem starken Anstieg der vertikalen Zusatzspannungen und zur Ausbildung eines Maximums vom 2- bis 20-fachen des Überlagerungsdruckes (*Räkers* ([Raek]), S. 13, 1989)), wie es in Abbildung (2.1) skizziert ist. Dieses liegt in dem bergmännisch geschaffenen Hohlraum begründet, der keine vertikalen Spannungen übertragen kann. Die vertikalen Spannungen müssen somit durch Spannungsumlagerungen im Strebenvorfeld wirken. Aus dem gleichen Grund liegen in der Umgebung von Abbaupfeilern und Abbaukanten erhöhte Spannungen vor. Kompetente Gesteinsschichten können in gewissem Umfang die erhöhten Spannungen akkumulieren, brechen indes bei Überschreiten

ihrer Bruchfestigkeit. Hierbei kommt es zur Emission seismischer Wellen. An der Tagesoberfläche können diese Wellen als Erdschütterungen registriert und teilweise von der Bevölkerung verspürt werden.

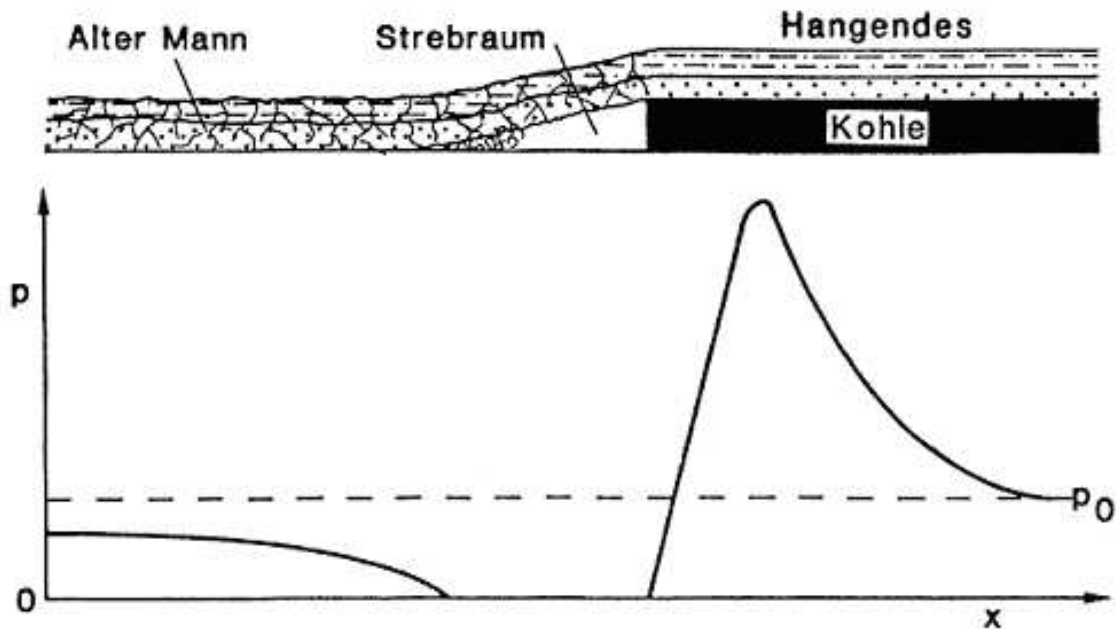


Abb. 2.1: Skizzierung der Druckverteilung im Bereich des Strebes (aus *Räkers* ([Raek]), 1989, S. 14)

*Knoll et al.* ([Knol80], 1980) führen in ihrem Artikel die Voraussetzungen, Ursachen und Bedingungen an, die für das Auftreten von seismischen Ereignissen notwendig sind. Ferner unterscheiden *Knoll et al.* zwischen zwei unterschiedlichen Gruppen von seismischen Ereignissen, auf die im nächsten Abschnitt genauer eingegangen wird. Diese Einteilung in zwei Gruppen wird auch von anderen Autoren wie z.B. *Gibowicz* ([Gibo90a], 1990), *Johnston* und *Einstein* ([John90], 1990) und *McGarr* und *Simpson* ([McGa97], 1997) verwendet.

### 2.1.1 Gruppierung induzierter seismischer Ereignisse

*Gibowicz* und *Kijko* ([Gibo94], 1994) geben an, dass eine Einteilung der seismischen Ereignisse in zwei Gruppen nahezu weltweit beobachtet werden kann. In die erste Gruppe fallen alle seismischen Ereignisse, die direkt mit dem Abbaufortschritt korreliert werden können, und mit Brüchen in der Nähe der Abbaufont zusammenhängen. Bruchvorgänge, die an großen geologischen Störungen stattfinden, bilden die zweite Gruppe von Ereignissen. Neben den Ereignisorten unterscheiden sich die beiden Gruppen in der Stärke der einzelnen Ereignisse. Im allgemeinen sind die Ereignisse der zweiten Gruppe wesentlich stärker als die der ersten Gruppe. Ihre Anzahl ist zumeist geringer als die Anzahl der Ereignisse der ersten Gruppe, über die deshalb mehr Eigenschaften bekannt sind. *Johnston* und *Einstein* ([John90], 1990) geben in ihrem Artikel einen Überblick über die weltweit beobachteten Eigenschaften der beiden Gruppen, die in Tabelle (2.1) wiedergegeben sind.



Gruppe 1	Gruppe 2
Die Ereignisanzahl ist eine Funktion der Abbauaktivität.	Es existieren nicht genügend Daten, um einen Zusammenhang mit der Abbauaktivität zu erkennen.
Der Ereignisort liegt innerhalb von 100 m zur Strebfront oder an existierenden Schwachzonen bzw. geologischen Störungen nahe des Strebs.	Der Ereignisort liegt bei einer existierenden Störung, die bis zu 3 km entfernt sein kann.
Intaktes Gestein kann brechen, wenn die induzierten Spannungen die Scherfestigkeiten des Materials übersteigen. Die Orientierungen der Bruchflächen können variieren.	Alle Ereignisse treten an existierenden, möglicherweise unter Spannung stehenden tektonischen Störungen auf. Der Abbau löst die Ereignisse nur an Störungen mit bevorzugten Richtungen aus.
Es wird oft ein hoher Spannungsabfall beobachtet.	Der Spannungsabfall ist ähnlich zu natürlichen Erdbeben.
Kleine bis mittlere Magnituden.	Potential für große Magnituden.

Tabelle 2.1: Eigenschaften seismischer Ereignisse nach Gruppen (aus *Johnston* und *Einstein* ([John90], 1990))

Die Teufen der Ereignisse der Gruppe 1 sind nach *Johnston* und *Einstein* ([John90], 1990) durch die unterschiedlichen Gebirgsschichten verschiedener Ausprägung beeinflusst. Die Ereignisorte befinden sich sowohl im Liegenden als auch im Hagenden (z.B. *Hinzen* ([Hin82], 1982); *Uhl et al.* ([Uhl04], 2004)), meist innerhalb einer 100 m-Umgebung um den Streb (Tabelle (2.1)). *Lasocki* ([Laso93], 1993) zeigt in einer Ereignisverteilung, dass die Ereignisse der Gruppe 1 bis zu 150 m im Alten Mann liegen können. *Sato* und *Fujii* ([Sato88], 1988) lokalisieren an einem Beispiel  $\frac{2}{3}$  der Gruppe 1 Ereignisse in einem Bereich 20 m im Alten Mann bis 60 m im Strebvorfeld. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch *Cook* ([Cook76], 1976). Nach *Johnston* und *Einstein* ([John90], 1990) kann es zu einer Konzentration der Ereignisse an bestimmten Orten kommen, wenn dieses durch geologische oder geomechanische Eigenschaften des Gebirges begünstigt wird. Der Ereignisort der Gruppe 2 Ereignisse ist durch das Vorhandensein von Störungen und tektonischen Spannungen bestimmt.

Die Abbildung (2.2) bezieht sich auf eine Anzahl von 843 georteten Ereignissen, die durch einen Abbau in Polen in mehr als 2 Jahren induziert wurden. Zu erkennen ist, dass sich die größte Anzahl an auftretenden Ereignissen direkt in der Umgebung des Strebes befindet. Die größte kumulierte seismische Energie wurde ca. 12 m vor der Strebfront registriert, und fällt mit dem theoretischen Maximum der vertikalen Spannungen zusammen.

Die dargestellte Erschütterungssituation ist ein gutes Beispiel für Ereignisse der ersten Gruppe, bei denen die induzierten Spannungen einen großen Einfluss haben. Ein regionales tektonisches, zum Teil auch durch ganze Abbaufelder beeinflusstes Spannungsfeld wirkt sich hingegen auf das Auftreten der Ereignisse aus Gruppe 2 aus.

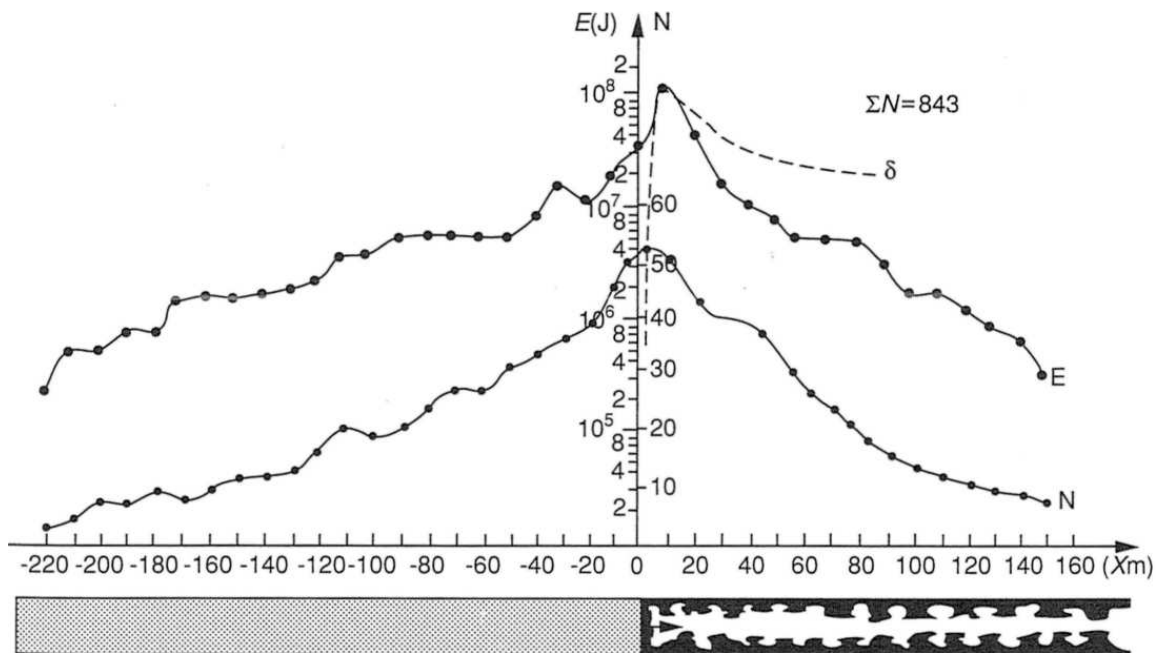


Abb. 2.2: Verteilung der Anzahl der Ereignisse  $N$  und ihrer seismischen Energie  $E$  gegenüber der Entfernung zum Streb - theoretische Werte der vertikalen Spannungen  $\sigma$  (in der Abbildung  $\delta$ ) (aus Syrek und Kijko ([Syre88], 1988))

### 2.1.2 Ortung seismischer Ereignisse und Zuordnung zu einer Bauhöhe

Die Ortung eines seismischen Ereignisses wird angewendet, um den für den Bruchvorgang ursächlichen Abbau zu bestimmen. Hierfür sind mehrere Seismogramme geeigneter positionierter Stationen notwendig, die zusätzlich zeitlich präzise zuordbar sein müssen. Eine geeignete Stationsgeometrie ist zum Beispiel die Umstellung eines Abbaus mit drei Stationen zu einem Dreieck (vgl. Fritschen ([Frit03], 2003)). Über diese drei Stationen ist eine Bestimmung des Ereignisortes möglich.

Eine einfache Ortungsroutine verwendet die Einsatzzeiten  $t_i$  an den einzelnen Stationen. Diese sind beispielsweise durch die Erstregistrierung der Kompressionswelle (P-Welle) gegeben. Gesucht ist die Originalzeit  $t_0$  und die Koordinaten  $(x_0, y_0, z_0)$  des seismischen Ereignisses. Für die Bestimmung des Ereignisortes kann  $z_0$  in einer plausiblen Tiefe festgehalten werden. Mit der Methode der kleinsten Quadrate können die gesuchten Koordinaten  $(x_0, y_0, z_0)$  wie folgt berechnet werden:

$$\text{minimiere } F(x_0, y_0, z_0, t_0) \quad (2.1)$$

mit

$$F(x_0, y_0, z_0, t_0) = \sum_{i=1}^n \left( t_i - t_0 - T_i(x_0, y_0, z_0) \right)^2$$

$t_0$  : gesuchter Zeitpunkt, der Beginn des Bruchvorganges

$t_i$  : Einsatzzeit an der i-ten Station

$T_i(x_0, y_0, z_0)$  : berechnete Laufzeit vom Bruchort zur i-ten Station

$T_i(x_0, y_0, z_0)$  wird unter Verwendung eines Geschwindigkeitsmodells und unter Berücksichtigung der Einsatzzeiten der P-Welle an den Stationen zumeist fehlerbehaftet berechnet. Die Vorschrift (2.1) führt auf ein lineares Gleichungssystem, welches mit numerischen Verfahren gelöst werden kann. Eine Überbestimmung des obigen Systems kann zu einer Verbesserung der Ortung führen. Neben dieser einfachen Routine existieren weitere Ortungsverfahren, die z.B. bei *Gibowicz* und *Kijko* ([Gibo94], S. 48 ff., 1994) beschrieben werden.

Die Genauigkeit der Ortung wird erhöht, wenn die Stationen geeignet zum Bruchort liegen. Da bei den seismischen Ereignissen im deutschen Steinkohlenbergbau von einem Ereignisort in der Nähe des aktuellen Strebstandes ausgegangen werden kann, heißt das, dass die Stationen den gesamten Abbau umstellen sollten. Soll insbesondere  $z_0$  nicht in einer Teufe festgehalten werden, sondern auch über Gleichung (2.1) bestimmt werden, so ist die Registrierung einer untertägigen Station vorteilhaft, da sie die Unsicherheit in z-Richtung deutlich reduziert.

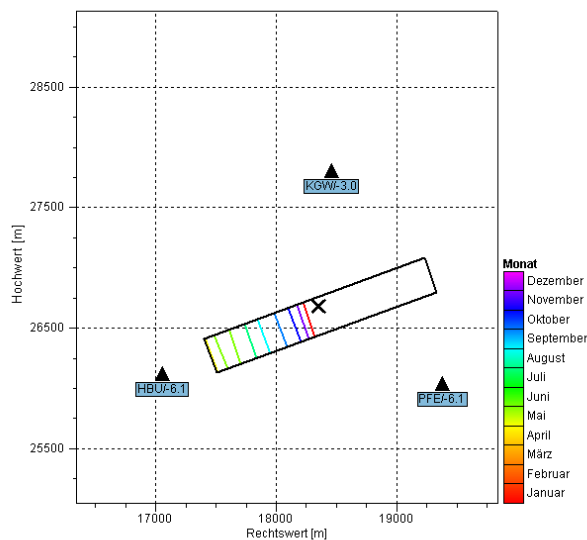


Abb. 2.3: Umstellung der Bauhöhe S708 (BW Ost, Flöz Sonnenschein) mit drei Stationen und Darstellung des Ereignisortes (Kreuz). Die Strebstände sind farblich (siehe Legende) dargestellt.

Ist das obige System (2.1) unterbestimmt, weil z. B. das Ereignis nur an einer Station registriert wird, so ist eine Ortung über den obigen Algorithmus nicht möglich. Eine Zuordnung des seismischen Ereignisses zu einer Bauhöhe ist hingegen nicht prinzipiell ausgeschlossen. Zumeist kann über die Laufzeitdifferenz zwischen der Kompressions- und der Scherwelle ein Rückschluss auf eine Bauhöhe gezogen werden. Im deutschen Steinkohlenbergbau ist die Stationsdichte auf den einzelnen Bergwerken unterschiedlich, so dass nicht überall eine Ortung der Ereignisse geschehen kann. Häufig ist es aber möglich, die für die Erschütterung verantwortliche Bauhöhe zu bestimmen.

### 2.1.3 Unterschiedliche Bruchtypen

Indem die seismischen Ereignisse in Bezug auf ihre Bruchmechanismen untersucht werden, kann die oben aufgeführte grobe Unterteilung in zwei Gruppen von seismischen Ereignissen verfeinert werden.

*Hasegawa et al.* ([Hase89], 1989) stellen in ihrem Artikel sechs Modelle von Bruchvorgängen im kanadischen Untertageabbau vor. Diese sind in Abbildung (2.4) dargestellt. Dabei stellen die Punkte (a), (b) und (c) Modelle für nicht Scherbrüche dar. Eine genauere Darstellung hierfür ist bei *Gibowicz und Kijko* ([Gibo94], S. 220, 1994) zu finden. Die drei letzten Punkte (d), (e) und (f) geben Scherbrüche wieder. Ein Scherbruch ist nach *Fritschen* ([Frit], S. 8, 2001) ein Bruchvorgang mit einer Verschiebung entlang einer Bruchfläche, die zu keiner Volumenänderung führt. Ferner lässt sich nach *Fritschen* ([Frit], 2001) ein Großteil der in Bergbaugebieten beobachteten Ereignisse durch Scherbrüche erklären. Die zur Beschreibung eines Scherbruchs verwendeten Herdparameter sind in Abbildung (2.5) wiedergegeben und im weiteren Text erläutert.

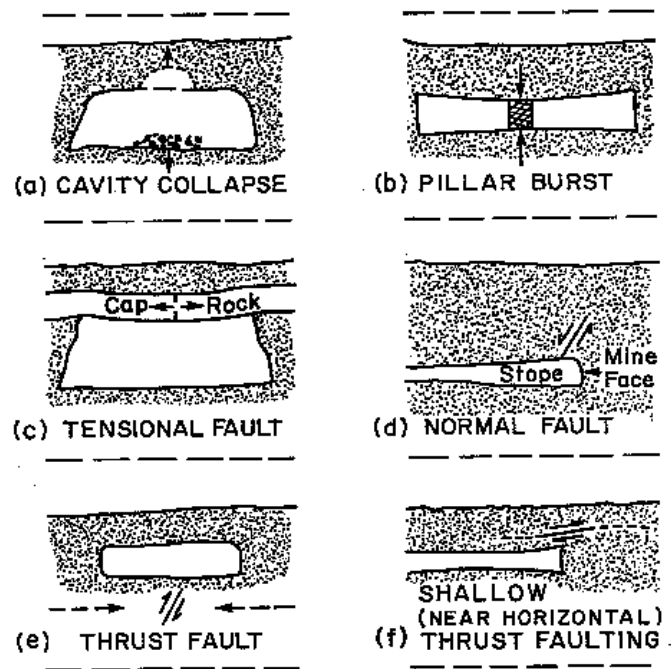


Abb. 2.4: Unterschiedliche Bruchtypen im kanadischen Bergbau (aus *Hasegawa et al.* ([Hase89], 1989))

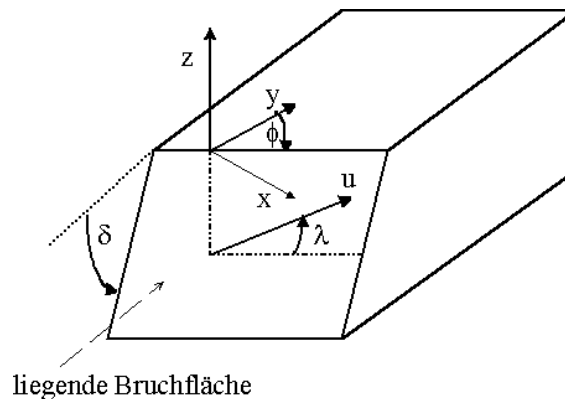


Abb. 2.5: Darstellung der Bruchfläche eines Scherbruchs und die Herdparameter (Erklärung siehe folgenden Text)

In Abbildung (2.5) ist der liegende Teil des Bruchs dargestellt, bei dem die Verschiebung des hängenden Teils in Richtung  $u$  geschieht. Die einzelnen Winkel ermöglichen die genaue Beschreibung des Bruchs im Raum. Dazu wird vereinbart, dass die  $x$ -Richtung nach Osten und die  $y$ -Richtung nach Norden zeigt. Die  $z$ -Richtung steht auf dieser aufgespannten Fläche orthogonal und zeigt nach oben. Das Streichen  $\phi$  wird im mathematisch negativen Sinn von Norden aus bestimmt, das Einfallen (dip)  $\delta$  wird relativ zur horizontalen Fläche angegeben. In der Verschiebungsebene zwischen der Horizontalen und der Verschiebungsrichtung wird der Gleitwinkel (slip)  $\lambda$  bestimmt.

## 2.2 Bruchtypen im deutschen Steinkohlenbergbau und deren Einteilung

Auch im deutschen Steinkohlenbergbau kommt es bei einigen Bauhöhen zu einer Vielzahl seismischer Ereignisse. Dieser Abschnitt behandelt die verschiedenen Bruchtypen, die dort beobachtet werden. Nach *Knoll et al.* ([Knol84], 1984) sind die seismischen Ereignisse im Ruhrgebiet vorwiegend in die erste Gruppe einzuordnen, können demnach direkt mit der Abbauaktivität korreliert werden. Dieses gilt auch für den Steinkohlenbergbau im Saarland.

Für die Einteilung der Bruchtypen im deutschen Steinkohlenbergbau wird im Weiteren die Einteilung nach *Fritschen* verwendet, wie es z.B. bei *Uhl et al.* ([Uhl04], 2004) geschieht. *Fritschen* nimmt bisher eine Einteilung in drei Typen vor. Dabei handelt es sich um zwei Scherbrüche und einen bisher nicht weiter bestimmten Bruchtyp, der allerdings kein Scherbruch ist. Alle drei Typen gehören zur ersten Gruppe von Ereignissen. Die Abbildung (2.6) gibt die Modellvorstellung zu den Typen wieder. Dabei beziehen sich die vertikalen Abstände zwischen den brechenden Schichten und dem Abbau auf die Situation im Saarland.

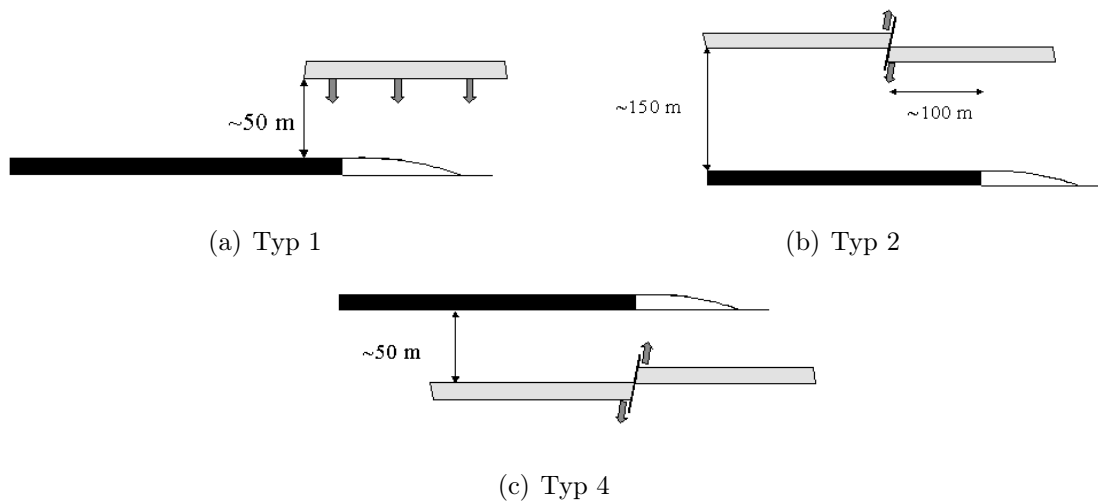


Abb. 2.6: Unterschiedliche Bruchtypen im deutschen Steinkohlenbergbau, die aus Berechnungen bestimmt wurden (aus Uhl *et al.* ([Uhl04], 2004))

Der in Abbildung (2.6(a)) dargestellte Bruchmechanismus ist kein Scherbruch und wurde ca. 50 m im Hangenden eines Abbaus lokalisiert. Uhl *et al.* ([Uhl04], 2004) vermuten einen vorwiegend nach unten verlaufenden Bruchvorgang. Auch die Brüche vom Typ 2 (2.6(b)) finden im Hangenden statt mit einer steilen Bruchfläche und einem annähernd strebparallelen Streichen der Bruchfläche. Dabei brechen die Schichten zum Alten Mann. Typ 4 Ereignisse (2.6(c)) geschehen im Liegenden des Abbaus. Die Verschiebung der Bruchfläche ist gegenüber den Typ 2 Ereignissen umgekehrt.

Im Gegensatz zu der oben von Fritschen ([Frit], 2001) zitierten Aussage, die sich auf Untersuchungen im Ruhrgebiet bezog, dass sich die meisten der registrierten seismischen Ereignisse durch Scherbrüche erklären lassen, zeigt eine Untersuchung aus dem Saarland, dass hier der überaus größte Teil der Ereignisse vom Typ 1 ist, bei dem es sich nicht um einen Scherbruch handelt. Dieses wird in der Abbildung (2.7) verdeutlicht.

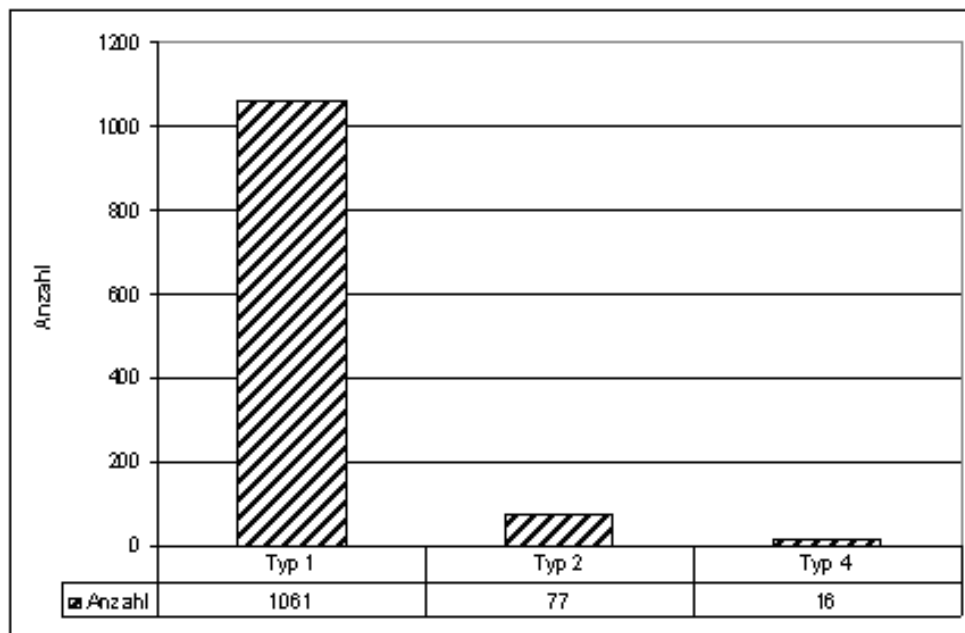


Abb. 2.7: Anzahl der Ereignisse nach Typen an einem Beispiel aus dem Saarland (aus Wolff ([Wolf05], 2005))

Bei der Abbildung wurden Daten zugrunde gelegt, die Sroka ([Srok01], 2001) in seinem Gutachten über die Erschütterungssituation im Saarland verwendet. Dabei handelt es sich um den gleichen Doppelbetrieb bestehend aus den beiden Streben 8.7 Ost und 8.8 Ost im Flöz Schwalbach des heutigen Bergwerkes Saar, der auch von Uhl *et al.* ([Uhl04], 2004) betrachtet wird. Deutlich wird, dass innerhalb eines Jahres (01.11.2000 - 30.10.2001) weniger als 10% der insgesamt 1154 registrierten seismischen Ereignisse Scherbrüche waren.

Uhl *et al.* ([Uhl04]) nehmen Bezug auf die Situation im Saarland. Allerdings werden auch im Ruhrgebiet unterschiedliche Bruchtypen registriert (Fritschen *et al.*, ([Frit04], 2004)). An einem Messfall (Abbildung (2.8)) aus dem östlichen Ruhrgebiet wird der Zusammenhang zwischen den Ereignissen und der Abbauaktivität deutlich. Den Abbaufortschrittsklassen ist die mittlere Ereignisanzahl pro Tag gegenübergestellt. Der Zusammenhang ist nahezu linear. Eine Verdopplung des Abbaufortschritts führt annähernd zu einer Verdopplung der Ereignisanzahl. In diesem Beispiel führt somit eine Erhöhung des Abbaufortschrittes nicht zu einem Anstieg der Ereignisanzahl pro abgebautem Meter.

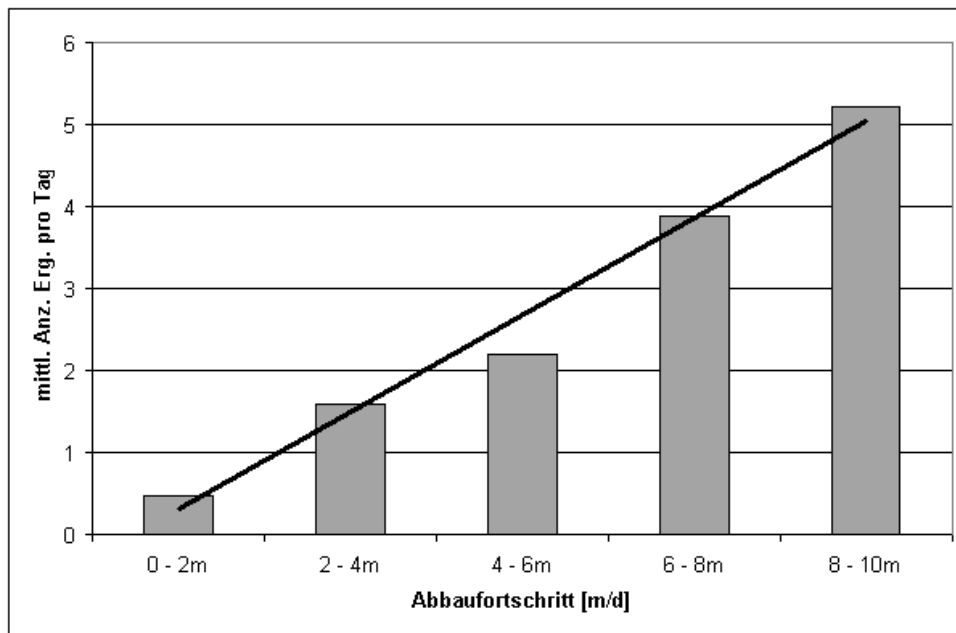


Abb. 2.8: Zusammenhang zwischen dem Abbaufortschritt und der Ereignisanzahl für einen selektierten Abbau (aus *Wolff* ([Wolf04], 2004))

## 2.3 Die seismische Energie und die lokale Magnitude

Um seismische Ereignisse zu unterscheiden, ist nicht nur eine Einteilung in Gruppen oder Bruchmechanismen notwendig, vielmehr ist auch die Stärke eines seismischen Ereignisses eine Charakterisierung. In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Stärkemaße eingeführt: Die seismische Energie einerseits und zum anderen die lokale Magnitude.

### 2.3.1 Die seismische Energie

Der Bruchvorgang führt in seiner Folge zu seismischen Wellen, das heißt zu einer Ausbreitung von Energie. Die Summe der gesamten Energie, die in Form seismischer Wellen das Gebirge durchläuft, wird als seismische Energie definiert. Eine Berechnung der seismischen Energie ist aus den aufgezeichneten Seismogrammen möglich, unabhängig von der Lage des Aufnehmers in Bezug auf den Bruchherd. *Schneider* ([Schn75], S. 85, 1975) gibt für die Bestimmung der seismischen Energie folgende Gleichung an:



$$E_{seis} = 4\pi r^2 \rho \left[ \underbrace{v_p e^{\tilde{a}_p r} \int_{t_1}^{t_2} \dot{u}^2 dt}_{\text{Anteil P-Welle}} + \underbrace{v_s e^{\tilde{a}_s r} \int_{t_2}^{t_3} \dot{u}^2 dt}_{\text{Anteil S-Welle}} \right] \quad (2.2)$$

$t_1$  : Einsatzzeit der P-Welle

$t_2$  : Einsatzzeit der Scherwelle (S-Welle)

$t_3$  : Ende des aufgezeichneten Signals

$r$  : Entfernung vom Schwingungsaufnehmer zum Ereignisherd

$\rho$  : Gesteinsdichte am Registrierort

$v_p, v_s$  : seismische Geschwindigkeit der P- bzw. S-Welle am Registrierort

$\tilde{a}_p, \tilde{a}_s$  : räumlicher Absorptionskoeffizient für die P- bzw. S-Welle

$\dot{u}$  : registrierte Schwinggeschwindigkeit  $\dot{u} = \sqrt{\dot{u}_x^2 + \dot{u}_y^2 + \dot{u}_z^2}$

Die seismische Energie setzt sich aus den Anteilen der P- bzw. S-Welle zusammen. Angemerkt sei, dass die seismische Energie nur einen kleinen Teil der beim Bruch freigesetzten Energie ausmacht. Ein weitaus größerer Teil wird z.B. in Wärme umgesetzt, oder beim Bruchvorgang selbst benötigt. Eine exaktere Energiedefinition müsste zusätzlich die Abstrahlcharakteristik des Bruchs berücksichtigen. Diese ist indessen nicht immer bekannt. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb an allen Stationen, die das seismische Ereignis registriert haben, die seismische Energie nach Gleichung (2.2) bestimmt, und der Wert des geometrischen Mittels als seismische Energie des Ereignisses genommen.

Für den Doppelbetrieb (8.7 Ost / 8.8 Ost, BW Saar, Flöz Schwalbach), auf den sich die Werte aus Abbildung (2.7) beziehen, wurden für die drei untersuchten Typen stark voneinander abweichende maximale seismische Energien berechnet, was in Abbildung (2.9) dargestellt ist. Die maximale Stärke eines Typ 4 Ereignisses war um einen Faktor 10 größer als das maximale Ereignis vom Typ 1. Von den über 1000 Typ 1 Ereignissen besaßen mehr als 90% eine seismische Energie kleiner  $10^6 J$ , wohingegen von den 16 Typ 4 Ereignissen nur ein Ereignis eine seismische Energie kleiner  $10^6 J$  besaß.

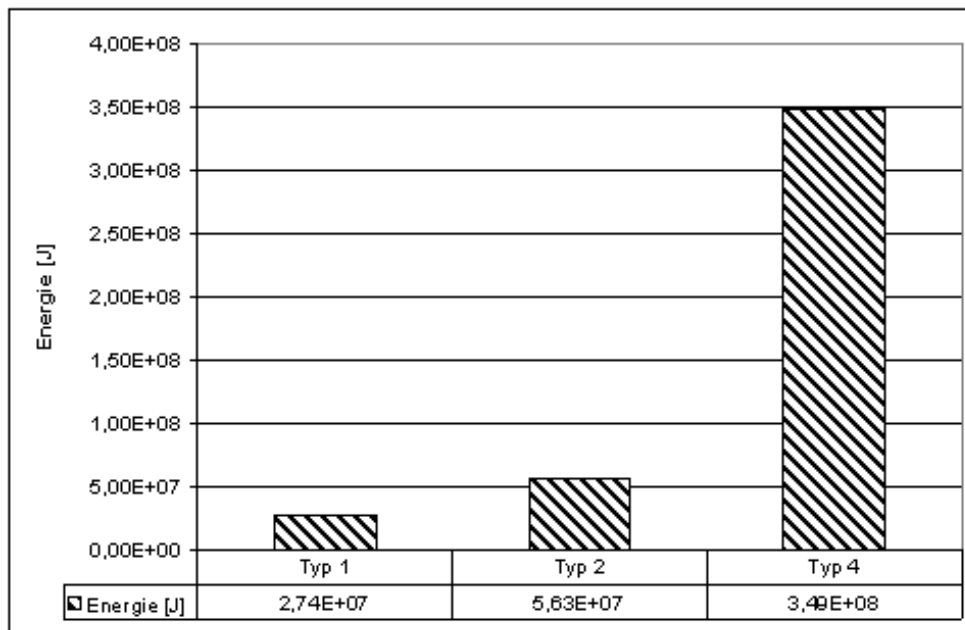


Abb. 2.9: Maximale Energie nach Typen (aus Wolff ([Wolf05], 2005))

Dieses Beispiel macht die Bedeutung der seismischen Energie für die Charakterisierung von seismischen Ereignissen deutlich. Eine Einteilung in Typen beinhaltet nur im begrenzten Umfang Informationen über die Stärke, da es innerhalb eines Typs zu größeren Abweichungen in Bezug auf die Energie kommen kann.

### 2.3.2 Die lokale Magnitude

Die bergbauinduzierten seismischen Ereignisse werden zum Teil auch von den seismologischen Observatorien in Deutschland erfasst, die zur Charakterisierung die lokale Magnitude angeben. Diese ist neben der seismischen Energie ein weiteres Merkmal für die Stärke eines seismischen Ereignisses. Die lokale Magnitude ist nicht die einzig existierende Magnitudendefinition. Einen Überblick über die unterschiedlichen Magnitudendefinitionen und deren Zusammenhänge ist bei *Utsu* ([Utsu02], S.733, 2002) zu finden. Für die lokale Magnitude ( $M_l$ ) gilt (siehe *Fritschen* ([Frit], 2001, S. 11)):

$$\begin{aligned}
 M_l &= \log(u) - \log(u_0) \\
 &= \log\left(\frac{u}{u_0}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Hierbei bezeichnet  $u$  die gemessene Bodenverschiebung.  $u_0$  ist ein Skalierungswert, der eine Referenzverschiebung angibt.

Die lokalen Magnitudenwerte für das Ruhrgebiet werden vom *geophysikalischen Institut der Ruhr-Universität Bochum*<sup>1</sup> auf seiner Internetseite veröffentlicht. Für das Saarland werden die Werte durch den *Landeserdbebendienst an der Universität Freiburg*<sup>2</sup> mitbestimmt. Beispielhaft gibt Tabelle (2.2) die lokalen Magnituden für ausgewählte Ereignisse aus dem saarländischen Steinkohlenbergbau wieder.

<sup>1</sup><http://www.geophysik.ruhr-uni-bochum.de> (Stand: September 2005)

<sup>2</sup><http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb> (Stand: September 2005)

Zeit	lokale Magnitude ( $M_l$ ) <sup>3</sup>
25.01.2005 07:59:27	2,5
21.02.2005 12:57:52	2,3
30.04.2005 04:46:54	2,0
05.05.2005 02:02:30	2,4
15.05.2005 15:46:44	3,3
02.07.2005 11:30:50	2,6

Tabelle 2.2: Lokale Magnitude einiger starker Erschütterungen im Saarland

Magnitudenwerte von über 3,0 sind im deutschen Steinkohlenbergbau selten und werden nur von sehr starken Ereignissen erreicht.

## 2.4 Die Bewertung von Erderschütterungen

Neben der seismischen Energie oder der lokalen Magnitude ist die Einwirkung der resultierenden Erderschütterungen auf Gebäude von Interesse. Um diese zu messen, sind in den deutschen Steinkohlenabbaugebieten Schwingungsaufnehmer platziert, die die Ereignisse nach DIN 4150-3 (Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen) aufnehmen. Die dort in  $\frac{mm}{s}$  gemessenen Schwinggeschwindigkeiten sind zum einen von der Entfernung des Messortes zum Bruchort und zum anderen vom Bruchmechanismus abhängig. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten nehmen mit der Entfernung ab. Es folgt daraus, dass ein seismisches Ereignis an der Tagesoberfläche oder im Gebirge unterschiedlich stark wahrgenommen wird. Somit können die an einzelnen Punkten ermittelten Schwinggeschwindigkeiten nicht als ein Maß für die Stärke eines seismischen Ereignisses dienen.

Für die Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Gebäude ist auch der Frequenzbereich der seismischen Wellen und die Einwirkungsdauer von Bedeutung. Die Dauer einer induzierten Erschütterung in deutschen Bergbaugebieten beträgt weniger als eine Sekunde bis zu einigen Sekunden. Diese zählt deshalb nach DIN 4150-3 zu den kurzzeitigen Erschütterungen. Entscheidend für die Beurteilung ist die Frequenz des Signalmaximums. *Fritschen* ([Frit03], 2003) geht im deutschen Steinkohlenbergbau von einem Frequenzbereich von 5 Hz bis 12 Hz für induzierte Erschütterungen aus. Derzeitige Messungen ergeben in einigen Fällen dominierende Frequenzen unter 3 Hz.

Tabelle (2.3) gibt für verschiedene seismische Ereignisse die maximal gemessene Schwinggeschwindigkeit, die zugehörige Frequenz und die Beschleunigung an (vgl. Tabelle (2.2)). Die Beschleunigung ist die zeitliche Ableitung der Schwinggeschwindigkeitskurve. Neben diesen Werten wird auch die unten definierte Dauer angegeben, die zusammen mit der maximal resultierenden horizontalen Schwinggeschwindigkeit sehr gut mit registrierten schwingungsbedingten Schäden korreliert (vgl. *Sroka* ([Srok05], 2005)). Sie ist indirekt über die relative Energiedichte definiert für welche

$$I_{RV}(t_k) = \frac{\int_0^{t_k} (\dot{u}_x^2 + \dot{u}_y^2) dt}{\int_0^{t_v} (\dot{u}_x^2 + \dot{u}_y^2) dt} \quad (2.4)$$

<sup>3</sup><http://www.deutsche-steinkohle.de/content.php?id=12> (Stand: September 2005)

gilt.

$\dot{u}_x, \dot{u}_y$  : horizontale Werte der Schwinggeschwindigkeiten

$t_v$  : gesamte Erschütterungszeit

$I_{RV}(t_k)$  : relative Energiedichte zum Zeitpunkt  $t_k$

Die Zeitdauer ist als Zeitspanne definiert, in der die relative Intensität 5 % und 95 % beträgt.

Zeit	Max v $\frac{mm}{s}$	Freq. $Hz$	Beschl. $\frac{mm}{s^2}$	Dauer $s$
25.01.2005 07:59:27	5,24	4,64	320,30	1,5
21.02.2005 12:57:52	1,55	2,93	51,23	1,7
30.04.2005 04:46:54	1,14	5,86	44,06	1,4
05.05.2005 02:02:30	3,7	5,61	183,35	1,6
15.05.2005 15:46:44	11,63	6,59	607,92	0,6
02.07.2005 11:30:50	7,74	5,37	290,46	1,1

Tabelle 2.3: Maximale Schwinggeschwindigkeit, zugehörige Frequenz und Beschleunigung einiger starker Erschütterungen im Saarland und deren Dauer<sup>4</sup>

Eine Grenze, ab der Erschütterungen im relevanten Frequenzbereich Schäden an Gebäuden hervorrufen, existiert nicht. Die DIN 4150-3 gibt Anhaltswerte an, bis zu denen keine Schäden eintreten. Aber auch oberhalb dieser Werte müssen nicht zwangsweise Beeinträchtigungen an Gebäuden hervorgerufen werden. In Tabelle (2.4) sind die Anhaltswerte wiedergegeben. Diese Anhaltswerte variieren frequenzabhängig für Wohngebäude zwischen 5 und 20  $\frac{mm}{s}$  und für gewerblich genutzte Bauten von 20 bis 50  $\frac{mm}{s}$ . Von den über 2350 seismischen Ereignissen im deutschen Steinkohlenbergbau, die von der Deutschen Montan Technologie GmbH im ersten Halbjahr 2005 registriert worden sind, besaßen nur 21 Ereignisse eine Schwinggeschwindigkeit größer 5  $\frac{mm}{s}$ .

<sup>4</sup><http://www.deutsche-steinkohle.de/content.php?id=12> (Stand: September 2005)  
Dauer: Berechnung DMT

Zeile	Gebäudeart	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit $v_i$ in $\frac{mm}{s}$ ( $i=x,y,z$ )			
		Fundament			Oberste Deckenebene,- horizontal
		1Hz - 10Hz	10Hz - 50Hz	50Hz - 100Hz*)	alle Frequenzen
1	Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	20	20 bis 40	40 bis 50	40
2	Wohngebäude und in ihrer Konstruktion und/oder Nutzung gleichartige Bauten	5	5 bis 15	15 bis 20	15
3	Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und Zeile 2 entsprechen und besonders erhaltenswert (z.B. unter Denkmalschutz stehend) sind	3	3 bis 8	8 bis 10	8
*) Bei Frequenzen über 100Hz dürfen mindestens die Anhaltswerte für 100Hz angesetzt werden.					

Tabelle 2.4: Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeiten bei kurzzeitigen Erschütterungen nach DIN 4150-3 (aus: *DIN-Taschenbuch 289: Schwingungsfragen im Bauwesen* ([Beuth], 2002))

## 2.5 Gutenberg-Richter-Beziehung

In der Auswertung seismischer Ereignisse, die durch bergbauliche Aktivitäten verursacht werden, werden auch Beziehungen verwendet, wie sie bei natürlichen Erdbeben zu finden sind. Hierzu gehört insbesondere die empirische *Gutenberg-Richter Beziehung*. Diese gibt einen Zusammenhang zwischen der lokalen Magnitude  $M_l$  und der Anzahl  $N$  an seismischen Ereignissen wieder (z. B. *Kijko* ([Kijk97], 1997)):

$$\log(N) = \gamma - \chi \cdot M_l \quad (2.5)$$

Dabei kann  $\chi$  als das Verhältnis von starken Ereignissen zu der Gesamtzahl an Ereignissen gesehen werden.  $\gamma$  gilt als ein Maß für die Seismizität. Beide Parameter sind typisch für eine Abbauregion und müssen für jede Bauhöhe neu bestimmt werden. Für eine Bauhöhe gelten sie für einen betrachteten Zeitabschnitt, können aber für ein anderes Zeitintervall von den zuvor bestimmten Werten abweichen.

Neben dieser Beziehung sind die beiden in Kapitel (2.3) eingeführten Stärkemaße lokale Magnitude  $M_l$  und seismische Energie  $E$  ebenfalls über eine empirische Beziehung verknüpft,

$$\log(E) = \alpha + \beta \cdot M_l \quad (2.6)$$

mit von der Geologie abhängigen Parametern  $\alpha$  und  $\beta$ .

Die Kombination der beiden Beziehungen (2.5) und (2.6) setzt die Anzahl der seismischen Ereignisse zu der freigesetzten seismischen Energie  $E$  in Relation,

$$\log(N) = a - b \cdot \log(E) \quad (2.7)$$

wobei  $a$  auch hier ein Maß für die Seismizität ist und  $b$  als das Verhältnis von starken Ereignissen zu der Gesamtzahl an Ereignissen gesehen werden kann.

Die dargestellte Beziehung (2.7) konnte anhand von Beispielen (*Fritschen* ([Frit], S. 47, 2001)) auch im deutschen Steinkohlenbergbau nachgewiesen werden. Abbildung (2.10) gibt die Beziehung für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost im Saarland für einen achtzehnmonatigen Zeitraum wieder. Dabei wurde der Logarithmus der Anzahl der Ereignisse  $\log_{10} N$  mit einer Energie größer  $E$  gegenüber dem Logarithmus  $\log_{10} E$  aufgetragen. Hierbei ist deutlich der lineare Zusammenhang für die Energiespanne von  $6,3 \cdot 10^5 J$  bis  $10^7 J$  zu erkennen. Die Abweichung von der linearen Beziehung für geringere Energiewerte ist damit zu begründen, dass viele seismische Ereignisse niedriger Stärke nicht erfasst werden.

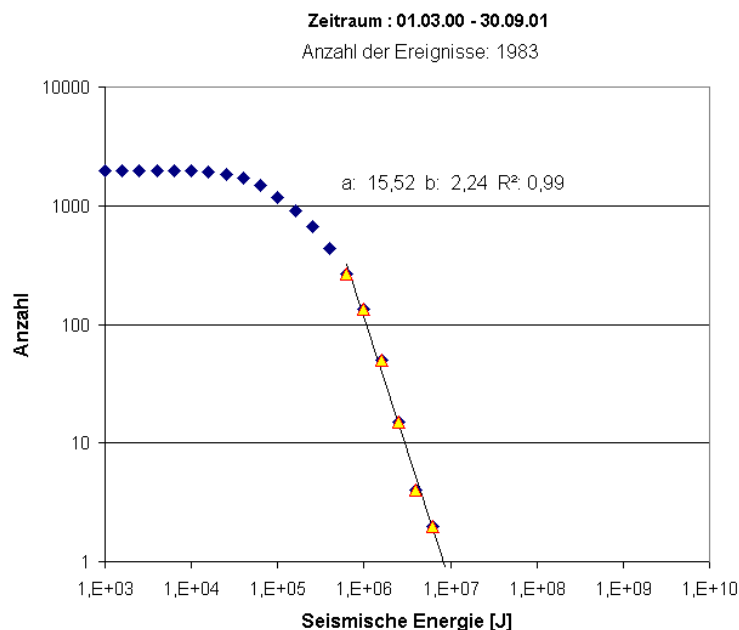


Abb. 2.10: Darstellung der Energie-Häufigkeitsbeziehung für achtzehn Monate: BW Saar Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost

Es wird vermutet, dass eine obere Grenze  $E_{max}$  bzw.  $M_{l,max}$  für die Stärke eines Erdbebens bzw. seismischen Ereignisses existiert. Wird dieses in Betracht gezogen, so müssen die obigen Beziehungen abgeändert werden, wie es z. B. bei *Gibowicz* und *Kijko* ([Gibo94], S. 301 ff., 1994) aufgeführt ist.

## 2.6 Natürliche Faktoren und Einfluss von Altabbauen

Der Einfluss der lokalen Geologie sowie die Einflüsse von Restfesten und Abbaukanten in benachbarten Flözen sollen in diesem Abschnitt erläutert werden. Sowohl besondere geologische Ausprägungen als auch die Lage von Altabbauen können das Erschütterungsverhalten stark verändern. Dieses gilt neben der Anzahl an seismischen Ereignissen auch für die seismische Energie (Stärke) der einzelnen Ereignisse.

### 2.6.1 Natürliche Faktoren

An der Bauhöhe W751 im Flöz Wilhelm (BW Ost) im östlichen Ruhrgebiet können erste natürliche Einflüsse beispielhaft aufgezeigt werden. Die Energiewerte und die Ereignisanzahl sind in Abbildung (2.11) zu erkennen. Bei der betrachteten Bauhöhe traten schon bei der Streckenauffahrung sowohl in der Kopf- als auch in der Kohlenabfuhrstrecke an einigen Stellen Schwierigkeiten auf, die in erhöhten Gebirgsspannungen begründet waren. Die jeweiligen Stellen sind in der Abbildung (2.11) wiedergegeben. Ein Einfluss von Abbaukanten einige 100 m oberhalb des Abbaus konnte bei Gebirgsdruckberechnungen nicht nachgewiesen werden. Ob sie trotzdem von Bedeutung waren, kann nicht entschieden werden. Aufgeteilt in ca. 50 m Abbaustreifen wurden die Ereignisanzahl und die in diesen Streifen kumulierte seismische Energie bestimmt und dem Verhieb gegenübergestellt.

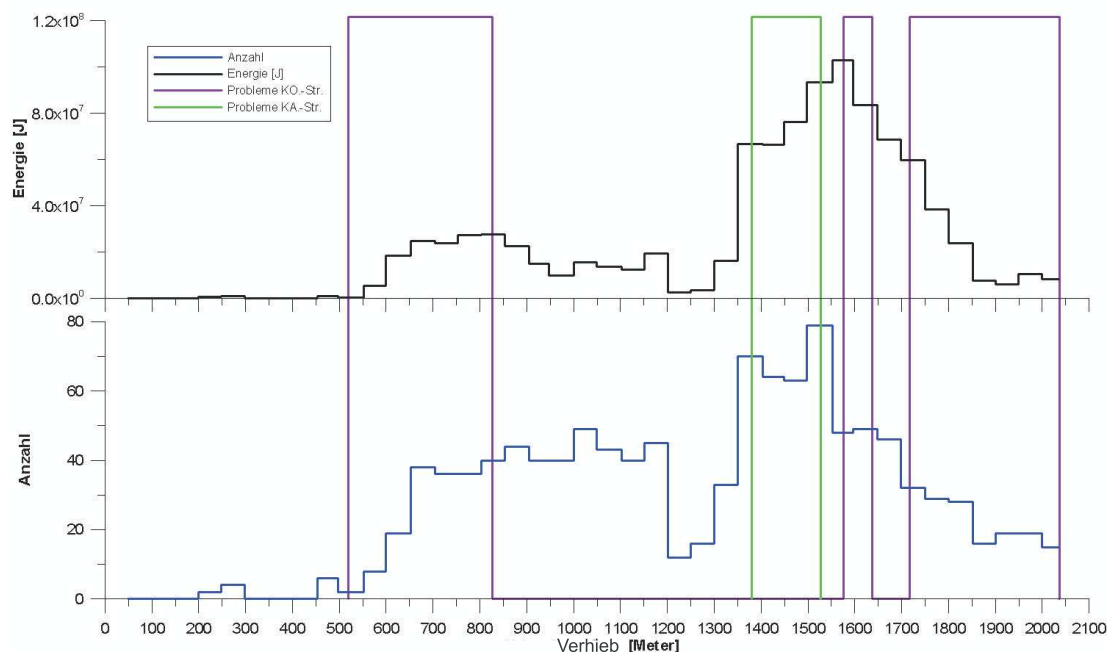


Abb. 2.11: Seismische Energie und Anzahl seismischer Ereignisse und der Zusammenhang zu Problemen bei der Streckenauffahrung - BW Ost: Wilhelm W751

Ein erster deutlicher Anstieg der Ereignisanzahl, der mit einer Erhöhung der seismischen Energie einherging, wurde nach gut 500 m Verhieb registriert. Diese Stelle fällt mit dem ersten Problem bei der Auffahrung in der Kopfstrecke zusammen. Nach Durchqueren der markierten Zone steigt die Anzahl der seismischen Ereignisse noch leicht, jedoch nimmt die seismische Energie ab. 100 bis 150 m vor Erreichen der Problemzone in der

Kohlenabfuhrstrecke nimmt sowohl die Anzahl als auch die seismische Energie ab, bei Erreichen der Problemzone steigen beide stark an. Die Werte verdoppeln sich gegenüber den Werten in der ersten Problemzone. Als der Einflussbereich der dritten Zone erreicht ist, geht die Ereignisanzahl um ein Drittel zurück, wohingegen die Energie abermals ansteigt. Bei der letzten Problemzone fällt die Ereignisanzahl, und die seismische Energie geht zurück.

Abbildung (2.11) zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen den ersten drei Problemzonen und den auftretenden seismischen Ereignissen und seismischen Energien. Hierbei scheinen die Probleme in der Kopfstrecke für die Erschütterungssituation maßgebender zu sein als die Probleme in der Kohlenabfuhrstrecke. Der beschriebene Rückgang der Energie nach Durchqueren der ersten Problemzone bei gleichzeitigem Anstieg der Ereignisanzahl mag ein Hinweis darauf sein, dass die seismische Energie noch stärker von diesen Zonen beeinflusst ist. Obwohl die letzte Problemzone keinen offensichtlichen Zusammenhang liefert, stellen in diesem Beispiel Zonen mit Problemen bei der Streckenauffahrung ein Indiz für eine erhöhte Gefahr an seismischen Ereignissen dar.

*Uhl et al.* ([Uhl04], 2004) sehen die Hauptursache für das zeitliche Auftreten und die räumliche Lage starker seismischer Ereignisse vom Typ 2 und Typ 4 (Abschnitt (2.2)) bei dem Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost (BW Saar, Flöz Schwalbach) im Saarland in der Geologie. Untersuchungen der Verteilungen zweier Sandsteinausprägungen aus Bohrlochmessungen 15 bis 30 m im Liegenden zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ortungen der seismischen Ereignisse vom Typ 4. Gleichzeitig mit dem Auftreten der starken Ereignisse gingen die Ereignisse vom Typ 1 deutlich zurück. Aufgrund der Korrelation zwischen der speziellen lokalen Geologie und dem Auftreten starker seismischer Ereignisse wurde von *Uhl et al.* ([Uhl04], 2004) eine Abschätzung der Erschütterungssituation eines aktuell laufenden angrenzenden Abbaus getroffen.

Beide Beispiele zeigen, dass die lokale Geologie sowohl die Stärke als auch die Anzahl seismischer Ereignisse beeinflussen kann.

## 2.6.2 Der Einfluss von Altabbauen

Die Unter- oder Überbauung von Restfesten oder Abbaukanten kann sich auf die Erschütterungssituation auswirken. Dabei kommt es zumeist zu einer Erhöhung der seismischen Energie. Ein Anstieg der Ereignisanzahl wurde von *Fritschen et al.* ([Frit99], 1999) beobachtet und mit dem Unterfahren einer größeren Anzahl an Abbaukanten in Beziehung gebracht. Die Bedeutung von Abbaupfeilern auf die Erschütterungssituation wurde auch bei *Kusznir* und *Al-Saigh* ([Kusz84], 1984) berichtet. In den dort erwähnten Beispielen wurden während der Unter- oder Überbauung andere Bruchtypen registriert als während der restlichen Zeit. Ferner veränderten sich in den entsprechenden Zeitabschnitten die Parameter der *Gutenberg-Richter Beziehung*. Abweichend zu *Fritschen et al.* ([Frit99], 1999) wurde eine geringere Anzahl an Ereignissen während der Unterbauungsphase registriert.

*Fritschen et al.* ([Frit04], 2004) gehen davon aus, dass in dem Bereich von Abbaupfeilern zwei Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit es zu seismischen Ereignissen mit einer über dem Durchschnitt liegenden seismischen Energie kommt. Werden kompetente Sandsteinschichten als Ereignisorte angesehen, so müssen als erste Bedingung im Bereich der Pfeiler noch Sandsteinhorizonte vorliegen, die durch die Altabbauung nicht oder nur teilweise zerstört worden sind. Dieses ist eine Voraussetzung für das Auftreten seismischer Ereignisse. Die Stärke der Ereignisse wird u. a. neben der Bruchflächengröße und



Verschiebung durch die akkumulierten Spannungen bestimmt (*Aki und Richards* ([Aki02], S.55, 2002)). Da sich im Bereich von Abbaupfeilern Spannungen überlagern, kommt es dort zu vergleichsweise sehr hohen induzierten Spannungen (vgl. Abbildung (2.12)), die bis zum Bruch der relevanten Sandsteine akkumuliert werden. Aufgrund der sehr hohen Spannungen kann es bei einem Bruch zur Freisetzung hoher seismischer Energie kommen.

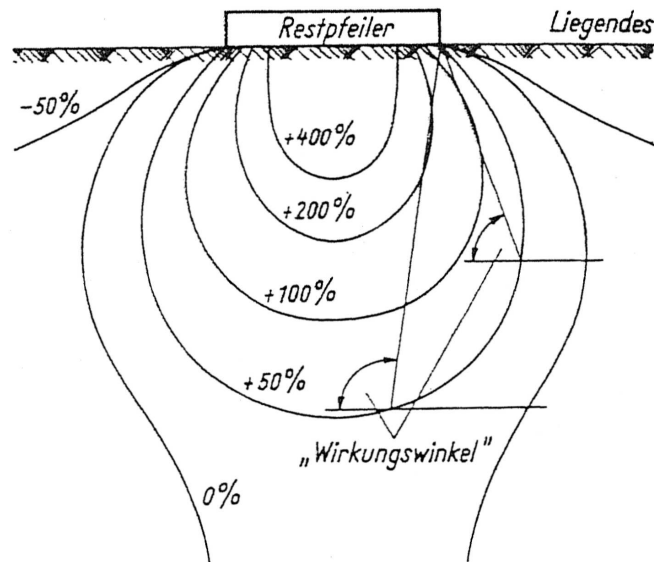


Abb. 2.12: Schematische Darstellung der Vertikaldruckverteilung unterhalb eines Abbaupfeilers (aus *Bräuner* ([Brau64], 1964))

Auf dem Bergwerk Prosper-Haniel wurde die Abbaukanten- und Restpfeilerlage für zukünftige Abbaue untersucht, um so zu einer Beurteilung der anstehenden Erschütterungssituation zu gelangen (*Stocks und Matern* ([Stoc03], 2003)). Aufgrund von Erfahrungen der abgebauten Bauhöhe 498 wurden Rückschlüsse für die Abbauplanung der neuen Bauhöhen 475 und 474 gezogen. Bei der Bauhöhe 498 kam es bei der Unterfahrung eines ca. 130 m breiten Abbaupfeilers mit durchschnittlich  $7 \frac{m}{d}$  zu 23 seismischen Ereignissen mit einer lokalen Magnitude von 0,6 bis 1,5. Da auf dem Bergwerk ansonsten nur selten Erschütterungen registriert wurden, war der Zusammenhang zwischen dem Abbaupfeiler und den auftretenden seismischen Ereignissen eindeutig. Die Analyse der Abbaukanten und Abbaupfeiler sowie der Sandsteinmächtigkeiten oberhalb der Bauhöhe 475 zeigte mehrere Zonen, denen ein hohes Erschütterungsrisiko zugeordnet wurde. Bei laufendem Abbau zeigte sich der Einfluss einer Abbaukante ca. 190 m oberhalb des Abbaus 475. Obwohl ein erster Bereich eines Abbaupfeilers in der ersten Risikozone unterfahren worden war, kam es erst bei gleichzeitiger Unterfahrung der Abbaukante zu starken Erschütterungen, die in ihrer Intensität nicht erwartet worden waren. Als Gegenmaßnahmen wurde an sechs Tagen in der Woche abgebaut und eine Begrenzung der Abbaugeschwindigkeit eingeführt. Nach Auftreten eines weiteren starken Ereignisses kam es nur noch zu Ereignissen geringerer Intensität. Die nächsten Risikozone wurden mit einer reduzierten Abbaugeschwindigkeit von  $4,5 \frac{m}{d}$  unterfahren. Bis auf eine Ausnahme waren alle Erschütterungen von niedrigerer Intensität als zuvor. *Stocks und Matern* ([Stoc03], 2003) ziehen aus diesen Messungen den Schluss, dass Restpfeiler mit einer mächtigen Sandsteinauflage in einem zuvor abgebauten Flöz auch bei großflächiger Über- und Unterbauung noch Einfluss ausüben. Ferner wirken auch Abbaukanten bis 200 m Abstand auf die Erschütterungssituation ein.

Die Reduzierung und Begrenzung der Abbaugeschwindigkeit mindern die Intensität der Erschütterungen. Diese Folgerung wurde durch den Abbau der Bauhöhe 474 (vgl. Abbildung (2.13)) bestätigt. Hinzu kam die Erkenntnis, dass die genannten Maßnahmen zwar die Stärke reduzieren, aber auf der anderen Seite zu einem Anstieg der Ereignisanzahl führen. Ein weiteres wichtiges Ergebnis war die Feststellung, dass die Entspannung des Gebirges nicht verhindert werden kann, aber eine zeitliche Einflussmöglichkeit auf die Energieabgabe möglich ist.

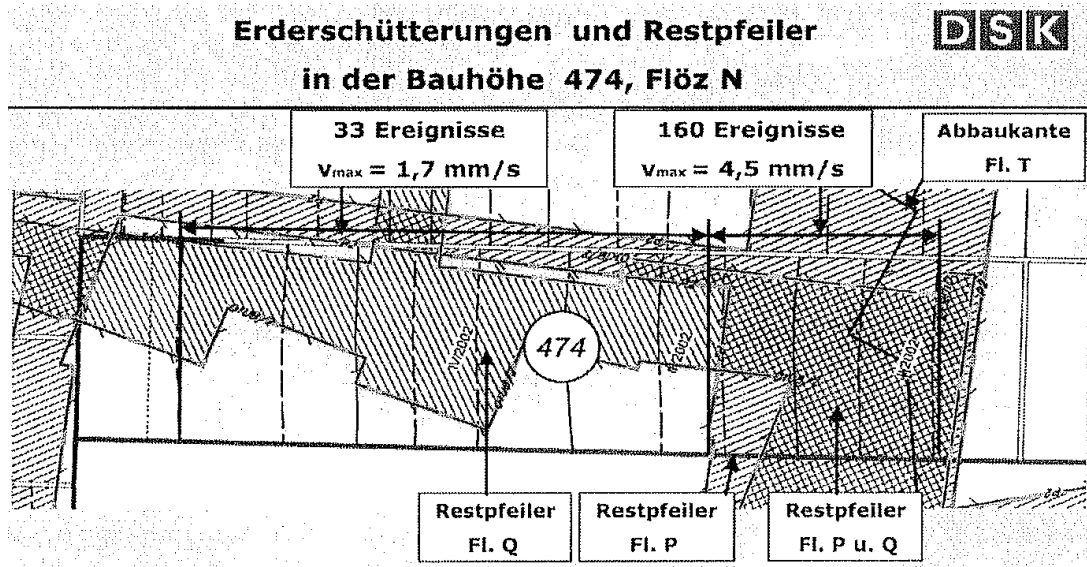


Abb. 2.13: Darstellung der Erschütterungssituation und der Lage der Restpfeiler für die Bauhöhe 474 (BW Prosper-Haniel) (aus *Stocks* und *Matern* ([Stoc03], 2003))

Die Bedeutung der Abbaukanten und Abbaupfeiler ist aus den genannten Beispielen zweifelsfrei zu erkennen. Dabei ist gewöhnlich mit einer Erhöhung der seismischen Energie eines Ereignisses zu rechnen. Ob eine Reduzierung der Abbaugeschwindigkeit und ein gleichmäßiger Abbaurythmus wie bei *Stocks* und *Matern* ([Stoc03], 2003) immer zu einer Einflussnahme auf die Intensität führen kann, muss an jeder Bauhöhe neu erprobt werden. Es ist aber ein vielversprechender Ansatz. Als Ergebnis verbleibt, dass zu einer Beurteilung der möglichen Erschütterungssituation zwingend die Untersuchung von Altabbauen und Abbaukanten gehören muss.

## 2.7 Einfluss des Abbaufortschritts und der Stillstandszeiten auf die Erdschütterungen

Bergbauinduzierte Erdschütterungen verteilen sich ungleichmäßig über die Woche und die einzelnen Wochentage (*Fritschen* ([Frit], S. 40 - 46, 2001) und *Mehrhoff* ([Mehr], 1990)). Ausschlaggebend ist hierbei der Abbaufortschritt innerhalb des Tages bzw. über die Woche (*Kuschke* ([Kusc], 1990)). Deutlich zu erkennen ist dieses auch für die Typ 1 Ereignisse auf dem Bergwerk Saar, Flöz Schalbach, Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost. In den Abbildungen (2.14) und (2.15) ist die Ereignisanzahl bzw. die Anzahl der Gewinnungsschnitte in Abhängigkeit der Wochentage dargestellt.

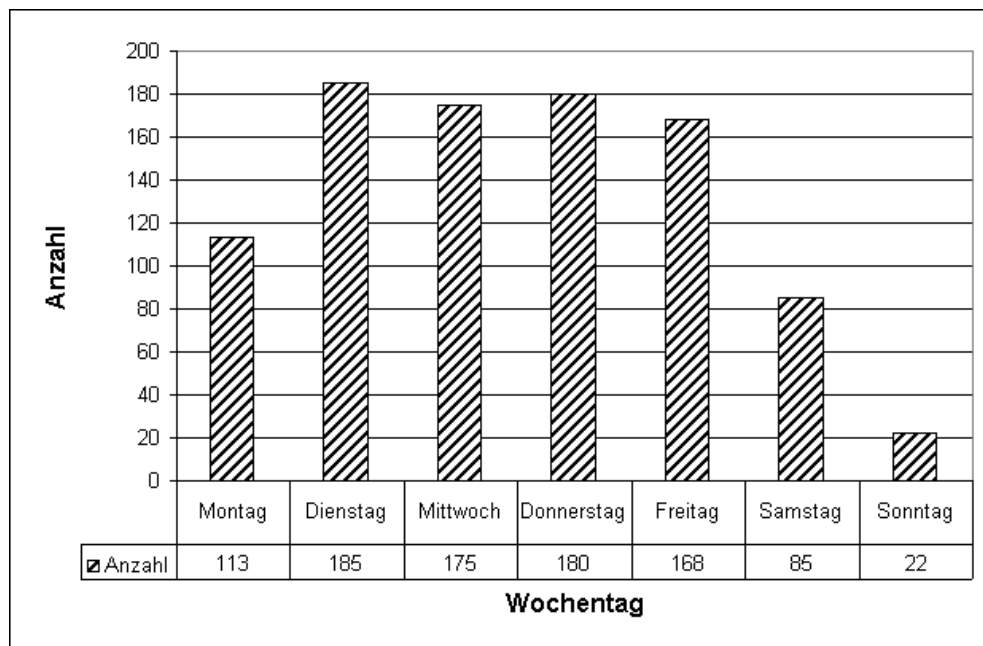


Abb. 2.14: Ereignisanzahl für Typ 1 vom 01.03.2000 - 30.09.2000 über die Woche: Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost

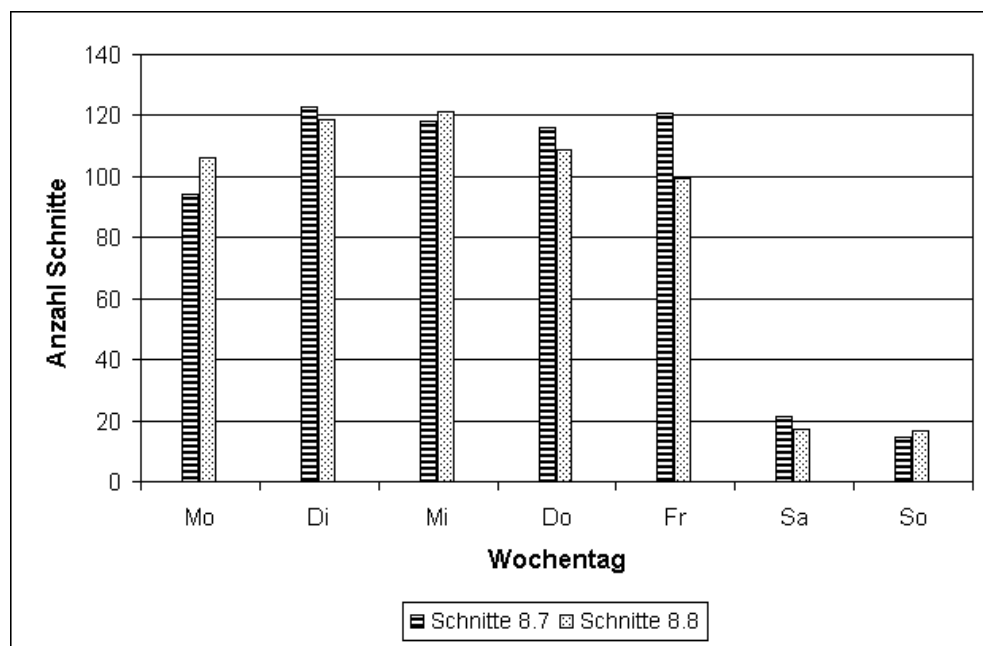


Abb. 2.15: Verteilung der Schnitte vom 01.03.2000 - 30.09.2000 über die Woche: Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost

Die Verteilung der Schnitte über die Wochentage (Abbildung (2.15)) mit einer deutlich geringeren Anzahl über das Wochenende spiegelt sich in der Ereignisanzahl über die Woche (Abbildung (2.14)) wieder und zeigt damit den Zusammenhang zwischen dem Abbaufortschritt und der Ereignisanzahl auch für dieses Beispiel auf.

Dieser Zusammenhang wird durch einen Vergleich zwischen den tatsächlich abgebauten Minuten und den Ereignissen zusätzlich verdeutlicht, wenn beides über den Tag verteilt

betrachtet wird. Dazu lagen für einen Doppelbetrieb (BW Saar, Flöz Schwalbach, Strebe 8.7 Ost / 8.8 Ost) und zwei Einzelstrebe (BWSaar, Flöz Wilhelm, Streb W751 und Flöz Sonnenschein, Streb S708) an einem Großteil an Tagen Stillstandsberichte vor, aus denen die einzelnen zum Teil auch sehr kurzen Stillstände erkennbar sind. Bei den Einzelstreben wurden jeweils die Stillstände addiert, die in die gleiche Stunde eines Tages fallen. Anschließend konnten daraus die Minuten ermittelt werden, an denen kein Stillstand vorlag. Die Verteilung über den Tag wurde auch mit den Erderschütterungen vorgenommen, eingeschränkt auf die Tage, an denen ein Stillstandsbericht vorlag.

Für die Bauhöhe S708 im Flöz Sonnenschein des Bergwerkes OST zeigt Abbildung (2.16) den Zusammenhang zwischen den Ereignissen und den Nicht-Stillständen (Minuten an denen Abbau betrieben wurde). Hierbei konnten 71 Tage mit 153 bergbauinduzierten Erderschütterungen untersucht werden. Alle betrachteten Ereignisse konnten dieser Bauhöhe zugeordnet werden. Die Normierung bezieht sich bei dieser und den folgenden Abbildungen auf das Maximum, das innerhalb einer Stunde vorlag, in diesem Beispiel zwölf Ereignisse und 2150 Minuten. In Abbildung (2.16) ist deutlich, dass in der Zeit von 7 Uhr bis 11 Uhr nur wenig abgebaut worden ist. Im gleichen Zeitintervall ist auch die Ereignisanzahl reduziert. Wenige Ereignisse traten ebenso zwischen 20 Uhr und 21 Uhr auf, obwohl in diesem Zeitintervall nur wenig Stillstandsminuten registriert worden sind. Eine Erklärung kann hierfür nicht gegeben werden. Trotz der geringen Anzahl an Tagen und der wenigen registrierten seismischen Ereignisse wird die Tendenz deutlich, dass die Ereignisanzahl unmittelbar abnimmt, sobald weniger Kohle gefördert wird.

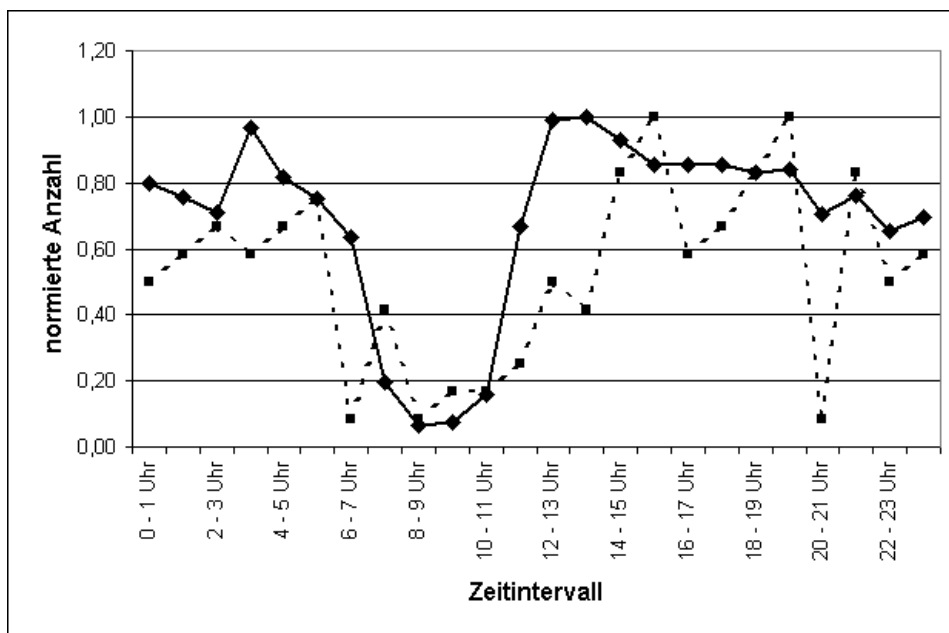


Abb. 2.16: Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen (durchgezogene Linie) und Ereignishäufigkeiten (gestrichelte Linie) Sonnenschein S708

Die Abbildung (2.17) beinhaltet die Untersuchung von 424 Tagen und 930 Ereignissen (Maxima: 56 Ereignisse und 8720 Minuten) der Bauhöhe W751 (Bergwerk OST) im Flöz Wilhelm. Die erwähnte Tendenz ist hier deutlicher erkennbar. Eine Folgerung ist, dass eine hohe Anzahl an Minuten mit Kohlenabbau zu einer höheren Anzahl an Erderschütterungen führt, als in Zeitabschnitten mit wenig Kohlenabbau. Die Reduzierung der Ereigni-

sanzahl geschieht unmittelbar, deutlich zu erkennen im Zeitabschnitt 5 - 6 Uhr gegenüber 6 - 7 Uhr. Ein längerer Zeitabschnitt mit wenig Kohlenabbau, 6 Uhr bis 10 Uhr, führt nochmals zu einer Abnahme der Ereignisanzahl. Sobald nach 10 Uhr die Förderleistung wieder steigt, erhöht sich auch die Ereignisanzahl wieder. Hierbei ist eine allmähliche Zunahme sichtbar. Zu beachten ist, dass bei der Bauhöhe W751 im Gegensatz zur Bauhöhe S708 keine Zeitabschnitte existieren, bei denen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Kohlenabbau und der Ereignisanzahl erkennbar ist. Dieses liegt anscheinend an der wesentlich höheren Anzahl an untersuchten Tagen und Ereignissen, bei denen statistische Schwankungen nicht so schnell ins Gewicht fallen.

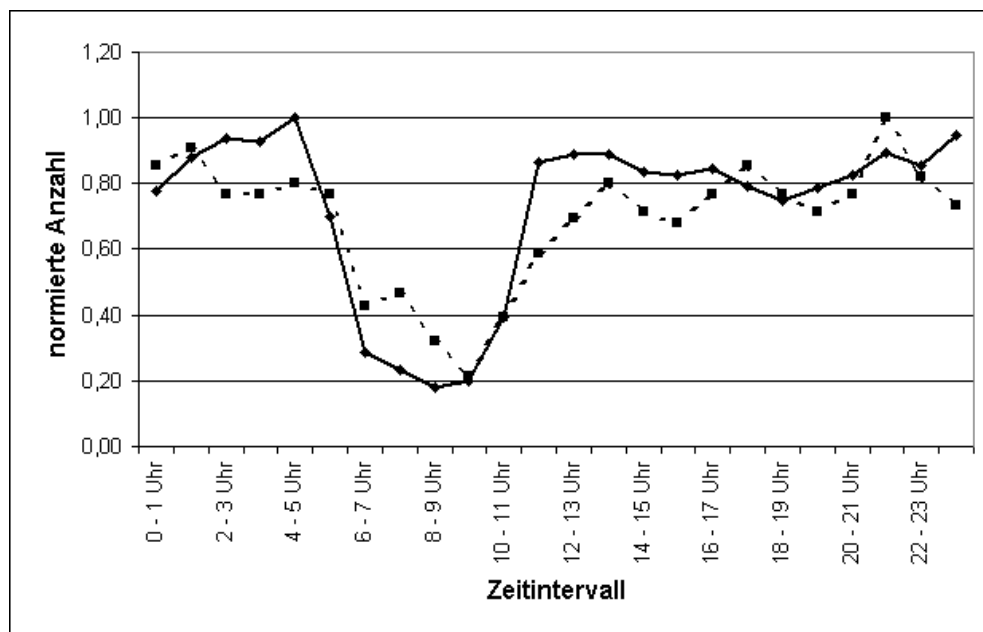


Abb. 2.17: Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen (durchgezogene Linie) und Ereignishäufigkeiten (gestrichelte Linie) Wilhelm W751

Die Abbildungen (2.18) und (2.19) zeigen die Situation auf dem damaligen Bergwerk Ensdorf (heute Teil des Bergwerkes Saar) für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost im Flöz Schwalbach. Differenziert wurde dabei zwischen dem Ereignistyp 1 und den Ereignistypen 2 und 4.

Während der Stunden von 0 Uhr bis 6 Uhr kam es nur an den ersten 122 Tagen zu Abbautätigkeiten, danach galt ein nächtlicher Abbaustopp, der später sogar von 0 Uhr bis 7 Uhr anhielt. Als Stillstände wurden für den Doppelbetrieb Zeiten angesehen, in denen in beiden Streben ein Stillstand vorlag. Stillstandsberichte lagen an 605 Tagen vor. In die 605 Tage fielen 1869 Ereignisse des Typs 1 und 93 Ereignisse der Typen 2 und 4 (Maxima: 127 Ereignisse (Typ 1), 8 Ereignisse (Typ 2 und 4) und 19952 Minuten). Eine Zuordnung der Ereignisse zu einem der Strebe als auslösende Bauhöhe war nicht möglich, aber alle Ereignisse konnten dem Doppelbetrieb zugeordnet werden.

Abbildung (2.18) zeigt erneut den Zusammenhang zwischen geringer Förderzeit (in den Nachtstunden) und wenig Ereignissen. Hierbei ist wieder ersichtlich, dass eine Reduzierung der Förderzeit unmittelbar zu einer Verringerung der Ereignisanzahl führt. Auch die Umkehrung gilt erneut. Ferner scheint auch in diesem Beispiel eine gewisse Zeit von Nöten, um das geringste Ereignislevel bzw. das höchste Ereignislevel zu erreichen, wie in

den Zeitabschnitten von 23 Uhr bis 3 Uhr bzw. 6 Uhr bis 10 Uhr erkennbar ist.

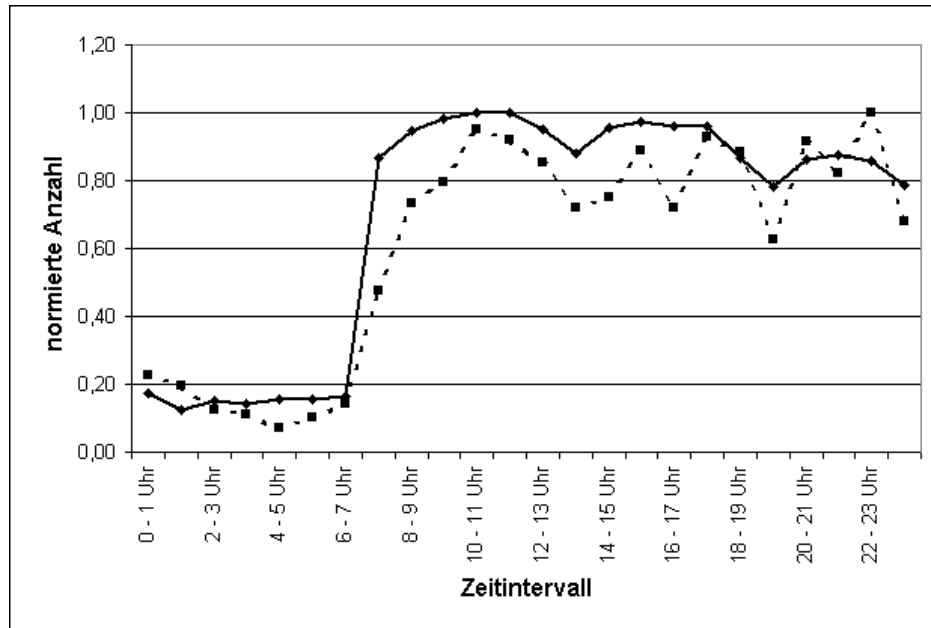


Abb. 2.18: Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen (durchgezogene Linie) und Ereignishäufigkeiten (gestrichelte Linie) 8.7 Ost / 8.8 Ost Typ 1

Für die Typen 2 und 4 ergibt sich kein klares Bild (Abbildung (2.19)). Dieses kann zum einen an der sehr geringen Anzahl an Ereignissen liegen, oder zum anderen an einem nicht systematischen Auftreten dieser Typen.

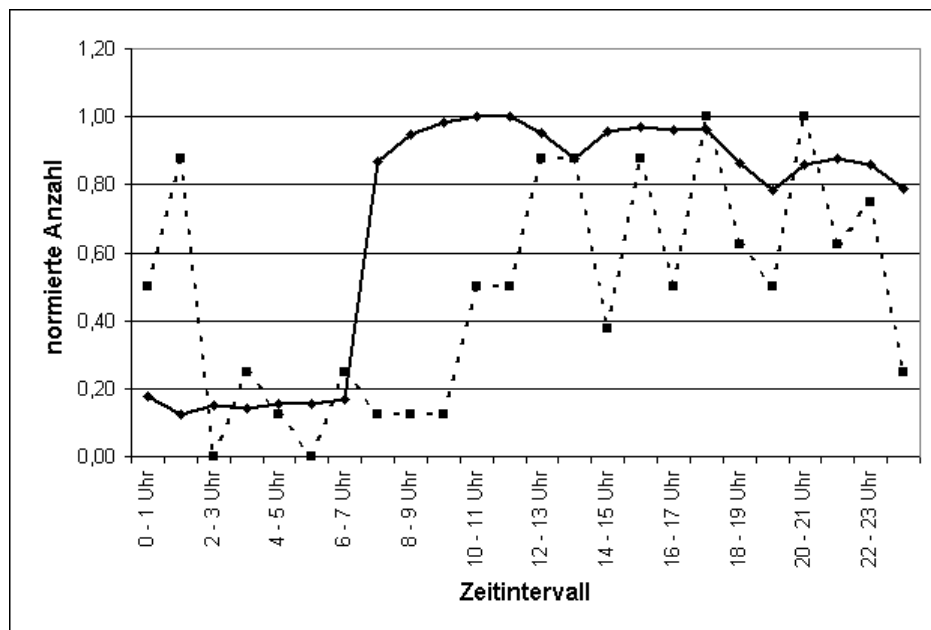


Abb. 2.19: Zusammenhang zwischen den Nicht-Stillständen (durchgezogene Linie) und Ereignishäufigkeiten (gestrichelte Linie) 8.7 Ost / 8.8 Ost Typ 2 und Typ 4

Festhalten lässt sich, dass eine Reduzierung der Förderzeiten auch zu einer Abnahme der Erdschütterungen führt, und dieses darüber hinaus unmittelbar geschieht. Auch die

Umkehrung einer unmittelbaren Zunahme der Ereignisse bei einer Erhöhung der Förderzeit scheint als Folgerung gerechtfertigt. Nur die Typen 2 und 4 fallen aus den Betrachtungen heraus. Hierbei kann aufgrund einer zu geringen Anzahl von Ereignissen keine abschließende Aussage getroffen werden.

Während eines Stillstandes kann es über das gesamte Zeitintervall zu Ereignissen kommen. Dieses wird aus den beiden Abbildungen (2.20) und (2.21) deutlich.

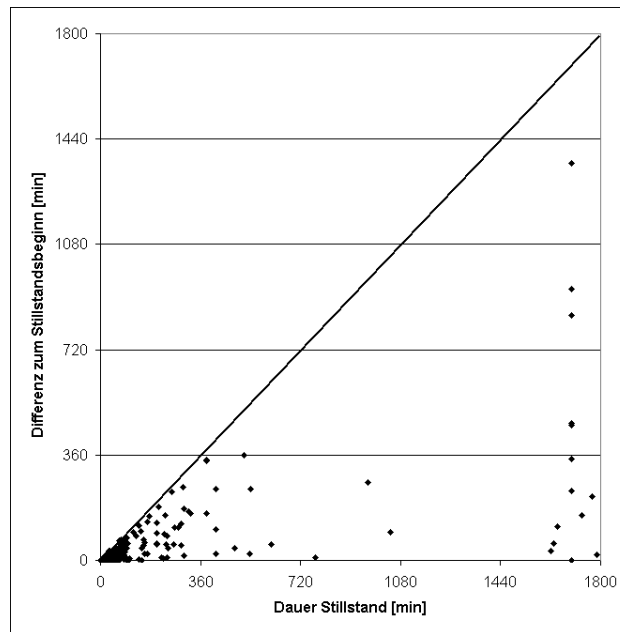


Abb. 2.20: Ereignisse in Stillstandszeiten: BW Ost, Flöz Wilhelm, Bauhöhe W751

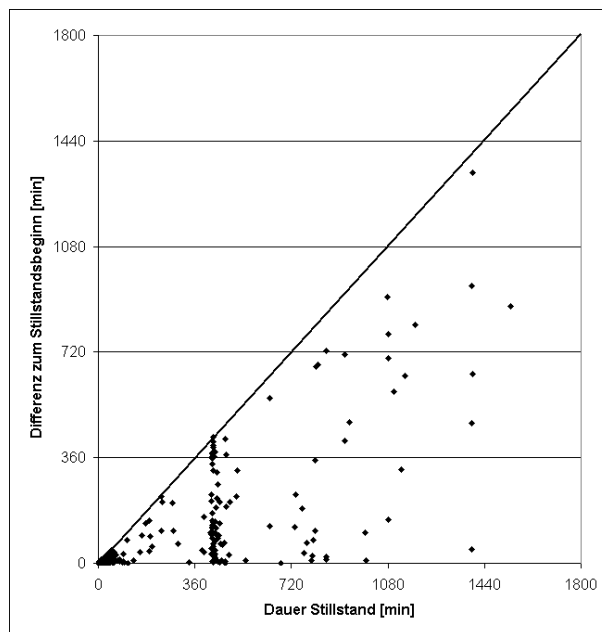


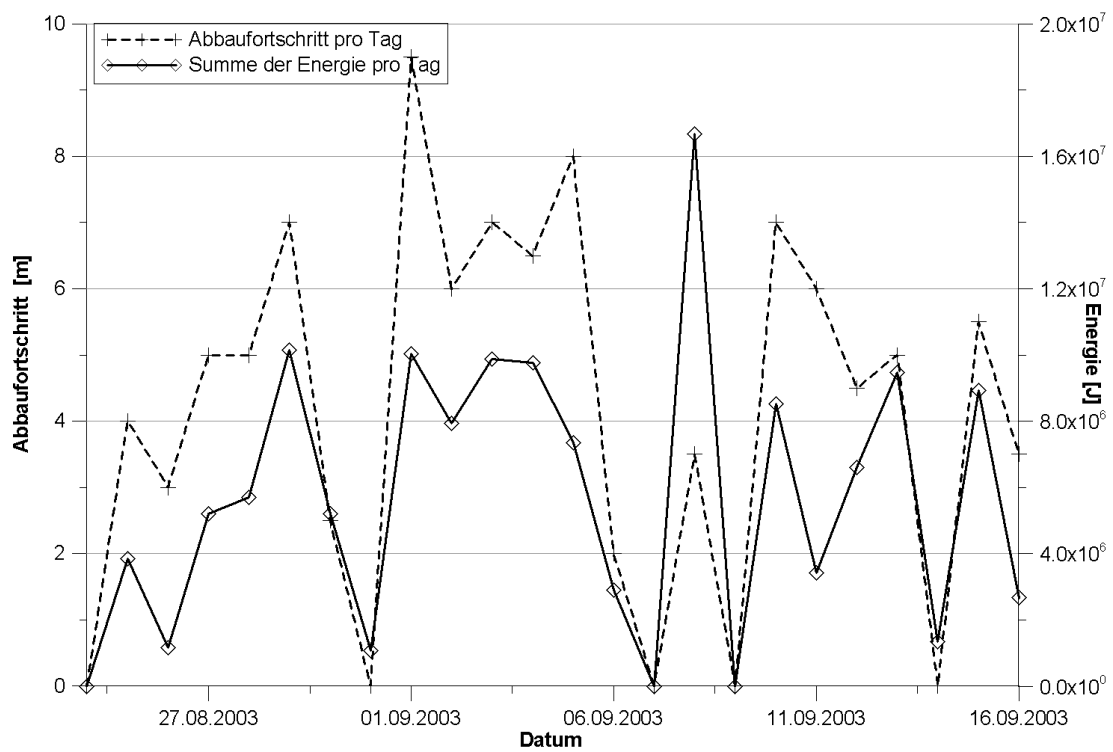
Abb. 2.21: Ereignisse in Stillstandszeiten: BW Saar, Flöz Schwalbach, Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost

Für die Darstellungen (2.20) und (2.21) wurden die Differenzen in Minuten zwischen dem Auftreten eines seismischen Ereignisses und dem Stillstandsbeginn berechnet. Die meisten seismischen Ereignisse, die innerhalb eines Stillstandes auftreten, finden jedoch in den ersten ein bis drei Stunden statt. Erfahrungsgemäß treten in Deutschland nach zwei bis drei Tagen Stillstand bzw. Abbaubende keine weiteren seismischen Ereignisse mehr auf.

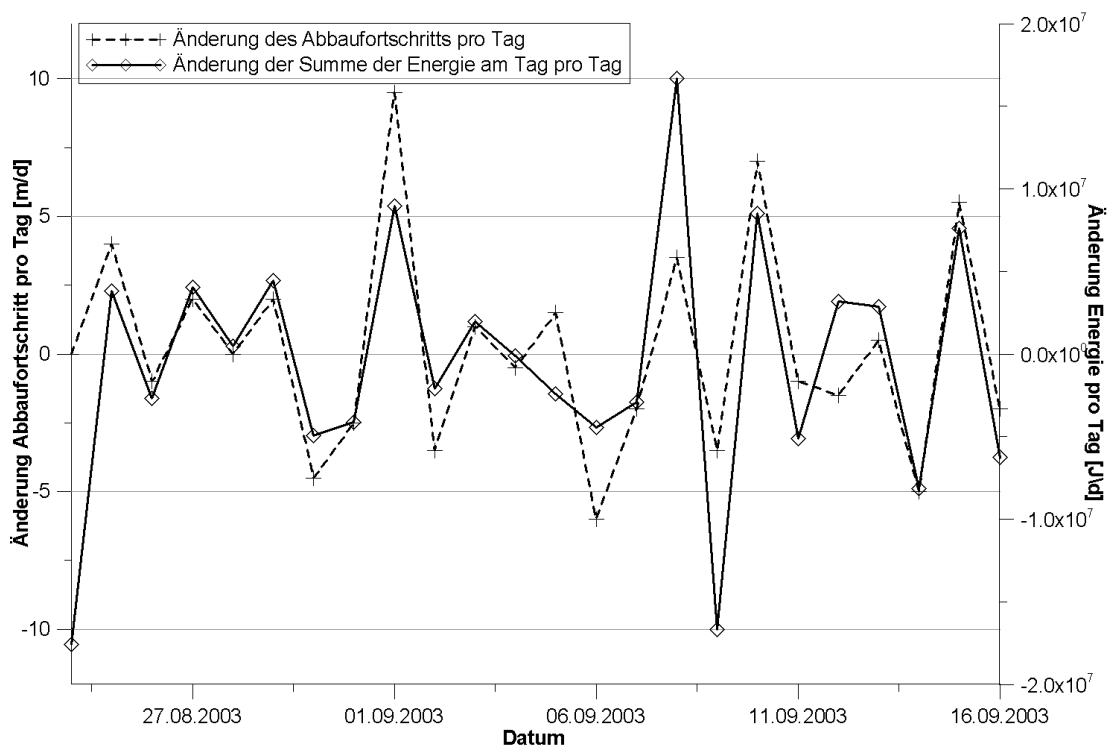
Neben der Anzahl induzierter Erderschütterungen ist insbesondere deren Stärke bzw. seismische Energie von Interesse. Zwischen der abgestrahlten Energie und dem abgebauten Volumen eines Strebtes existieren qualitative Zusammenhänge (*Fritschen* ([Frit], S. 84-88, 2001); *Glowacka* ([Glow93], 1993); *Kijko* ([Kijk], 1985)). Wird eine konstant abgebaute Mächtigkeit und Streblänge angenommen, so kann anstatt des abgebauten Volumens auch der Abbaufortschritt betrachtet werden. Für den oben behandelten Abbau W751 lagen die Abbaufortschritte als tägliche Angaben für fast alle Tage vor. Da gleichzeitig auch eine hohe Anzahl an Erschütterungen diesem Abbau zugeordnet werden konnte, wurde der Zusammenhang an diesem Beispiel überprüft. Es wurde darüber hinaus untersucht, ob dieser Zusammenhang schon bei täglicher Betrachtung zu finden ist. Dieses ist zu vermuten, da wie oben gezeigt, die Ereignisse unmittelbar mit dem Abbauvorgang auftreten. Exemplarisch werden in den Abbildungen (2.22) und (2.23) die Ergebnisse zweier Zeiträume dargestellt. Zusätzlich wird die Änderung des Abbaufortschritts mit der Änderung der kumulierten Energie am Tag verglichen.

Insbesondere Abbildung (2.22(a)) zeigt eine sehr gute qualitative Übereinstimmung zwischen dem Abbaufortschritt und der kumulierten Energie am Tag. Eine Reduzierung des Abbaufortschritts von einem Tag auf den nächsten macht sich auch in der Abnahme der Energie im gleichen Zeitabschnitt bemerkbar. Ein Zeitverzug von mehreren Tagen ist nicht erkennbar. Abbildung (2.23(a)) beinhaltet auch eine sehr gute Übereinstimmung, lässt aber auch zeitliche Verzögerungen an einigen Tagen erkennen, so zum Beispiel zwischen dem 05.11.2003 und dem 16.11.2003. Zumindest für den Streb W751 kann von einer qualitativ sehr guten Übereinstimmung zwischen dem Abbaufortschritt pro Tag und der kumulierten Energie pro Tag gesprochen werden. Liegt dieser Zusammenhang vor, so muss er sich auch auf die Änderungen von Abbaufortschritt und der Summe der Energie übertragen, wie in den Abbildungen (2.22(b)) und (2.23(b)) zu sehen ist.



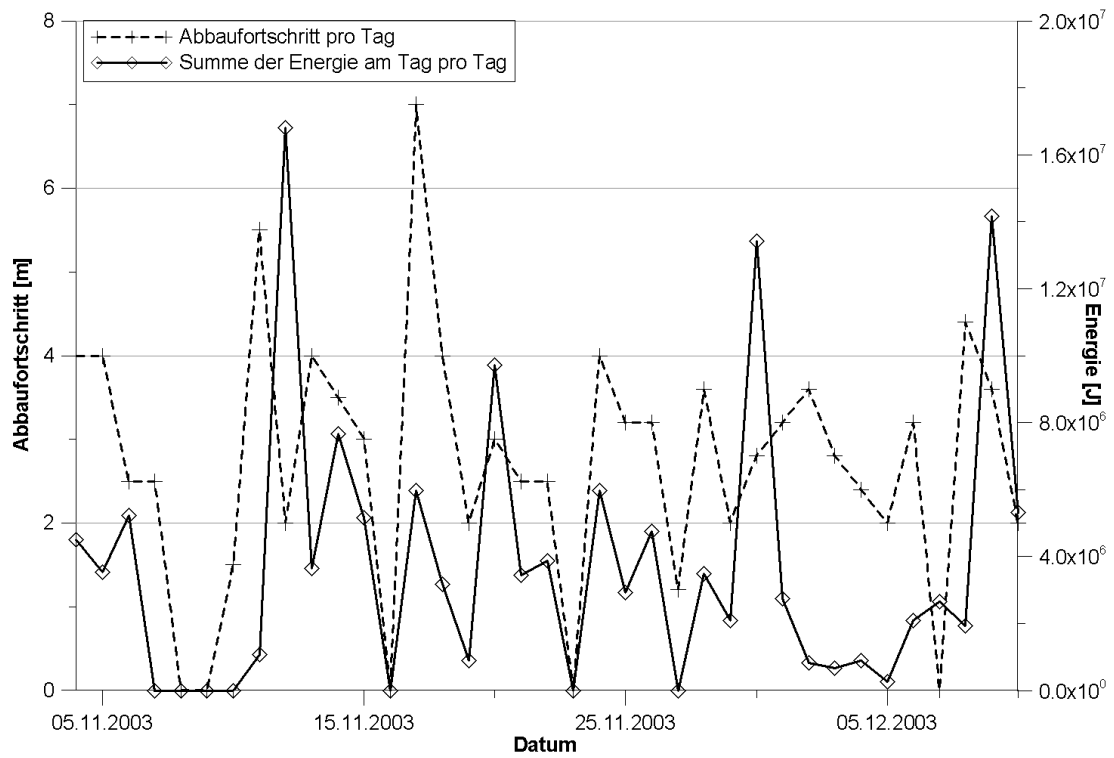


(a)

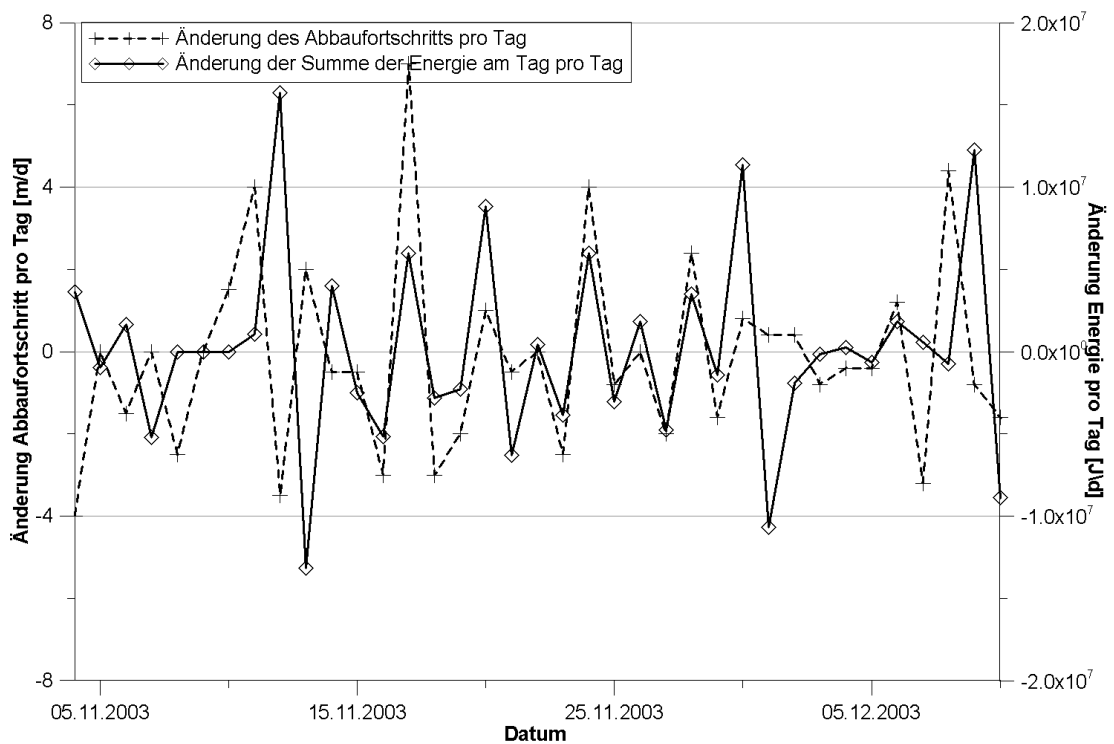


(b)

Abb. 2.22: Zusammenhang zwischen der Energiefreisetzung und dem Abbaufortschritt pro Tag - BW Ost: Wilhelm W751



(a)



(b)

Abb. 2.23: Zusammenhang zwischen der Energiefreisetzung und dem Abbaufortschritt pro Tag - BW Ost: Wilhelm W751

## 2.8 Zusammenfassung

Seismische Ereignisse treten unterschiedlich häufig beim Abbau von Steinkohle in Deutschland auf. Die Stärke schwankt zwischen kaum bis deutlich messbar.

Im deutschen Steinkohlenbergbau besteht fast immer eine enge Korrelation zwischen den seismischen Ereignissen und dem aktuellen Abbaugeschehen. Bei den betrachteten Beispielen ist ein enger Zusammenhang zwischen Abbauzeiten und dem Auftreten seismischer Ereignisse zu erkennen. Eine Abhängigkeit der freigesetzten seismischen Energie vom abgebauten Kohlenvolumen ist bei einigen Abbauen offensichtlich. Darüber hinaus sind die Lage von Altabbauen und die Geologie entscheidende Faktoren für das Auftreten und die Stärke seismischer Ereignisse.

# 3 Prognose seismischer Ereignisse und ihrer Energie

Der enge Zusammenhang zwischen seismischen Ereignissen und dem Abbaugeschehen, wie im vorherigen Kapitel dargelegt, lässt vermuten, dass sich seismische Ereignisse prognostizieren lassen. Dabei liegt es nahe, Prognosemethoden zu benutzen, die das Abbaugeschehen bzw. die daraus entstehenden Gebirgsbewegungen verwenden.

In diesem Kapitel werden zwei im polnischen Steinkohlenbergbau angewandte Prognoseverfahren erläutert. Das eine Modell verwendet aus den Gebirgsbewegungen definierte Kennziffern und das andere Modell das in einem Zeitintervall abgebaute Volumen, um zu einer Prognose zu gelangen. *Fritschen* ([Frit], 2001) hat in seiner Dissertation untersucht, ob die beiden Verfahren auf die Verhältnisse im deutschen Steinkohlenbergbau übertragbar sind, was für beide Verfahren der Fall ist. Als einleitender Abschnitt wird zuerst auf den Prognosebegriff eingegangen und es wird festgelegt, was unter einer Prognose in der vorliegenden Arbeit verstanden wird.

## 3.1 Prognosedefinition

Die Prognose seismischer Ereignisse im deutschen Steinkohlenbergbau soll eine Aussage über das wahrscheinliche Auftreten eines Ereignisses und seiner seismischen Energie liefern. Dabei sollen die folgenden Punkte beachtet werden:

- (1) Die vorausgesagten seismischen Ereignisse sollen einem bestimmten Abbau zuzuordnen sein. Nach den Erkenntnissen des vorherigen Kapitels liegen die Ereignisorte im deutschen Steinkohlenbergbau in der Umgebung des Strebs.
- (2) Prognostizierte Ereignisse sollen in einem bestimmten Zeitintervall stattfinden, so dass zum Beispiel die Anzahl und die seismische Energie innerhalb einer zukünftigen Woche bestimmt werden kann.
- (3) Eine Prognose soll die Möglichkeit bieten, den qualitativen Verlauf der Ereignishäufigkeiten über den Abbauzeitraum zu bestimmen. Kann der Verlauf im Voraus berechnet werden, stellt er das Optimum dar. Weil aber das Auftreten seismischer Ereignisse stark von der Durchbauung und der lokalen Geologie abhängig ist, soll eine Prognose eine Aussage über die Anzahl der Ereignisse in einem nahegelegenen Zeitraum geben. Hierbei soll eine möglichst gute quantitative Übereinstimmung zwischen den berechneten und registrierten Werten erreicht werden.
- (4) Die Aussagen für die Anzahl seismischer Ereignisse sind analog auch für die seismische Energie zu sehen. Ein Ziel kann ferner die Aussage über das Auftreten eines seismischen Ereignisses mit einer Energie oberhalb eines Schwellwertes sein.

## 3.2 Prognose mittels einer Wahrscheinlichkeitsaussage

Basierend auf physikalischen Überlegungen wird in diesem Abschnitt ein Prognoseverfahren vorgestellt, das eine Wahrscheinlichkeitsaussage über das Auftreten seismischer Ereignisse, die einen bestimmten Energiebetrag überschreiten, gibt. Dabei wird die Proportionalität zwischen der freigesetzten Energie und dem abgebauten Volumen vorausgesetzt.

### 3.2.1 Volumen und seismische Energie

Durch den Abbau von Kohle oder sonstigen Rohstoffen im Gebirge kommt es in der Umgebung des Entnahmeortes zum Brechen der Gebirgsschichten. Das dabei betroffene Volumen  $V_f$  ist dem entnommenen Volumen  $V$  nach *Kijko* ([Kijk], 1985) proportional:

$$V_f = konst \cdot V \quad (3.1)$$

*Kijko* leitet daraus eine Äquivalenz der Summe der seismischen Momente  $\sum M_0$  und dem entnommenen Volumen  $V$ ,

$$\sum M_0 \sim V \quad (3.2)$$

wie es bei *McGarr* ([McGa76], 1976) zu finden ist, her. Mittels der Energie-Anzahl Verteilung (Abschnitt (2.5))

$$\log N = a - b \log E \quad (3.3)$$

und unter Benutzung von Ergebnissen von *Knopoff* und *Kagan* ([Knop77], 1977) gelangt *Kijko* ([Kijk], 1985) schließlich zu der in guter Näherung geltenden Beziehung

$$\sum E = C \cdot V^B, \quad (3.4)$$

die den Zusammenhang zwischen dem entnommenen Volumen und der freigesetzten seismischen Energie  $E$  angibt. Die Parameter  $B = B(t)$  und  $C = C(t)$  hängen dabei vom Zustand des Gebirges und somit auch von den geologischen und bergbaulichen Einflüssen ab.

### 3.2.2 Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses

Der in Gleichung (3.4) aufgestellte Zusammenhang wird verwendet, um zu einer Wahrscheinlichkeitsaussage für das Auftreten seismischer Ereignisse mit einer Stärke oberhalb eines vorgegebenen Schwellenwertes zu gelangen. Dieses Vorgehen wurde von *Glowacka* und *Kijko* ([Glow89], 1989) sowie *Glowacka* ([Glow92], 1992 und [Glow93], 1993) benutzt.

Sei  $\tilde{V}_i$  das im Zeitintervall  $t_i$  geplante abzubauenende Volumen, für welches  $\tilde{V}_i = V_i - V_{i-1}$  gilt.  $V_i$  ist dabei das nach dem Zeitintervall  $t_i$  insgesamt abgebaute Volumen und  $V_{i-1}$  entsprechend das gesamte abgebaute Volumen bis zum Beginn des Zeitintervalls  $t_i$ . Nach Gleichung (3.4) ergibt sich für die freigesetzte seismische Energie  $(\sum E)_i$  im entsprechenden Zeitintervall:

$$(\sum E)_i = C \cdot (V_i^B - V_{i-1}^B) \quad (3.5)$$

*Glowacka* ([Glow93], 1993) gibt in ihrem Artikel die durchschnittlichen Werte von  $B$  für mehrere Bergwerke an, welche in Tabelle (3.1) wiedergegeben sind.

Bergwerk	B (Durchschnitt)
Wujek	1,56
Gottwald	1,87
Dobrova	2,01

Tabelle 3.1: Durchschnittliche Werte von  $B$  für ausgewählte Bergwerke (aus *Glowacka* ([Glow93], 1993))

Dabei bedeutet ein Wert von  $B = 2$ , dass die im Zeitintervall  $t_i$  freigesetzte Energie  $(\sum E)_i$  linear von der in diesem Zeitintervall abgebauten Fläche  $F_i$  abhängt. Dieses folgt wegen

$$\begin{aligned} (\sum E)_i &= C(V_i^2 - V_{i-1}^2) \\ &= C \underbrace{(V_i - V_{i-1})}_{\tilde{V}_i} \underbrace{(V_i + V_{i-1})}_{(2V_{i-1} + \tilde{V}_i)} \\ &= C\tilde{V}_i(2V_{i-1} + \tilde{V}_i) \end{aligned}$$

und der Annahme, dass das bis zum Beginn des Zeitintervalls  $t_{i-1}$  abgebaute Volumen  $V_{i-1}$  wesentlich größer ist als das in der Zeitspanne von  $i-1$  bis  $i$  abzubauenen Volumen  $\tilde{V}_i$ , und somit  $V_{i-1} \gg \tilde{V}_i$  gilt. Damit folgt:

$$\begin{aligned} (\sum E)_i &\approx 2CV_{i-1}\tilde{V}_i \\ &= 2CV_{i-1}M \cdot \underbrace{l\bar{v}_i\Delta t}_{F_i} \end{aligned}$$

$l$  ist hierbei die Streblänge,  $M$  die abgebaute Mächtigkeit und  $\bar{v}_i$  die mittlere Abbaugeschwindigkeit im Zeitintervall  $t_i$ .

Zur Berechnung der wahrscheinlichsten im Zeitintervall  $t_i$  freigesetzten seismischen Energie  $(\sum E)_i^\alpha$  wird zu dem Wert in Gleichung (3.5) noch der Energiebetrag  $\Delta E_{i-1}$  addiert, der im vorherigen Zeitintervall  $t_{i-1}$  nicht freigesetzt worden ist. Dieses entspricht der Differenz zwischen der berechneten  $(\sum E)_{i-1}$  und der gemessenen  $(\sum E)_{i-1}^O$  Energie. Für  $(\sum E)_i^\alpha$  gilt somit:

$$(\sum E)_i^\alpha = (\sum E)_i + \Delta E_{i-1} \quad (3.6)$$

mit

$$\Delta E_{i-1} = \begin{cases} (\sum E)_{i-1} - (\sum E)_{i-1}^O & \text{für } (\sum E)_{i-1} > (\sum E)_{i-1}^O \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.7)$$

Das bisherige Modell wird weiter modifiziert, indem in Betracht gezogen wird, dass die Akkumulation sowie die Freisetzung von Energie nach dem *Kelvin-Voigt-Modell* geschieht, somit einem Zeitgesetz unterliegt. Daraus folgt:

$$\langle \sum E \rangle_i = (\sum E)_i^\alpha \cdot \underbrace{(1 - \exp(-b_t \Delta T))}_{=e_{b_t}(\Delta t): \text{Kelvin-Voigt}} \quad (3.8)$$

$b_t$  ist hierbei ein Parameter, der die Zeitverzögerung beschreibt. *Glowacka* ([Glow92], 1992) gibt Werte von  $0,075 \frac{1}{d}$  bis  $0,2 \frac{1}{d}$  für  $b_t$  an.

Um die Wahrscheinlichkeit  $P(E_i) = P(< \sum E >_i > E_i)$  zu bestimmen, dass die Summe der freigesetzten seismischen Energie den Schwellenwert  $E_i$  überschreitet, wird angenommen, dass die freigesetzte Energie einer Lognormalverteilung genügt.

$$f_E(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x E} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\ln E - m_x)^2}{\sigma_x^2}\right) \quad (3.9)$$

Hierbei ist  $\sigma_x$  die Standardabweichung von  $\ln E$ , sowie  $m_x$  der wahrscheinlichste Wert von  $\ln E$ .

Abschließend ergibt sich somit:

$$P(E_i) = 1 - \int_0^{E_i} f_E(E) dE \quad (3.10)$$

Aus den zitierten Artikeln von *Glowacka* (z. B. [Glow93], 1993) geht hervor, dass die Methode in Polen und Tschechien erfolgreich eingesetzt wird. Eine Übertragbarkeit des vorgestellten Modells wurde von *Fritschen* ([Frit], 2001) untersucht. Für lange Akkumulationszeiten von 3 – 4 Monaten konnten starke Ereignisse prognostiziert werden, für kurze Zeiträume war die verwendete Datengrundlage zu gering. Aus der Herleitung geht hervor, dass das Modell nicht geeignet ist, Ereignisse vorherzusagen, die aufgrund z. B. einer Änderung der lokalen Geologie bzw. beim Unterfahren von Abbaukanten auftreten.

### 3.3 Prognose mittels einer Korrelation

Das zweite Prognoseverfahren korreliert die Gebirgsbewegungen und die beobachteten Ereignisse eines Zeitintervalls, um mit den bestimmten Parametern zu einer Prognose zu gelangen. Die Gebirgsbewegungen entstehen durch die allmähliche Konvergenz der durch den Abbau geschaffenen Hohlräume. Dabei kommt es zu Senkungen der hangenden Schichten und zu Hebungen der liegenden Schichten. Diese Gebirgsbewegungen haben Deformationen im Gebirgskörper zur Folge. *Bańka* ([Bank00], 2000) stellt in einem Artikel Untersuchungen vor, in denen aus den Deformationen Indizes bestimmt werden, die mittels einer Korrelation mit den seismischen Ereignissen zu einer Prognose der künftigen Erschütterungssituation führen (siehe auch *Drzęźła et al.* ([Drez97], 1997)).

#### 3.3.1 Berechnung der Gebirgsbewegungen

Für die Berechnung der Gebirgsbewegungen wurde ein in Polen geläufiges Verfahren verwendet. Dieses basiert auf der Theorie von *Budryk-Knothe* und beschreibt den Einfluss des Abbaus auf einen Punkt an der Tagesoberfläche oder im Gebirge über Einflussfunktionen.

Das genannte Verfahren besitzt den Vorteil, dass es auf einer geringen Anzahl an Parametern aufbaut, die aber ausreichen, um den Senkungsvorgang gut zu modellieren. Die Endsenkung eines Punktes  $P(x_0, y_0, z_0, t_0)$  zum Zeitpunkt  $t_0$  berechnet sich zu (*Drzęźła*

et al. ([Drez99], 1999))

$$w_E(x_0, y_0, z_0, t_0) = ag \iint_{P(t_0)} \frac{1}{R_K^2} \exp\left(-\pi \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{R_K^2}\right) dx dy \quad (3.11)$$

mit

$w_E(x_0, y_0, z_0, t_0)$  : für den Abbau zum Zeitpunkt  $t_0$  charakteristische Endsenkung

$R_K = H \cdot \cot(\beta) \left(\frac{z_0}{H}\right)^n$  : Haupteinwirkungsradius

$H$  : Teufe

$z$  : vertikaler Abstand zum Punkt

$n$  : Gebirgsfaktor

$\beta$  : Haupteinwirkungswinkel

$a$  : Abbaufaktor

$g$  : Flözmächtigkeit

$P(t_0)$  : zum Zeitpunkt  $t_0$  abgebaute Fläche.

Dadurch, dass zu jedem Zeitpunkt  $t_0$  die bis dahin abgebaute Fläche betrachtet wird, erhält die Senkung eine Zeitkomponente. Allerdings wird keine gesonderte Zeitfunktion eingeführt, so dass sich die jeweiligen Einwirkungen in einem Moment somit ohne Zeitverzögerung auf jeden Punkt oberhalb des Abbaus übertragen. Eine weitere Einschränkung ist, dass die gewählte Gleichung nur auf flachgelagerte Abbaue anwendbar ist. Ein Einfluss einer Neigung kann nicht modelliert werden.

Durch Differenzieren der Gleichung (3.11) erhält man weitere Gebirgsparameter. Für die Schieflagen  $T_x$  und  $T_y$  gilt:

$$T_x = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.12)$$

$$T_y = \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.13)$$

Aus den Schieflagen lassen sich die horizontalen Verschiebungen  $u_x = -BT_x$  sowie  $u_y = -BT_y$  mit  $B = 0,4R_K$  berechnen. Die horizontalen Deformationen und die vertikale Deformation bestimmen sich wie folgt:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.16)$$

Mit Hilfe dieser Werte werden im nächsten Abschnitt Indizes berechnet, die für die Ereignisprognose verwendet werden.

### 3.3.2 Berechnung der Indizes

Die berechneten Schieflagen und Deformationen geben die tatsächlich gemessenen Werte unterschiedlich gut wieder. Für das Prognoseverfahren werden nur die vertikale Defor-



mation und die Schief lagen verwendet, die nach *Drzeźła et al.* ([Drez99], 1999) mit einer ausreichenden Qualität berechenbar sind.

Die Indizes setzen sich aus berechneten Werten eines laufenden Abbaus und berechneten Werten der Altabbau zusammen. Da die Werte des Altabbau zumeist größer als die des laufenden Abbaus sind, werden diese durch Multiplikation verknüpft. Durch Versuche wurden die folgenden geeigneten Funktionen  $f_i$  gefunden, die nach Vorzeichen sortiert sind:

$$f_1 = \begin{cases} T_x^A \cdot \dot{T}_x + T_y^A \cdot \dot{T}_y & \text{für } T_x^A \cdot \dot{T}_x + T_y^A \cdot \dot{T}_y > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$f_2 = \begin{cases} T_x^A \cdot \dot{T}_x + T_y^A \cdot \dot{T}_y & \text{für } T_x^A \cdot \dot{T}_x + T_y^A \cdot \dot{T}_y < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$f_3 = \begin{cases} \varepsilon_z^A \cdot \dot{\varepsilon}_z & \text{für } \varepsilon_z^A \cdot \dot{\varepsilon}_z > 0 \text{ und } \varepsilon_z^A < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$f_4 = \begin{cases} \varepsilon_z^A \cdot \dot{\varepsilon}_z & \text{für } \varepsilon_z^A \cdot \dot{\varepsilon}_z < 0 \text{ und } \varepsilon_z^A < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.20)$$

Hierbei werden die Werte  $\dot{T}_x$ ,  $\dot{T}_y$  und  $\dot{\varepsilon}_z$  für den laufenden Abbau bestimmt, ohne dass die Altabbau mit in die Berechnung einfließen.  $T_x^A$ ,  $T_y^A$  und  $\varepsilon_z^A$  werden allein aus den Altabbau berechnet. Die Werte der Funktionen  $f_1$  bis  $f_4$  sind von der Abbaugeschwindigkeit abhängig, wie durch Verwenden der zeitlichen Ableitungen für den laufenden Abbau ersichtlich ist.

Die Funktionen  $f_i$  dienen zur Berechnung der Indizes  $d_j$ , indem die  $f_i$  an allen Berechnungspunkten bestimmt und anschließend addiert werden. Dieses geschieht für alle  $f_i$  und für jedes betrachtete Zeitintervall separat. Somit ergeben sich pro Zeitintervall 4 Indizes.

$$d_{j,i} = \sum_{l=1}^{\#Punkte} \int_{t_j}^{t_j+\Delta t} f_i dt \quad \text{für } j = 1, \dots, \#Zeitintervalle; \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3.21)$$

### 3.3.3 Korrelation mit den registrierten seismischen Ereignissen

Für einen zurückliegenden Zeitraum werden die Indizes mit der Anzahl bzw. der seismischen Energie der Ereignisse korreliert. Mittels einer linearen bzw. nicht linearen Regression lassen sich Parameter bestimmen, mit denen eine Prognose gerechnet werden kann.

Sei im Folgenden  $B_i$  eine Abkürzung für die kalkulierte seismische Energie bzw. die Anzahl seismischer Ereignisse im Zeitintervall  $i$  und  $B_i^O$  die entsprechenden gemessenen Werte. Für das lineare Regressionsmodell gilt

$$B_j = \sum_{k=1}^{\#Schichten} \sum_{i=1}^4 a_{ki} d_{kij} \quad \text{für } j = 1, \dots, \#Zeitintervalle \quad (3.22)$$

und für das nichtlineare Modell

$$B_j = \sum_{k=1}^{\#Schichten} b_k \sum_{i=1}^4 a_i d_{kij} \quad \text{für } j = 1, \dots, \#Zeitintervalle \quad (3.23)$$

mit den Regressionsparametern  $a$ ,  $b$ .

In beiden Modellen werden die Indizes in mehreren Gebirgsschichten bestimmt, da nicht bei allen seismischen Ereignissen eine genaue Teufenortung möglich ist.

Sowohl für den Fall der linearen als auch für die nichtlineare Regression werden die Parameter anschließend durch Minimieren von

$$F = \sum_{j=1}^{\#\text{Zeitintervalle}} (B_i - B_i^O)^2 \quad (3.24)$$

bestimmt.

Die seismische Energie bzw. die Anzahl an seismischen Ereignissen wird nun prognostiziert, indem die ermittelten Parameter in Gleichung (3.22) bzw. (3.23) eingesetzt und die berechneten Indizes  $d_{j,i}$  der kommenden Zeitintervalle verwendet werden.

*Fritschen* ([Frit], S. 82-84, 2001) hat das vorgestellte Verfahren anhand eines Beispiels im deutschen Steinkohlenbergbau überprüft. Dabei hat er einen Zeitraum von elf Wochen verwendet, um die gesuchten Parameter zu berechnen. Die Prognose dehnte sich auf vier Wochen aus. Die Ergebnisse sind in Abbildung (3.1) zu sehen.

Es ist eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zu erkennen, wenn die ersten beiden Prognosewochen betrachtet werden. In der vierten Woche der Prognose ist ein merkbarer Unterschied zwischen der prognostizierten und gemessenen Anzahl deutlich erkennbar. Die Tendenz einer Abnahme der Ereignisanzahl wird aber durch das Verfahren berechnet. *Fritschen* merkt an, dass eine längere Periode zur Bestimmung der Parameter und eine kürzere Prognoseperiode zu besseren Ergebnissen führt. Eine befriedigende Vorhersage der seismischen Energie konnte für das Beispiel nicht erreicht werden.

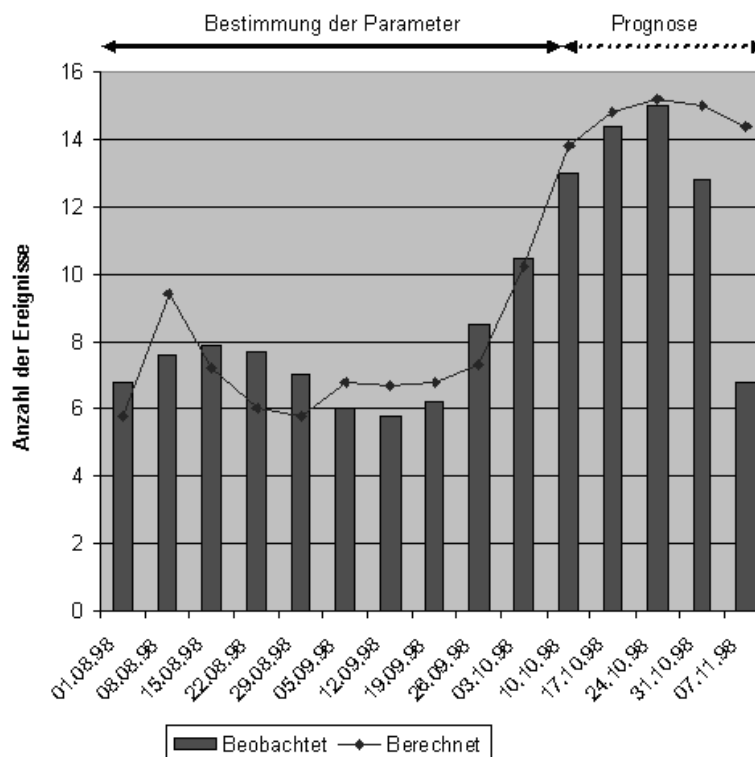


Abb. 3.1: Prognose der Ereignisanzahl (aus *Fritschen* ([Frit]), 2001, S. 83)

Die beiden vorgestellten Prognosemodelle bieten eine Möglichkeit, den Abbauvorgang bzw. die daraus resultierenden Gebirgsbewegungen mit den auftretenden seismischen Ereignissen in Zusammenhang zu bringen und so zu einer Prognose zu gelangen. In beiden Modellen geht der Abbaufortschritt in die Berechnungen ein. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit (Kapitel (5)) wird ein zum zweiten Modell ähnlicher Ansatz gewählt, um zu einer Ereignisprognose zu gelangen. Hierbei wird allerdings ein modifiziertes Gebirgsbewegungsmodell verwendet, das eine zusätzliche Zeitkomponente über eine Zeitfunktion beinhaltet, und im kommenden Kapitel erläutert wird.

# 4 Berechnung der Gebirgs- und Bodenbewegungselemente

Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Prognoseverfahren nutzen auf der einen Seite einen Zusammenhang zwischen dem abgebauten Volumen und der freigesetzten seismischen Energie und auf der anderen Seite die Gebirgsbewegungen, die durch den Abbau bedingt sind.

Beide Ansätze greifen folglich auf die Ursache und somit die Entnahme von Rohstoffen zurück. Der Abbau, seine Geometrie, die Abbauart und die zeitliche Abbauführung bilden die möglichen Ansatzpunkte für den Menschen, einen Einfluss auf die Erschütterungssituation zu nehmen. Dazu sollen im Weiteren Zusammenhänge zwischen dem entnommenen Volumen und den resultierenden Gebirgsbewegungen einerseits und den seismischen Ereignissen andererseits weiter untersucht und aufgezeigt werden. Hierfür wird im Folgenden ein Modell erläutert, dass die Gebirgsbewegungen dynamisch mit Hilfe einer Zeitfunktion berechnet. Neben den Berechnungen für die flache Lagerung, soll das Modell auch geneigte Lagerungen berücksichtigen.

Seismische Ereignisse, die im Liegenden eines Abbaus geortet wurden, machen es notwendig, ein geeignetes Modell für die Berechnungen der dynamisch verlaufenden Hebungen zu entwickeln. Alle für die Senkungs- und Hebungsberechnung notwendigen Gleichungen werden in diesem Kapitel aufgeführt und erläutert. Die Berechnung des Deformationstensors, der Schiefelage, der Krümmungen und der horizontalen Verschiebungen wird ebenfalls dargestellt.

Durch einen Vergleich von berechneten Werten mit Messungen von Senkungen oberhalb von Abbauen bzw. Hebungsmessungen im Liegenden wird die gewählte Theorie und das verwendete Programm überprüft. Dies erfolgt ebenfalls in diesem Kapitel.

## 4.1 Skizzierung des Senkungsvorganges

Ausgehend von der Schaffung eines Hohlraumes im Gebirge und der allmählichen Durchbiegung der darüber liegenden Schichten kommt es zu einer Absenkung dieser Schichten bzw. einer Senkung an der Oberfläche. Die Form der mit der Zeit entstehenden Senkungsmulde „ist das Ergebnis einer sehr großen Anzahl von Faktoren, die nur wenig bekannt sind“ (*Knothe* ([Knot], 1957)). Von daher sollten nur die wichtigsten Faktoren in Betracht gezogen werden. Nach *Knothe* sind dies unter anderem die Mächtigkeit und das Einfallen des Flözes. Ferner sind die Abbauteufe und die Art des Abbaus, seine Form und Größe relevant. Als wichtig erwähnt wird darüber hinaus auch ein Zeitfaktor.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell für die Senkungsvorausberechnung gewählt, bei dem die zitierten Faktoren berücksichtigt werden. Ferner werden noch zusätzliche richtungsabhängige Parameter verwendet. Einflussfunktionen beschreiben in dem Modell die Senkung, die ein Punkt aufgrund eines Abbauelementes im Raum erfährt. Die Gesamtsenkung des Punktes ergibt sich aus der linearen Superposition aller Einzelsenkungen über

alle Abbauelemente. Abbildung (4.1) skizziert die Superposition (durchgezogener Graph) zweier Endsenkungen (punktierter und gestrichelter Graph), die durch zwei Abbauelemente induziert werden. Die Abbauelemente werden durch die entsprechenden Quadrate dargestellt. Als Summe der beiden kürzeren Pfeile markiert der durchgezogene lange Pfeil die Senkung des Ausgangspunktes. Um darüber hinaus die zeitliche Komponente miteinzubeziehen, wird in einem weiteren Schritt eine geeignete Zeitfunktion verwendet.

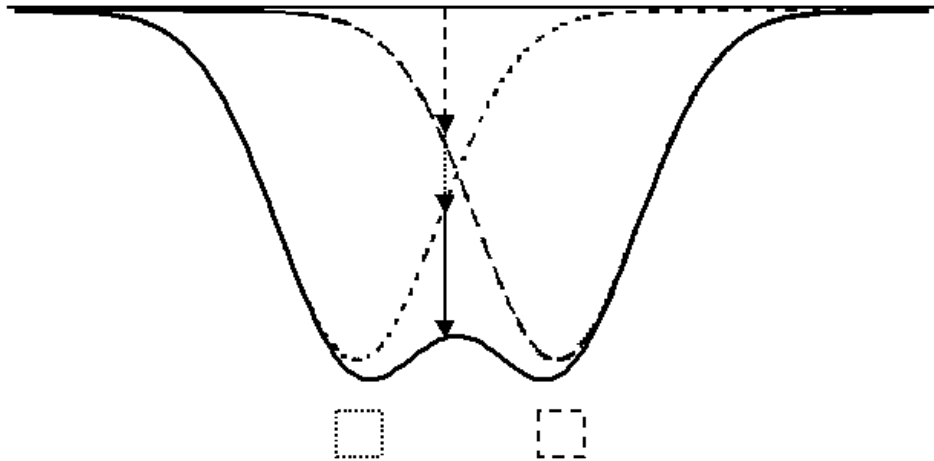


Abb. 4.1: Darstellung der Superposition zweier Einzelsenkungen

## 4.2 Senkungen durch ein Abbauelement

Um die von einem Abbau hervorgerufenen Senkungen zu berechnen, wird der Abbau in diesem Modell in kleine, aber endliche Abbauelemente unterteilt. Im Folgenden werden deshalb erst die durch ein Abbauelement hervorgerufenen Senkungen dargestellt, um in einem späteren Abschnitt das Konzept der Abbauelemente auf die gesamte Fläche zu übertragen.

Ein quaderförmiger Körper mit quadratischer Grundfläche wird in diesem Modell als *Abbauelement* bezeichnet. Ein solches Abbauelement besitzt damit ein definiertes Volumen. Die Lage des Mittelpunktes im Raum ist eindeutig festgelegt. Wird ferner mit  $t_0$  der Zeitpunkt bezeichnet, an dem das Abbauelement  $A(x_A, y_A, z_A = 0)$  abgebaut wird, so lässt sich die durch dieses Abbauelement induzierte Endsenkung  $s(x, y, z = H)$  eines Punktes  $P(x, y, z = H)$  an der Tagesoberfläche für  $t - t_0 = \Delta t \rightarrow \infty$  aus folgender Gleichung berechnen:

$$s(x, y, z = H) = \frac{k}{\pi} \frac{aV}{R_{E-S}^2} \cdot \exp\left(-k \frac{d^2}{R_{E-S}^2}\right) \quad (4.1)$$

Es gilt:

$$k = -\ln(0,01) \approx 4,605$$

$$a = \text{Abbaufaktor } (a \in (0, 1])$$

$$R_{E-S} = H \cdot \cot(\gamma) \text{ (Vollflächenradius nach Ehrhardt-Sauer)}$$

$$H = \text{Abbauteufe}$$

$$\gamma = \text{Grenzwinkel}$$

$$V = \text{Volumen des Abbauelements (Grundfläche} \cdot \text{Mächtigkeit)}$$

$$d = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}$$

horizontaler Abstand Berechnungspunkt zum Abbauelement

$x, y, z = H$  : Koordinaten des Berechnungspunkts

$x_A, y_A, z_A = 0$  : Mittelpunktkoordinaten des Abbauelements

Zur Festlegung von  $k$  sei auf *Sroka* und *Schober* ([Srok86], 1986) verwiesen. Die Definition des *Vollflächenradius*  $R_{E-S}$  und des Grenzwinkels  $\gamma$  erfolgt ebenfalls bei *Sroka* und *Schober*. Bei *Ehrhardt* und *Sauer* ([Ehrh], 1961) ist eine Herleitung für die Benutzung der Gaußschen Funktion gegeben.

Betrachtet man die Gleichung (4.1), so fallen zwei Eigenschaften auf. Die Gleichung ist rotationssymmetrisch, das heißt an der Tagesoberfläche entsteht aufgrund des Abbauelementes eine kreisförmige Senkungsmulde mit dem Mittelpunkt bei  $(x_A, y_A)$ . Darüber hinaus ist die Senkungsmulde in ihren Ausmaßen nicht begrenzt. Dies folgt aus der Gaußschen Funktion, die nur eine asymptotische Abnahme gegen Null zulässt. Ausgehend von jeweils einem Abbauelement (punktiert bzw. gestrichelt) ist eine Senkungsmulde in Abbildung (4.1) skizziert.

Die Gleichung (4.1) gilt nur unter bestimmten Voraussetzungen, wie zum Beispiel einer flachen Lagerung der Gebirgsschichten. Ferner dürfen die Parameter des Modells nicht richtungsabhängig sein. In den folgenden Abschnitten wird die Gleichung (4.1) soweit modifiziert, dass das Modell auch für diese Fälle ausgelegt ist. Als Folgerung erhält man bei richtungsabhängigen Eigenschaften bzw. einem Einfallen der Gebirgsschichten eine nicht mehr rotationssymmetrische Senkungsmulde.

Neben den erwähnten Einschränkungen ist zu beachten, dass die Formel zur Senkungsberechnung an der Tagesoberfläche dient. Dieses kann aber durch Angleichen des Vollflächenradius auf die Senkungsberechnung im Gebirge ausgedehnt werden, solange der Punkt an dem die Berechnung erfolgen soll, oberhalb des abgebauten Horizonts liegt.

$$R(z) = R(H) \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^n \quad (4.2)$$

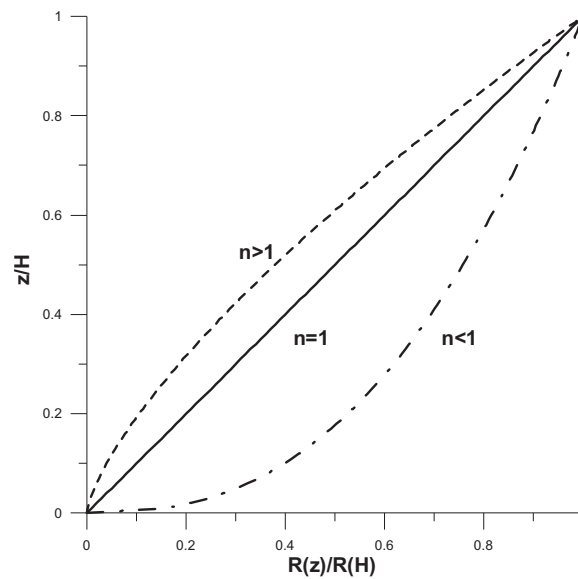
mit

$$R(H) = H \cdot \cot(\gamma)$$

$n$  : Grenzflächenkoeffizient

Hierbei gibt  $z$  den vertikalen Abstand zwischen dem Abbauelement und dem Berechnungspunkt an.

Der Ansatz für die Berechnung des Vollflächenradius innerhalb des Gebirges ist zum Beispiel bei *Schober* und *Sroka* ([Scho88], 1988) zu finden. Der Parameter  $n$  stellt einen Kennwert für das Gebirge dar. Er beeinflusst den „Verlauf“ des Vollflächenradius im Gebirge. Der Verlauf ist in Abbildung (4.2) für unterschiedliche Intervalle des Parameters  $n$  skizziert.


 Abb. 4.2: Skizzierung des Vollflächenradius im Gebirge in Abhängigkeit von  $n$ 

Nach *Sroka et al.* ([Srok88], S. 21, 1988) ergeben Messungen und Modellversuche  $n \in [0, 4; 0, 75]$ . Für Vorausberechnungen wird ein Wert von  $n = 0,5$  empfohlen. Einen Überblick über weitere verwendete Werte des Gebirgsparameters  $n$  wird in Tabelle (4.1) gegeben.

Autor	Gebirgsparameter $n$
<i>Krzysztoń</i> (1965)	$n = 1,0$
<i>Drzęzła</i> (1972)	$n = 0,525$
<i>Sroka, Bartosik-Sroka</i> (1974)	$n = 0,5$
<i>Drzęzła</i> (1975)	$n = 0,665$
<i>Gromysz</i> (1977)	$n = 0,61$
<i>Drzęzła</i> (1979)	$0,47 \leq n \leq 0,49$
<i>Kowalski</i> (1984)	$0,48 \leq n \leq 0,66$
<i>Drzęzła</i> (1989)	$0,45 \leq n \leq 0,70$
<i>Preuß</i> (1990)	$n = 0,54$

 Tabelle 4.1: Unterschiedliche Werte für den Gebirgsparameter  $n$  (aus *Dzegniuk et al.* ([Dzeg], 2003))

### 4.3 Einfluss geneigter Lagerung und richtungsabhängiger Eigenschaften

Auch wenn laut *Kratzsch* ([Krat97], S.161, 1997) „in Deutschland heute rund 80% der geförderten Steinkohle aus flacher Lagerung, der übrige Teil aus der mäßig geneigten Lagerung“ stammt, soll das obige Modell trotzdem geneigte Lagerungen berücksichtigen können. *Sroka et al.* ([Srok88], S. 37) führen an, dass der Fehler zwischen den tatsächlichen Senkungen und den Werten aus Formel (4.1) mit der Größe des Einfallens  $\alpha$  [gon] zusammenhängt.

Eine geneigte Lagerung der Gebirgsschichten bewirkt ein Verschieben der Senkungsmulde in Richtung des Einfallens (*Hejmanowski* ([Hejm], S. 54-56, 1993)) wie in Abbildung (4.3) dargestellt. Um dieses in dem Rechenmodell zu berücksichtigen, wird in Formel (4.1) ein tiefenabhängiger Korrekturterm  $\rho(z)$  eingeführt.

$$\rho(z) = (z - z_A) \cdot \tan(\mu\alpha)$$

$\mu$  : Gebirgsparameter

$$\theta = \mu\alpha$$

$$\theta = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right)$$

$$\theta = 0,7 \cdot \alpha \text{ für } \alpha < 50\text{gon}$$

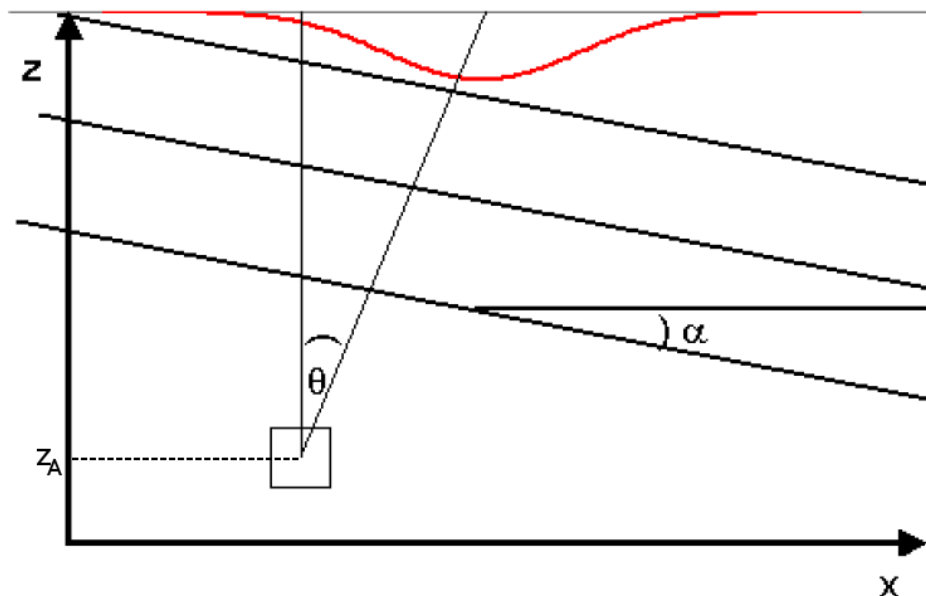


Abb. 4.3: Verschiebung der Senkungsmulde in Richtung des Einfallens ( $\theta = \mu\alpha$ )

Der obige Korrekturterm spaltet sich in zwei horizontale Terme auf, wenn auch die Richtung des Einfallens  $\phi_E$  mit einbezogen wird. Die Definition des Winkels  $\phi_E$  erfolgt in der Literatur nicht eindeutig. Es wird hier Bezug auf *Sroka et al.* ([Srok88], S. 37/38, 1988) und *Kateloe* ([Kate], S. 25/26, 2002) genommen.

$$\rho_x(z) = \rho(z) \cdot \cos\phi_E \quad (4.3)$$

$$\rho_y(z) = \rho(z) \cdot \sin\phi_E \quad (4.4)$$

Durch Angleichen von  $d_A$  fließen die beiden Terme in die Berechnung ein.

$$\tilde{d}_A = \sqrt{(x - x_A - \rho_x(z))^2 + (y - y_A - \rho_y(z))^2} \quad (4.5)$$

Ansonsten bleibt die Gleichung (4.1) erhalten. Sie wird weiter modifiziert, wenn nicht alle Eigenschaften richtungsunabhängig sind. Dazu bekommt der Vollflächenradius eine richtungsabhängige Komponente, so dass er in der horizontalen Projektion ellipsenförmig



ist. Es wird angenommen, dass ein maximaler Vollflächenradius  $R_{max}$  und ein dazu senkrechter minimaler Vollflächenradius  $R_{min}$  existieren (vgl. Abbildung (4.4)). Dazwischen erfolgt eine Interpolation mittels einer Ellipse (siehe Anhang).

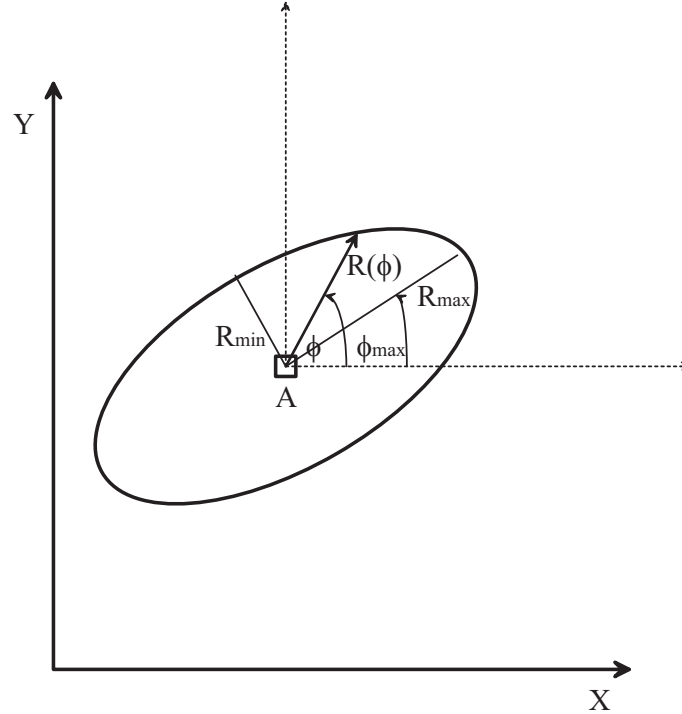


Abb. 4.4: Abhängigkeit des Vollflächenradius von der horizontalen Lage

$$R(\phi) = \frac{R_{min}R_{max}}{\sqrt{R_{min}^2 \cos^2(\phi - \phi_{max}) + R_{max}^2 \sin^2(\phi - \phi_{max})}} \quad (4.6)$$

Als  $\phi_{max}$  wird dabei der Winkel bezeichnet, der von der Richtung der x-Koordinate ausgehend und dem maximalen Radius eingeschlossen wird. Für  $\phi$  gilt folgende Beziehung:

$$\phi = \begin{cases} \arctan \frac{y-y_a}{x-x_a} & \text{für } x \neq x_A \\ \frac{\pi}{2} & \text{für } x = x_A \end{cases}$$

$R(\phi)$  ist wiederum ein teufenabhängiger Parameter, für den

$$R(\phi, z) = R(\phi) \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^n$$

gilt. Analoges gilt für  $R_{min}$  und  $R_{max}$ .

$$R_{min}(z) = R_{min} \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^n \quad \text{mit } R_{min} = H \cdot \cot \phi_{min}$$

$$R_{max}(z) = R_{max} \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^n \quad \text{mit } R_{max} = H \cdot \cot \phi_{max}$$

Somit erhält man die neue Gleichung:

$$S(x, y, z) = \frac{k}{\pi} \frac{aV_A}{R_{min}(z)R_{max}(z)} \cdot \exp\left(-k \frac{\tilde{d}_A^2}{R^2(\phi, z)}\right) \quad (4.7)$$

In Gleichung (4.7) sind alle Modifikationen enthalten, die zur Berechnung der Endsenkung eines Punktes oberhalb des betreffenden Abbauelementes notwendig sind. Gleichung (4.1) stellt einen Spezialfall dieser Gleichung dar. Die Abbildung (4.5) verdeutlicht die Möglichkeiten des modifizierten Modells.

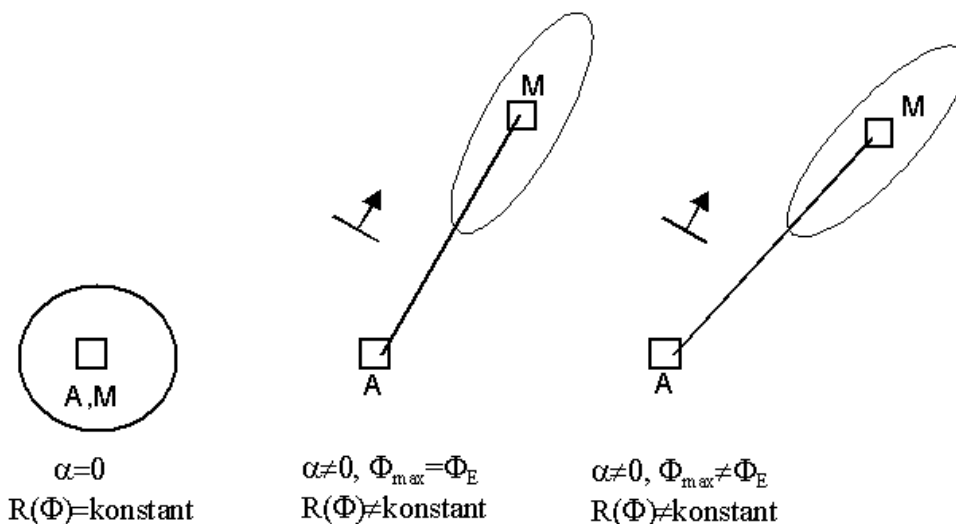


Abb. 4.5: Einfluss des Einfallens  $\alpha$  und des Vollflächenradius auf die Senkungsmulde

## 4.4 Zeitliche Aspekte der Senkungsberechnung

Mit den bisherigen Gleichungen lassen sich nur Endsenkungen berechnen. Diese treten erst für  $t \rightarrow \infty$  ein. Die zeitliche Entwicklung der Senkung muss damit noch genauer untersucht werden, um dem Senkungsvorgang als dynamischen Prozess gerecht zu werden.

*Preuße* ([Preu], S. 52-53, 1990) gibt mehrere Punkte an, die Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Bodenbewegungen haben. Zum einen ist dies das Verhalten der oberhalb des Abbaus liegenden Schichten, zum zweiten „die Nachgiebigkeit des Versatzes oder Bruchfeldes“. Der vertikale Abstand zwischen dem Abbaufeld und dem betrachteten Punkt nimmt neben dem Durchbauungsgrad einen weiteren Einfluss. Als letzten Punkt gibt *Preuße* die Abbaugeschwindigkeit an.

Wird auch hier erneut von einem Abbauelement ausgegangen, so kann dieses so klein gewählt werden, dass es für praktische Überlegungen zu einem Zeitpunkt  $t_0$  als vollständig abgebaut gelten kann. Die Abbaugeschwindigkeit spielt dann für ein Einzelelement keine Rolle.

Die dynamische Senkung eines Punktes aufgrund eines Abbauelementes erhält man aus der Gleichung (4.7) durch Multiplikation mit einer Zeitfunktion  $f(t)$ .

$$S(x, y, z, t) = S(x, y, z) \cdot f(t) \quad (4.8)$$

Verschiedene Ansätze versuchen das zeitliche Senkungsverhalten zu modellieren. Eine Auflistung wichtiger Modelle ist bei *Kratzsch* ([Krat86], 1986) und bei *Katloe* ([Kate], S. 48

ff., 2002) zu finden. Nach *Schober et al.* ([Scho87], 1987)) sind „aus praktischer Sicht all diese Ansätze mathematisch äquivalent, wenn als Zeitfunktion gilt  $f(t) = 1 - \exp(-ct)$ “. Der Parameter  $c$  ist ein Zeitkoeffizient, der die zeitliche Verzögerung des Gebirges auf die Schaffung eines Hohlraumes beinhaltet.  $c$  wird in der Einheit  $1/\text{Jahr}$  angegeben. *Preuß*e ([Preu], S. 103-107, 1990) gibt genauere Angaben zur Bedeutung von  $c$ . Auch gibt er eine Möglichkeit zur Bestimmung dieses Parameters an. Genau wie der Vollflächenradius teufenabhängig ist, so gilt dies auch für  $c$  (*Preuß*e ([Preu], S. 107, 1990), *Sroka* ([Srok78], 1978)).

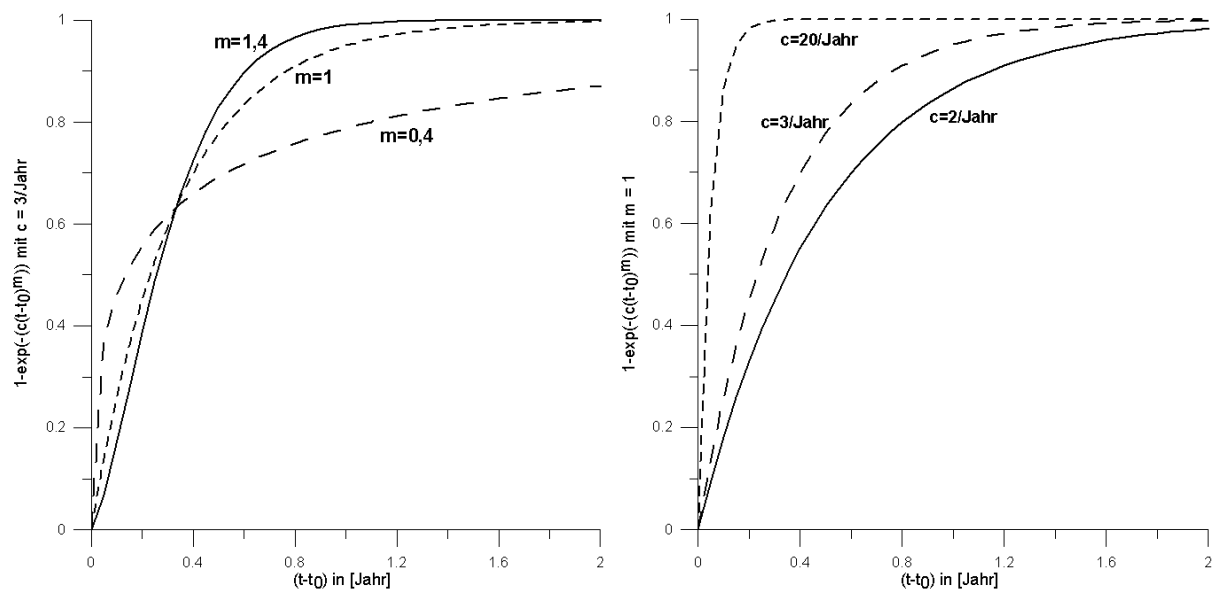
$$c(z) = c(H) \cdot \left(\frac{H}{z}\right)^n \quad (4.9)$$

Hierbei gelten die gleichen Notationen wie in Gleichung (4.2).

Abweichend zu *Preuß*e gibt in der vorliegenden Arbeit der Zeitkoeffizient  $c$  das Konvergenzverhalten sowie das Übertragungsverhalten des Gebirges wieder (vgl. *Katloe* [Kate], S. 55-61, 2002), wobei die Gültigkeit von Gleichung (4.9) erhalten bleibt. Für den Ruhrbergbau ist nach *Katloe* ([Kate], S. 69, 2002)  $c = 18,75/\text{Jahr}$  ein typischer Wert. Die in der vorliegenden Arbeit angewandte Zeitfunktion  $f(t)$  wird wie folgt definiert:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_0 \\ 1 - \exp\left(-\left(c(t - t_0)\right)^m\right) & \text{für } t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Unter  $t_0$  wird der Zeitpunkt verstanden, zu dem das Abbauelement abgebaut wird.  $m$  ist ein weiterer Gebirgsparameter, der Einfluss auf den Verlauf der Zeitfunktion hat, wie in Abbildung (4.6(a)) skizziert ist.



(a) Beispiel für die Entwicklung der Zeitfunktion in Abhängigkeit von  $m$  mit  $c = 3/\text{Jahr}$

(b) Beispiel für die Entwicklung der Zeitfunktion in Abhängigkeit von  $c$  mit  $m = 1$

Abb. 4.6: Skizzierung der verwendeten Zeitfunktion in Abhängigkeit der Parameter  $c$  bzw.  $m$

Für  $m < 1$  zeigt die Abbildung (4.6(a)) zu Beginn eine sehr hohe Zunahme der Zeitfunktion, die aber schnell abklingt. Für  $m > 1$  ist der Effekt entgegengesetzt. Die Wahl von  $m < 1$  entspricht einer sehr schnellen Anfangssenkung und einem langsamen Ausklingen der Senkungsphase, das heißt langsames Annähern an die Endsenkung. Je größer  $m$  gewählt ist, desto mehr verdreht sich dieser Effekt und es kommt zu einer immer schnelleren Annäherung an die Endsenkung für wachsendes  $t$ . Bei vorgegebenem Zeitkoeffizienten  $c$  ergibt sich bei allen Kurven für  $t > t_0$  ein gemeinsamer Schnittpunkt bei  $\tilde{t} = \frac{1+ct_0}{c}$ . Für  $t < \tilde{t}$  verlaufen die Kurven für  $m < 1$  oberhalb der Kurve für  $m = 1$  und die Kurven für  $m > 1$  unterhalb. Der Verlauf dreht sich für  $t > \tilde{t}$  um.

Es ist aus Gleichung (4.10) ersichtlich, dass bei einem abgebauten Element  $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 1$  gilt, das heißt, dass erst nach beliebig langer Zeit der Senkungsvorgang abgeschlossen ist. Neben dem Parameter  $m$  ist, wie schon erwähnt, der Zeitkoeffizient  $c$  für den Verlauf der Zeitfunktion verantwortlich, was in Abbildung (4.6(b)) für ein festes  $m$  verdeutlicht ist. Es ist  $\lim_{c \rightarrow \infty} f(t) = 1$  für jedes  $t$  und  $m$ .

Bezogen sich die bisherigen Gleichungen jeweils auf ein Abbauelement, so stellen die Abbildungen (4.7) und (4.8) einen Vorgriff auf einen gesamten Abbau dar. Das heißt, die Auswirkungen aller Abbauelemente eines Abbaus werden berücksichtigt. Dieses wird in Abschnitt (4.7) erläutert. Abgebildet ist die zeitliche Entwicklung der Senkungsmulde an der Tagesoberfläche über einem Abbau in 825 m Teufe. Für die Berechnungen wurde eine Mächtigkeit von 2 m bei einer Streblänge von 210 m angenommen, welche über eine Distanz von 1350 m abgebaut werden sollte. Für das Beispiel wurde  $\phi_{min} = \phi_{max} = 77,80 \text{ gon}$  gewählt. Der Zeitkoeffizient betrug  $c = \frac{3}{\text{Jahr}}$ . Angenommen wurde eine konstante Abbaugeschwindigkeit von  $5 \frac{\text{m}}{\text{Tag}}$ , und somit eine Abbauzeit von 270 Tagen. Die Teufe soll konstant sein, so dass kein Einfallen vorliegt. Verglichen werden die dynamischen Senkungen für  $m = 0,4$  (gestrichelte Kurve) und  $m = 1$  (durchgezogene Kurve). Der Abbau ist als mitlaufende gestrichelte Linie beziehungsweise nach Beendigung des Abbaus als durchgezogene Linie dargestellt. Wie schon in Abbildung (4.6(a)) für ein Abbauelement erkennbar, entwickelt sich die Kurve für  $m = 0,4$  auch für einen gesamten Abbau zuerst wesentlich schneller. Dieser Effekt dreht sich mit fortlaufender Zeit um, so dass sich die durchgezogene Kurve schneller entwickelt. Dieser Vorgang setzt sich von links (abgebauter Bereich) nach rechts fort. Über dem Teil, der schon längere Zeit abgebaut worden ist und nicht mehr unter dem Einfluss des gerade abgebauten Bereichs liegt, erfolgt der Schnitt der beiden Kurven zuerst.

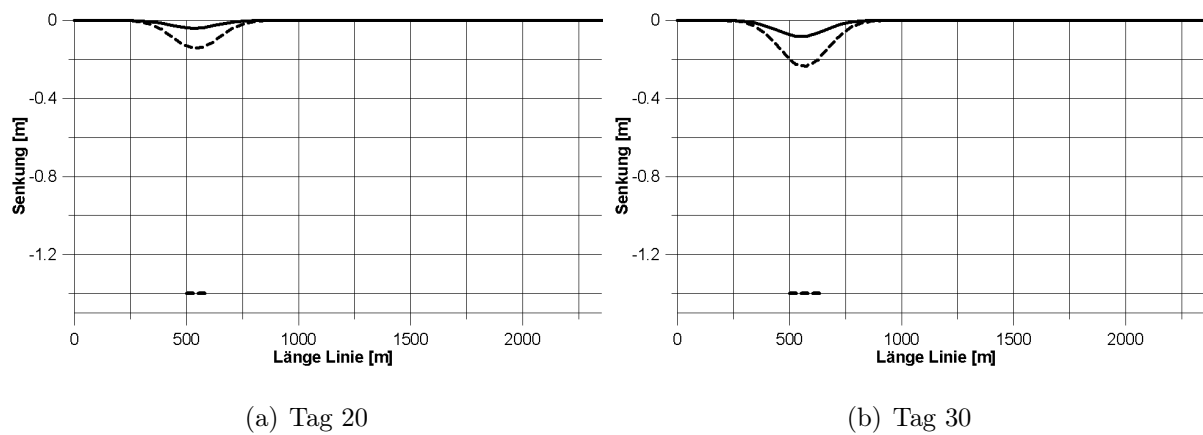


Abb. 4.7: Darstellung einer Beispielsenkung für  $m=1$  (durchgezogener Graph) und  $m=0,4$  (gestrichelter Graph) zu verschiedenen Zeitpunkten

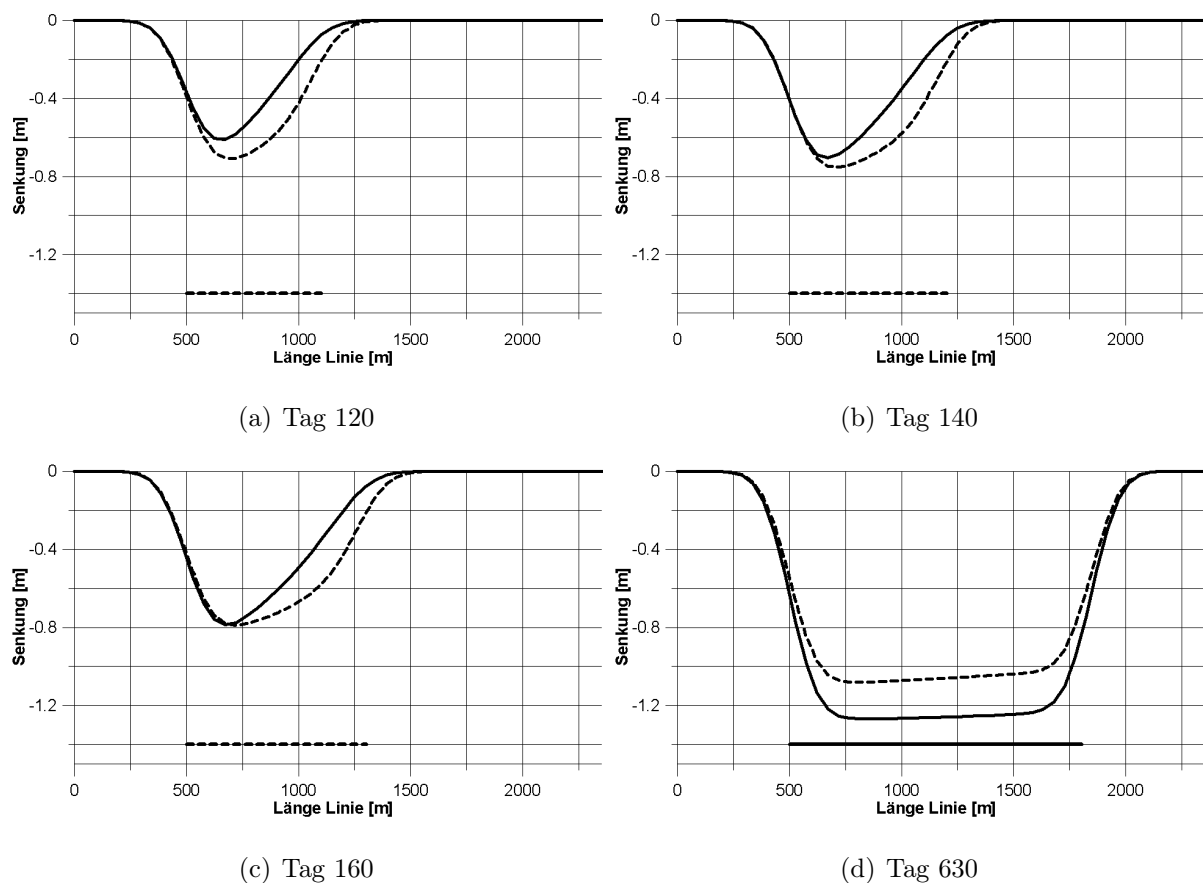


Abb. 4.8: Darstellung einer Beispielsenkung für  $m=1$  (durchgezogener Graph) und  $m=0,4$  (gestrichelter Graph) zu verschiedenen Zeitpunkten (Fortsetzung)

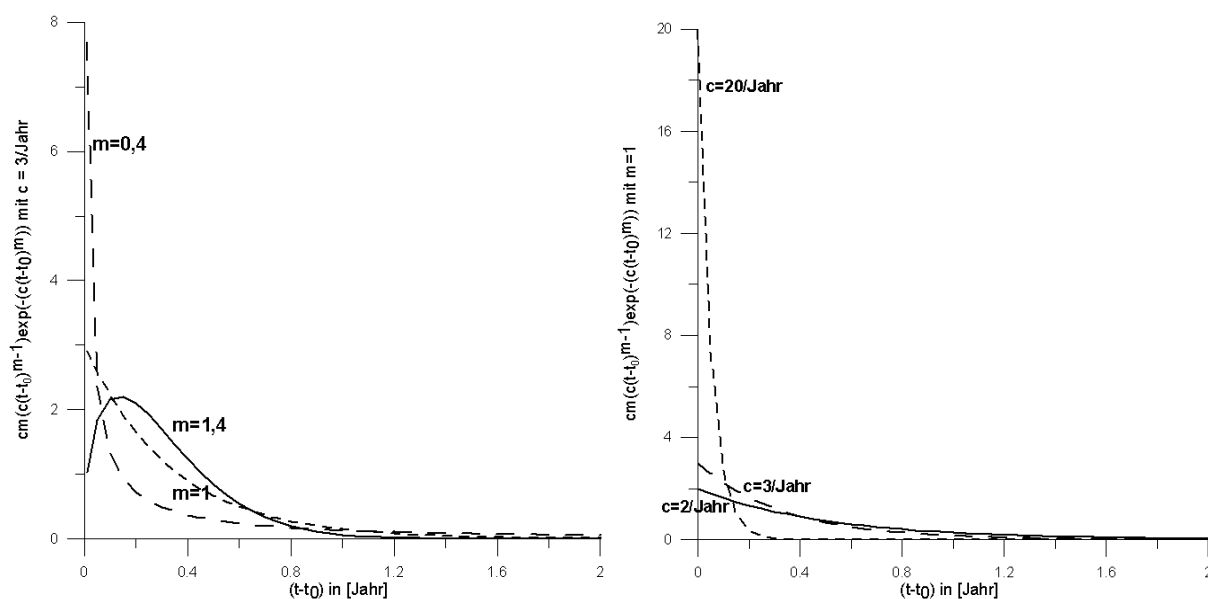
Definiert man die Senkungsgeschwindigkeit in einem Punkt als zeitliche Ableitung der Senkung, so kann diese aus Gleichung (4.8), gültig für ein Abbauelement, durch Differen-

zieren (für  $t > t_0$ ) gewonnen werden.

$$\begin{aligned}
 \dot{S}(x, y, z, t) &= S(x, y, z) \cdot \dot{f}(t) \\
 &= S(x, y, z) \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[ 1 - \exp\left(-\left(c(t-t_0)\right)^m\right) \right] \\
 &= S(x, y, z) \cdot \underbrace{\left[ cm\left(c(t-t_0)\right)^{m-1} \exp\left(-\left(c(t-t_0)\right)^m\right) \right]}_{\dot{f}(t)}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Wird die Gleichung (4.11) partiell nach der Zeit differenziert, so erhält man die Senkungsbeschleunigung.

Die Abbildung (4.9) gibt die zeitlichen Ableitungen der in Abbildung (4.6) dargestellten Kurven wieder. Auffallend ist, dass für  $m = 1, 4$  (Abbildung (4.9(a))) die maximale Senkungsgeschwindigkeit nicht für  $(t - t_0) \rightarrow 0$  zu finden ist, sondern bei einem größeren Wert von  $t$  liegt, wobei  $t < \frac{1+ct_0}{c}$  gilt. Für  $t \rightarrow \infty$  fällt die Kurve für  $m = 1, 4$  am schnellsten ab, da sie sich am schnellsten der Endsenkung in dem Zeitbereich nähert. Dieses ist für  $m = 0, 4$  genau anders herum, da für  $t > \frac{1+ct_0}{c}$  nur noch eine allmähliche Annäherung an die Endsenkung erfolgt. Die Kurven aus Abbildung (4.9(b)) sind analog erklärbar.



(a) Beispiel für die Entwicklung von  $\dot{f}(t)$  in Abhängigkeit von  $m$  mit  $c = 3/\text{Jahr}$

(b) Beispiel für die Entwicklung von  $\dot{f}(t)$  in Abhängigkeit von  $c$  mit  $m = 1$

Abb. 4.9: Skizzierung von  $\dot{f}(t)$  in Abhängigkeit der Parameter

Abschließend sollen beispielhaft noch drei Ansätze aufgeführt werden, die den dynamischen Verlauf der Senkungen auf unterschiedliche Arten beschreiben (z. B. *Katloe* ([Kate], S. 48-50, 2002). Bei einem Ansatz von *Knothe* aus dem Jahr 1952 wird angenommen, dass die Senkungsgeschwindigkeit zu dem Senkungsdefizit (Differenz zwischen der Endsenkung

$s^E(T)$  und der tatsächlich zum Zeitpunkt  $t$  vorliegenden Senkung  $s(t)$ ) proportional ist.

$$\dot{s}(t) = c \cdot (s^E(t) - s(t))$$

$c$  beschreibt hierbei die zeitliche Verzögerung des Gebirges. Die Senkung berechnet sich somit als Lösung der Differentialgleichung. *Martos* (1967) gibt eine Zeitfunktion an:

$$z(t) = 1 - \exp(-bt^2)$$

Hierbei ist  $b$  ein Zeitkoeffizient. Ein Ansatz von *Schober* und *Sroka* (1983) verwendet das Konvergenzverhalten sowie das Übertragungsverhalten des Gebirges. Dabei wird der zeitliche Verlauf des elementaren Muldenvolumens  $\Delta M(t)$  beschrieben.

$$\Delta M(t) = a \cdot \Delta V \left( 1 + \frac{\zeta}{f - \zeta} \exp(-ft) - \frac{f}{f - \zeta} \exp(-\zeta t) \right)$$

$\zeta$  = relative Konvergenzgeschwindigkeit

$f$  = relative Übertragungsgeschwindigkeit des Gebirges

$\Delta V$  = elementares Abbauvolumen

## 4.5 Bestimmung von Deformationen

Neben der zeitlichen Entwicklung der Senkung, interessieren noch weitere Gebirgsbewegungselemente wie die Schiefelage, die Krümmung, die horizontale Verschiebung und der Deformationstensor. Diese sind ebenfalls zeitabhängig und werden bei der Beurteilung von möglichen Bergschäden verwendet. Die folgenden Notationen und Definitionen sind hierbei von *Sroka* und *Schober* ([Srok86], 1986) übernommen und beziehen sich auf ein Abbauelement.

### Die Schiefelage

Die Schiefelagen  $T_x(x, y, z, t)$  bzw.  $T_y(x, y, z, t)$  sind als erste Richtungsableitung der Senkung definiert.

$$T_x(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial x} S(x, y, z, t) \quad (4.12)$$

bzw.

$$T_y(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial y} S(x, y, z, t) \quad (4.13)$$

### Die Krümmung

Die Krümmung ist wie folgt definiert:

$$K_{xx}(x, y, z, t) = \frac{\frac{\partial^2}{\partial x^2} S(x, y, z, t)}{\left[ 1 + T_x(x, y, z, t)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (4.14)$$

Da  $\frac{\partial}{\partial x} S(x, y, z, t)$  recht klein ist, geht der Nenner von (4.14) gegen 1 (*Sroka und Schober* ([Srok86], 1986)), und somit kann die Krümmung aus praktischen Erwägungen folgendermaßen berechnet werden:

$$K_{xx}(x, y, z, t) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} S(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial x} T_x(x, y, z, t) \quad (4.15)$$

$$K_{yy}(x, y, z, t) = \frac{\partial^2}{\partial y^2} S(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial y} T_y(x, y, z, t) \quad (4.16)$$

$$K_{xy}(x, y, z, t) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} S(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial y} T_x(x, y, z, t) + \frac{\partial}{\partial x} T_y(x, y, z, t) \right] \quad (4.17)$$

### Die horizontalen Verschiebungen

Die Schieflagen und die horizontalen Verschiebungen weisen ähnliche Bewegungsvorgänge auf (Hypothese von Averischin) (z. B. *Katloe* ([Kate], S. 34 / 35, 2002)). Somit wird zur Bestimmung der horizontalen Verschiebungen ein teufenabhängiger Proportionalitätsfaktor eingeführt.

$$B(z) = B(H) \cdot \left( \frac{z}{H} \right)^{\tilde{m}} \quad (4.18)$$

mit

$$B(H) = \frac{R(H)}{\sqrt{2k}} \quad (4.19)$$

$\tilde{m}$  „ist ein Gebirgsparameter, welcher i. a. mit  $n$  [...] übereinstimmt, was aber im Einzelfall zu entscheiden ist“ (*Sroka und Schober* ([Srok86], 1986)). Mit Hilfe von  $B(z)$  lassen sich die horizontalen Verschiebungen zu

$$U_x(x, y, z, t) = -B(z) \frac{\partial}{\partial y} S(x, y, z, t) = -B(z) \cdot T_x(x, y, z, t) \quad (4.20)$$

$$U_y(x, y, z, t) = -B(z) \frac{\partial}{\partial x} S(x, y, z, t) = -B(z) \cdot T_y(x, y, z, t) \quad (4.21)$$

berechnen.

### Der Deformationstensor

Der Deformationstensor enthält die Angaben zu den Deformationen eines infinitesimalen Volumenelementes im Gebirge. Er ist wie folgt aufgebaut:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{mit: } \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}; \quad i, j = 1, \dots, 3 \quad (4.22)$$

Aufgrund der Symmetrie müssen von den neun Einträgen nur sechs bestimmt werden. Auch diese lassen sich zum Großteil auf schon bestimmte Werte zurückführen. Der De-



formationstensor ist zeitabhängig, das heißt, seine Einträge sind zeitabhängig.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial U_x}{\partial x} \\ &= -B(z) \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}\end{aligned}\quad (4.23)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial U_y}{\partial y} \\ &= -B(z) \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\end{aligned}\quad (4.24)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial S}{\partial z}\quad (4.25)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xy} &= \varepsilon_{yx} \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (4.26)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xz} &= \varepsilon_{zx} \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_x}{\partial z} + T_x \right)\end{aligned}\quad (4.27)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{yz} &= \varepsilon_{zy} \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_y}{\partial z} + T_y \right)\end{aligned}\quad (4.28)$$

## 4.6 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

Wie in Kapitel (2) dargestellt, scheinen die vertikalen Spannungen einen Einfluss auf das Auftreten von seismischen Ereignissen zu haben. Aus diesem Grund soll in diesem Abschnitt auf die Berechnungen der Spannungen aus den Gebirgsbewegungen eingegangen werden. Im Folgenden wird dazu vom verallgemeinerten Hookeschen Gesetz im isotropen Medium ausgegangen, somit werden nur Deformationen bis zur sogenannten Proportionalitätsgrenze vorausgesetzt, das heißt, zwischen den Spannungen und Dehnungen besteht ein linearer Zusammenhang (z. B. *Gibowicz und Kijko* ([Gibo94], S. 29-31, 1994)).

$$p_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.29)$$

mit

$\lambda, \mu$  : *Lamésche Konstanten*

$$\theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$\theta$  ist als Spur des Deformationstensors invariant unter Koordinatendrehungen. Die Lamésche Konstante  $\mu$  wird als Schermodul bezeichnet und ist ein Maß für den Widerstand eines elastischen Körpers auf Deformationen durch Scherungen. Für  $\lambda$  kann eine solche einfache Beziehung nicht gegeben werden (*Gibowicz und Kijko* ([Gibo94], S. 30, 1994)).

Berechnen lassen sich die Laméschen Konstanten aus dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Poissonzahl  $\nu$  (z. B. *Sroka* und *Schober* ([Srok89], 1989)).

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.30)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4.31)$$

Ferner wird davon ausgegangen, dass die Spannungen nur von den Deformationen abhängen und beispielsweise nicht von der Temperatur.

Es ist außerdem möglich die Laméschen Konstanten über die Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$ , die Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  und die Dichte  $\rho$  zu bestimmen (vgl. *Landolt-Börnstein* ([Land], 1992 S. 4)).

$$\mu = v_s^2 \rho \quad (4.32)$$

$$\lambda = v_p^2 \rho - 2\mu \quad (4.33)$$

	$\bar{\rho} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]^1$	$\bar{v}_p \left[ \frac{m}{s} \right]$	$\bar{v}_s \left[ \frac{m}{s} \right]$
Sandstein	2385	3630	
	2320		2260

Tabelle 4.2: Durchschnittliche Dichte, Kompressionswellengeschwindigkeit und Scherwellengeschwindigkeit von Sandstein (aus *Landolt-Börnstein* ([Land], S. 10, 1992))

Werden zum Beispiel für Sandstein die in Tabelle (4.2) aufgeführten Mittelwerte bei Normalbedingungen zu Grunde gelegt, so ergeben sich für  $\mu$  und  $\lambda$ :

$$\mu \approx 12181,6 \text{ MPa}$$

$$\lambda \approx 7063,7 \text{ MPa}$$

Neben den Zusatzspannungen existiert ausgehend von der Gewichtskraft der Überlagerungsdruck  $P_0$ , welcher wie folgt abgeschätzt wird:

$$P_0 = H \bar{\rho}_0 g \quad (4.34)$$

$P_0$  : primärer Spannungszustand, wenn nicht durch Tektonik beeinflusst

$H$  : Teufe

$\bar{\rho}_0$  : mittlere Gesteinsdichte

$g \approx 10 \frac{m}{s^2}$  : Erdbeschleunigung, hier als konstant angenommen

Bei einer Teufe  $H = 1000 \text{ m}$  errechnet sich der Überlagerungsdruck zu  $P_0 = 25 \text{ MPa}$  (vgl. *Räkers* [Raek], 1989 S. 12).

<sup>1</sup>Die unterschiedlichen Dichten ergeben sich aus der Verwendung verschiedener Probenanzahlen und Proben zur Bestimmung der beiden Geschwindigkeiten.

Für die ursprünglichen horizontalen Spannungen werden nach *Brady* und *Brown* ([Brad93], S. 142, 1993) häufig die Beziehungen

$$p_{xx} = p_{yy} = \left( \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \cdot P_0 \quad (4.35)$$

verwendet. *Bräuner* ([Brau94], S. 50, 1994) nimmt für ein idealelastisches Gebirge  $\nu = 0,25$  und  $E = 17000 \text{ MPa}$  an, woraus für die Laméschen Konstanten

$$\mu = \lambda = 6800 \text{ MPa} \quad (4.36)$$

und

$$p_{xx} = p_{yy} = \frac{1}{3} P_0 \quad (4.37)$$

folgt.

## 4.7 Gesamter Abbau - mehrere Abbaue

Alle bisher aufgeführten Gleichungen bezogen sich auf ein kleines endliches Abbauelement. Der Übergang von einem Element zu dem gesamten Abbau, bzw. auf mehrere Abbaue, basiert auf dem Prinzip der Superposition. *Kratzsch* ([Krat97], S. 137, 1997) beschreibt dieses Prinzip als additive Überlagerung der Einzelsenkungen  $S_i(x, y, z, t)$  zu der Gesamtsenkung  $S(x, y, z, t)$ .  $i$  läuft hierbei über alle Abbauelemente. Das Prinzip gilt auch für mehrere Abbaue. Es wird ferner angenommen, dass jedes Abbauelement ungestört auf den Beobachtungspunkt  $P(x, y, z)$  einwirkt.

Für die Berechnung der Endsenkung eines Punktes  $P(x, y, z)$  zum Zeitpunkt  $\tilde{t}$  werden alle Abbaue in kleine sich nicht überschneidende Abbauelemente  $A_i$   $i = 1, \dots, n$  unterteilt. Jedes dieser Abbauelemente besitzt eine genau definierte Position im Raum und eine Zeit  $t_i$  zu der es abgebaut wird. Die Endsenkung am Punkt  $P(x, y, z)$  zum Zeitpunkt  $\tilde{t}$  lässt sich dann als Summe der Einzelsenkungen  $S_{A_i}(x, y, z, t_i)$  (vgl. Gleichung (4.7)) bestimmen. Gilt  $t_i \geq \tilde{t}$  so ist  $S_{A_i}(x, y, z, t_i) = 0$ .

$$S_E(x, y, z, \tilde{t}) = \sum_{\substack{i=0 \\ t_i < \tilde{t}}}^n S_{A_i}(x, y, z, t_i) \quad (4.38)$$

Um die dynamischen Senkungen berechnen zu können, wird jede Einzelsenkung mit der Zeitfunktion (4.10) multipliziert, so dass sich als Ergebnis für die dynamische Senkung

$$S(x, y, z, \tilde{t}) = \sum_{\substack{i=0 \\ t_i < \tilde{t}}}^n S_{A_i}(x, y, z, t_i) \cdot f(t_i) \quad (4.39)$$

ergibt. Die Abbildungen (4.7) und (4.8) wurden erstellt, indem über alle Abbauelemente nach Gleichung (4.39) summiert wurde.

Zu beachten ist die Durchbauung des Gebirges. Parameter wie der Grenzwinkel  $\gamma$  können sich dadurch mit der Zeit ändern, so dass für einen Abbau  $A$ , der an zeitlich zweiter

Stelle abgebaut wird, eine Grenzwinkel  $\gamma_2$  gewählt werden muss, der sich möglicherweise von dem Grenzwinkel  $\gamma_1$  unterscheidet, wenn der Abbau  $A$  an zeitlich erster Stelle abgebaut wird (*Sroka* und *Schober* ([Srok85], 1985)).

Nehmen mehrere Abbaue, wie es zum Beispiel bei einem Doppelbetrieb der Falls ist, Einfluss auf den Berechnungspunkt, so muss noch über alle Abbaue summiert werden. Das gleiche Verfahren lässt sich auf die Hebungsberechnung, die im übernächsten Abschnitt erläutert wird, übertragen. Ebenso wird bei der Berechnung der Schiefelage, der Krümmung, den horizontalen Verschiebungen und dem Deformationstensor verfahren.

## 4.8 Vergleich von Senkungsmessungen und Berechnungen

Die oben dargestellten Gleichungen zur dynamischen Senkungsberechnung, werden in diesem Abschnitt anhand eines Messfalls vom Niederrhein überprüft. Dazu wird ein Schwenkbetrieb untersucht, der nahezu 22 Monate abgebaut worden ist. Die Streblänge des Abbaus belief sich auf 330 m bei einer mittleren Teufe von 850 m. Die Mächtigkeit betrug 1 m. Der Abbau mit den einzelnen Messpunkten ist in Abbildung (4.11) wiedergegeben. Oberhalb des Abbaus liegen drei Altbaue, die den betrachteten Abbau zu ca. 75 % überbaut haben (Abbildung (4.10)). Insbesondere der Punkt 24 liegt genau oberhalb einer Strecke zweier Altbaue.

Da die täglichen Abbaufortschritte nicht vorlagen, wurden aus den ca. monatlich vorliegenden Strebständen, die Abbaufortschritte interpoliert. Ziel der Berechnungen war es, mit einem Parametersatz die Zeitsenkungskurven aller Punkte möglichst gut nachzurechnen.

Der in Abbildung (4.11) linke Teil des Abbaus wurde zuerst abgebaut, so dass der angesprochene Punkt 24 auf der Hälfte des Abbaus lag. Dieser Punkt wird neben den Punkten 14, 28 und 16 hier genauer untersucht. In der Abbildung (4.11) sind diese Punkte durch Kreuze hervorgehoben. In der zeitlichen Reihenfolge wurde zuerst der Punkt 14, dann die Punkte 24 und 28 und zuletzt Punkt 16 unterfahren. Für den Grenzwinkel  $\gamma$  und den Abbaufaktor  $a$  wurden für diesen Bereich typische Werte verwendet. Das Gleiche gilt für  $c$  (vgl. Abschnitt (4.4)). Der Parameter  $m$  musste für die Nachberechnung dieses Messfalls bestimmt werden.

$$\gamma = 60 \text{ gon}$$

$$a = 0.9$$

$$c = 18,75/\text{Jahr} \text{ und } m = 0,2 \text{ (Zeitfunktion)}$$

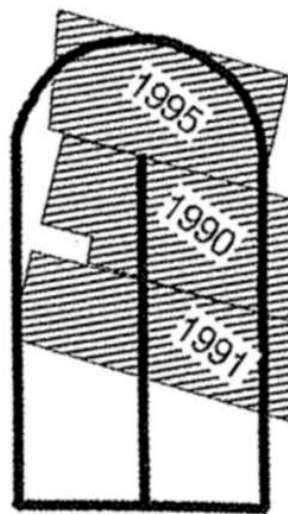


Abb. 4.10: Situation der Altabbau oberhalb des Schwenkbetriebs (aus *Hegemann* ([Hege02], S. 115, 2002))

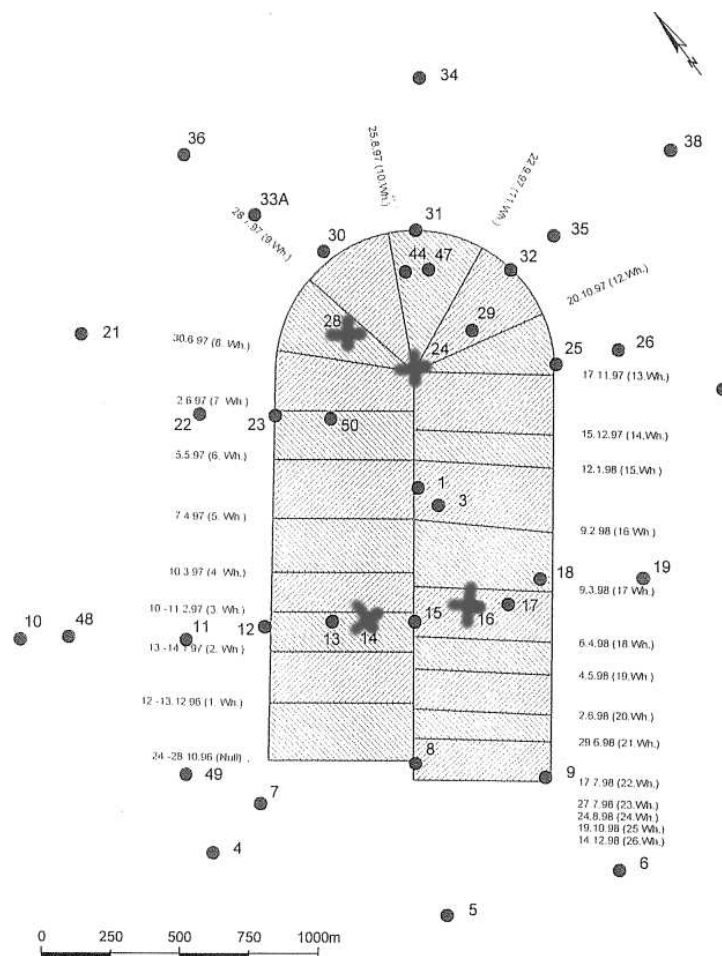


Abb. 4.11: Abbausituation für den Schwenkbetrieb (aus *Korittke und Palte* ([Kori02], S. 8, 2002))

In den Abbildungen (4.12) für Punkt 14, (4.13) für Punkt 28, (4.14) für Punkt 16 und (4.15) für Punkt 24 sind die Ergebnisse der Berechnungen den Messwerten gegenübergestellt. Mit Ausnahme des Punkts 24 werden bei den anderen Punkten die realen Zeitsenkungskurven sehr gut nachberechnet. Bei dem zuerst unterfahrenden Punkt 14 ist auffällig, dass zu Beginn eine hohe Senkungsgeschwindigkeit vorliegt, die sich ab dem hundertsten Tag nach der Nullmessung noch steigert, um dann ab dem ca. 250 Tag auf fast Null abzufallen. Ab dem 400 Tag kommt es wieder zu einer erhöhten Senkungsgeschwindigkeit. Die Gründe für diesen Zeitsenkungsverlauf liegen an dem Abbau, der als Schwenkbetrieb geführt wurde. Der Punkt 14 liegt von Anfang des Abbaus an im Einwirkungsbereich und senkt sich somit von Beginn an. Bei der direkten Unterbauung nimmt die Senkungszunahme nochmals deutlich zu. Sobald der Abbau soweit fortgeschritten ist, dass der Punkt außerhalb des Einwirkungsbereichs ist, befindet sich der Punkt in der Nachsenkungsphase und die Senkungsgeschwindigkeit ist sehr gering.

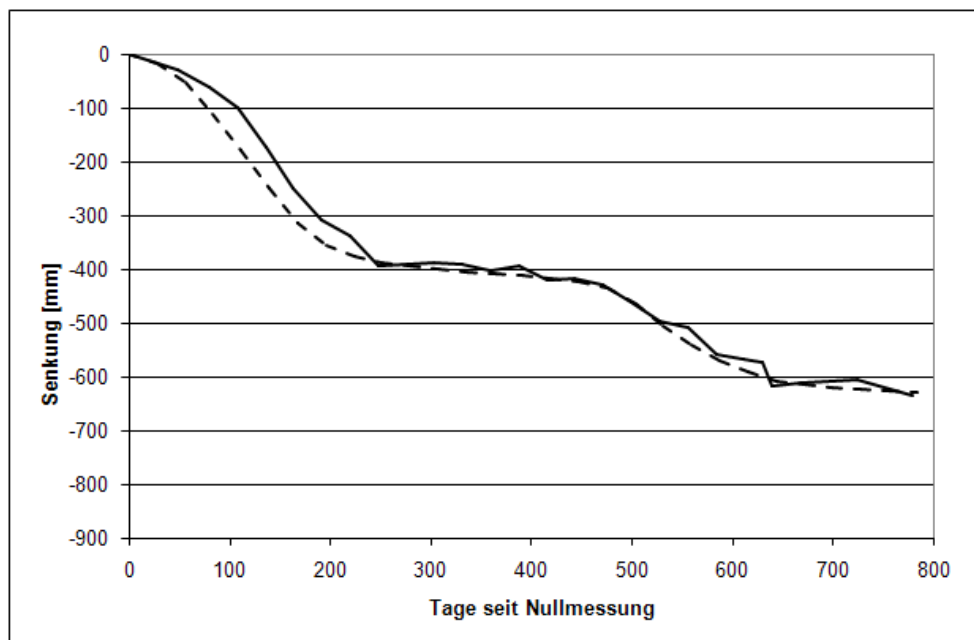


Abb. 4.12: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 14

Durch das Schwenken des Abbaus gelangt der Punkt ein zweites Mal in den Einwirkungsbereich des Abbaus, wird allerdings nicht direkt unterfahren. Dadurch senkt sich der Punkt nochmals deutlich. Da sich der Punkt zu dieser Zeit nicht mehr in der Nachsenkungsphase befindet, ist die Senkungsgeschwindigkeit wieder deutlich erhöht, kann aber nicht die Werte wie bei der direkten Unterbauung erreichen. Mit Beenden des Abbaus liegt nur noch die Nachabbauphase vor, und der Punkt hat nahezu seine Endsenkung erreicht. Die berechnete Zeitsenkungskurve gibt den beschriebenen Verlauf in allen Phasen sehr gut wieder. Dieses betrifft auch die unterschiedlichen Senkungsgeschwindigkeiten, die nur in der Anfangsphase gegenüber den realen Werte erhöht sind. Der Punkt 28 (Abbildung (4.13)) liegt ungefähr in dem Schwenkbereich des Abbaus und besitzt damit keine zwischenzeitliche Nachsenkungsphase. Auch seine Zeitsenkungskurve wird sehr gut nachberechnet.

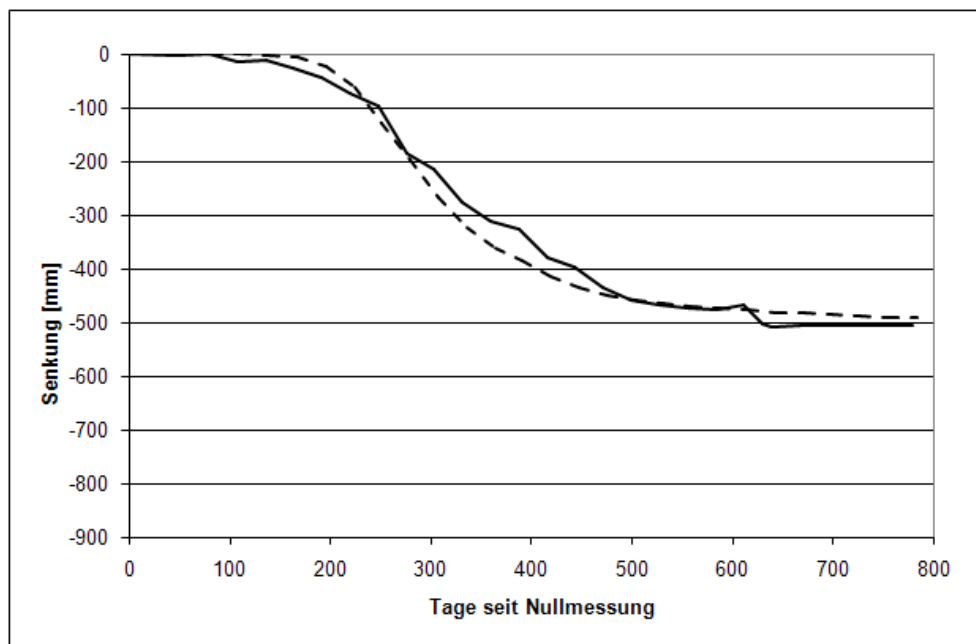


Abb. 4.13: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 28

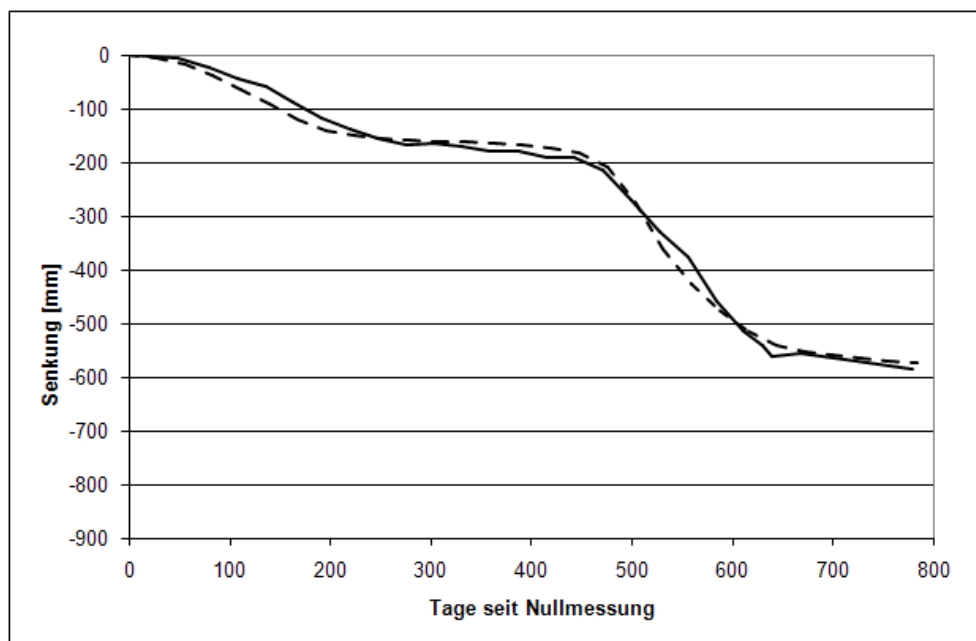


Abb. 4.14: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 16

Bei dem Punkt 16 (Abbildung (4.14)) liegt ein ähnliches Verhalten wie beim Punkt 14 vor. Auch dieser Punkt gelangt zweimal in den Einwirkungsbereich des Abbaus, so dass eine zwischenzeitliche Nachsenkung einsetzt. Im Gegensatz zu Punkt 24 (Abbildung (4.15)) wird auch seine Zeitsenkungskurve sehr gut nachberechnet.

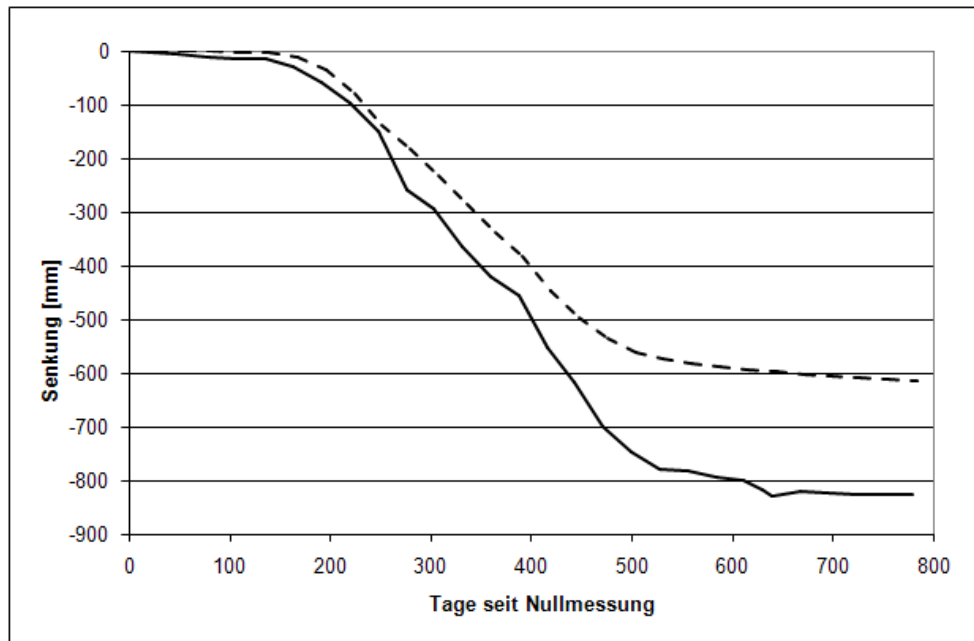


Abb. 4.15: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamischen Senkungen (gestrichelte Linie) - Punkt 24

Punkt 24 besitzt eine besondere Lage. Er bildet den Umkehrpunkt für den Abbau und liegt zusätzlich oberhalb einer Strecke der Altabbau. Die Nachberechnung weicht deutlich von den realen Werten ab, obwohl er nur gut 200 m vom Punkt 28 entfernt liegt. Es kann hierbei nur vermutet werden, dass die Differenz in einer Aktivierung des Altabbaus begründet liegt. Dieses kann durch einen Parametersatz für alle Punkte nicht berücksichtigt werden. Um auch diesen Punkt besser nachzurechnen, wären eigens darauf abgestimmte Parameter von Nöten, was nicht das Ziel war.

Insgesamt kann das verwendete Senkungsmodell mit der Zeitfunktion als geeignet angesehen werden, um auch schwierigen Situationen, wie Senkungen oberhalb eines Schwenkbetriebs, nachzurechnen.

## 4.9 Hebungen

Vertikale Spannungen können nicht durch einen Hohlraum übertragen werden. Deshalb kommt es im Liegenden eines Abbaus zu einer Entlastung, welche zu Hebungen der liegenden Schichten führt. Ein Grund dafür könnte in einem elastischen Verhalten des Gebirges liegen. Die aufgrund der vorherigen vertikalen Spannungen zusammengedrückten Schichten können sich durch die entstandene Entlastung wieder heben. Mit wachsendem Druck im Bereich des abgebauten Baufeldes nehmen die Hebungen teilweise wieder ab. Hinsichtlich einer Beschreibung und Modellierung der Hebungen müssen somit die folgenden Fragen genauer untersucht werden:

- (1) Existiert ein vorgegebener maximaler Hebungsbetrag und wovon ist dieser abhängig?
- (2) Bis zu welchem bankrechtem Abstand lassen sich Hebungen im Liegenden eines Abbaus nachweisen?



- (3) Wie ist der Verlauf der Hebungen mit wachsendem Überbauungsabstand?
- (4) Lassen sich die Hebungen im Strebvorfeld beobachten, und wie weit reichen sie hinein?
- (5) Nach welchen Gesetzmäßigkeiten verlaufen die Hebungen zeitlich?

Alle fünf Fragen können auch heute noch nicht abschließend beantwortet werden. *Preuß*e ([Preu], 1990) bezieht sich in seiner Dissertation auf Messungen in Schächten, so dass er den vertikalen Verlauf untersuchen konnte. Dazu benutzt er Daten, die Mitte des vergangenen Jahrhunderts von *Spickernagel* ([Spic50] und [Spic51], 1950/51), *Löffler* ([Loef], 1951) und *Baron* ([Baro], 1951) veröffentlicht worden sind. Außerdem bezieht er sich auf Ergebnisse von *Wisniewski* ([Wisn], 1979), die dieser im polnischen Steinkohlenrevier sammeln konnte.

### Verlauf der Hebungen in Abhängigkeit vom Überbauungsabstand

Einige Resultate über den vertikalen Verlauf der Hebungen in den liegenden Schichten eines laufenden Abbaus gibt *Preuß*e ([Preu], S. 115-120, 1990) unter Verwendung der Ergebnisse von *Wisniewski* ([Wisn], 1979) an.

Nach *Wisniewski*'s Ausführungen (siehe auch *Preuß*e) existiert ein maximaler Hebungsbetrag, der proportional zur Entlastung und damit proportional zur Abbauteufe  $H$  ist.

$$h_{max} = 0,2685 \cdot 10^{-3} \cdot H \quad (4.40)$$

Betrachtet wurden dabei Abbauteufen von 142 m bis 1000 m. Heutige Abbauteufen liegen zum Teil bei mehr als 1000 m. Hier muss zunächst davon ausgegangen werden, dass die lineare Abhängigkeit (4.40) auch für aktuelle Abbaue gilt.

Damit dieser maximale Hebungsbetrag  $h_{max}$  erreicht werden kann, muss eine genügend große Fläche abgebaut worden sein. Im Gegensatz zu den Senkungen oberhalb des Abbaus ist der maximale Hebungsbetrag nicht von der Mächtigkeit  $M$  oder einem Abbaufaktor  $a$  abhängig. Dieses gilt auch für die vertikale Reichweite  $B$  der Hebungen. Auch diese ist ausschließlich von der Abbauteufe  $H$  abhängig.

$$B = 0,625 \cdot H \quad (4.41)$$

Zwischen dem Punkt  $P(x, y, z_1)$  mit der maximalen Hebung und  $P(x, y, B)$  nimmt die Hebungen nicht linear, sondern exponentiell ab.

$$h(z) = h_{max} \cdot \exp\left(-\pi \frac{z^2}{B^2}\right) \quad (4.42)$$

Hierbei bezeichnet  $z$  den vertikalen Abstand vom Abbau oder den Überbauungsabstand. Werden die Gleichungen (4.40) und (4.41) in Gleichung (4.42) eingesetzt, so wird dabei ersichtlich, dass der Hebungsbetrag in einem beliebigen Punkt im Liegenden eines Abbaus nur von der Abbauteufe und dem Überbauungsabstand abhängt.

Beispielhaft für einen Abbau in 1000 m Teufe ergibt sich:

$$\begin{aligned} h_{max} &\approx 27 \text{ cm} \\ B &= 625 \text{ m} \\ h(B) &= \exp(-\pi) \cdot h_{max} \approx 4,3\% \cdot h_{max} \end{aligned}$$

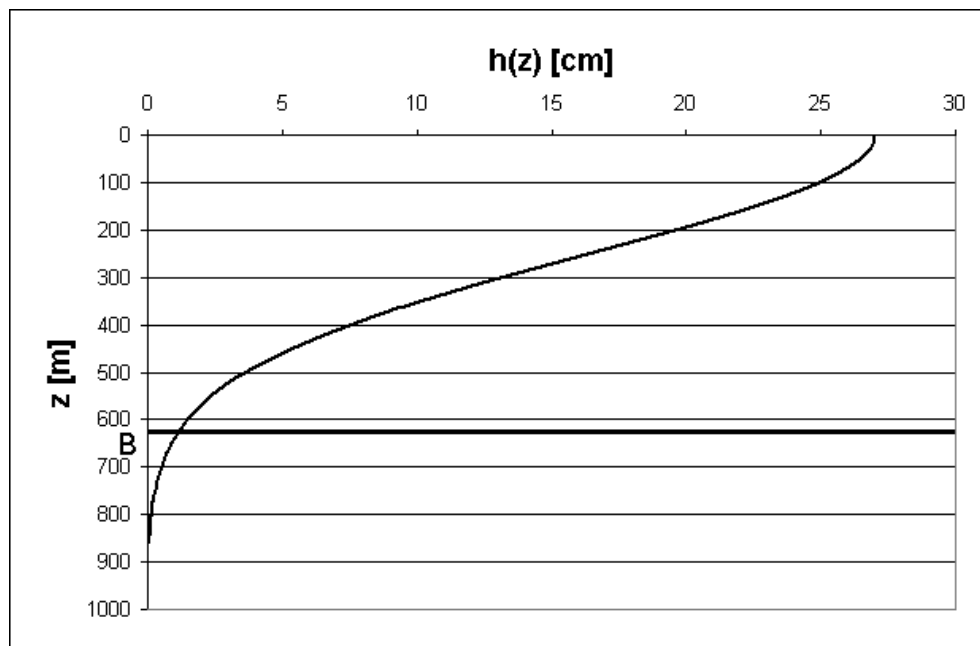


Abb. 4.16: Skizzierung von  $h(z)$  für einen Abbau in 1000 m Teufe nach Gleichung (4.42)

Der Verlauf von  $h(z)$  nach Gleichung (4.42) ist für dieses Beispiel in Abbildung (4.16) wiedergegeben und zeigt die enorme Reichweite der Hebungen, die einige Hundert Meter beträgt und sich somit keineswegs auf den unmittelbaren Bereich unterhalb des Abbaus beschränken.

### Hebungsverteilung in Abhängigkeit vom bankparallelen Abstand

Die Existenz eines maximalen Hebungsbetrages  $h_{max}$  und dessen Abhängigkeit von der Abbauteufe konnte durch neuere Messungen zum Beispiel bei *te Kook* ([teKo], 1993) bestätigt werden. Abweichend fand *te Kook* ein größeres  $h_{max}$  als durch die Gleichung (4.40) vorausgesagt. Ob die Hebungen linear oder exponentiell mit steigendem Überbauungsabstand abnehmen, konnte bei diesen Messungen nicht überprüft werden, da die Messungen in einer überbauten Strecke stattfanden. Die Werte eignen sich jedoch, um die Hebungen in Abhängigkeit vom strebparallelen Abstand zu untersuchen.

In dem Messfall von *te Kook* ([teKo], S. 38 ff. und Anlagen 35 - 38, 1993) aus dem östlichen Ruhrgebiet wurde ein strebmittig verlaufender Querschlag bei einem Abstand von 200 m im Bereich des Aufhauens und 14 m bei Beendigung des Strebes überbaut. Bei allen insgesamt acht Messpunkten setzten die Hebungen durchschnittlich 200 m vor der Überbauung ein, was auch für den geringen Überbauungsabstand von 14 m zutrifft. Ca. 300 m nach erfolgter Überbauung war der maximale Hebungswert an den einzelnen Punkten erreicht. Zu bemerken ist, dass es sich um die erste Bauhöhe im Baufeld handelte, und somit der ursprüngliche Spannungszustand vorherrschte. Die Lage des Querschlags zum Abbau, sowie der Messpunkte mit den Überbauungsabständen ist in der Abbildung (4.17) wiedergegeben. Die Hebungen für drei Messpunkte in Abhängigkeit vom bankparallelen Abstand ist in Abbildung (4.18) dargestellt. Bei Messpunkt 7 betrug die maximale Hebung 35 cm bei einem Überbauungsabstand von 20,5 m. Die Teufe des Strebs lag in diesem Bereich bei ca. 1000 m, wofür nach Gleichung (4.40) eine maximale Hebung von nur 27 cm errechnet wird.

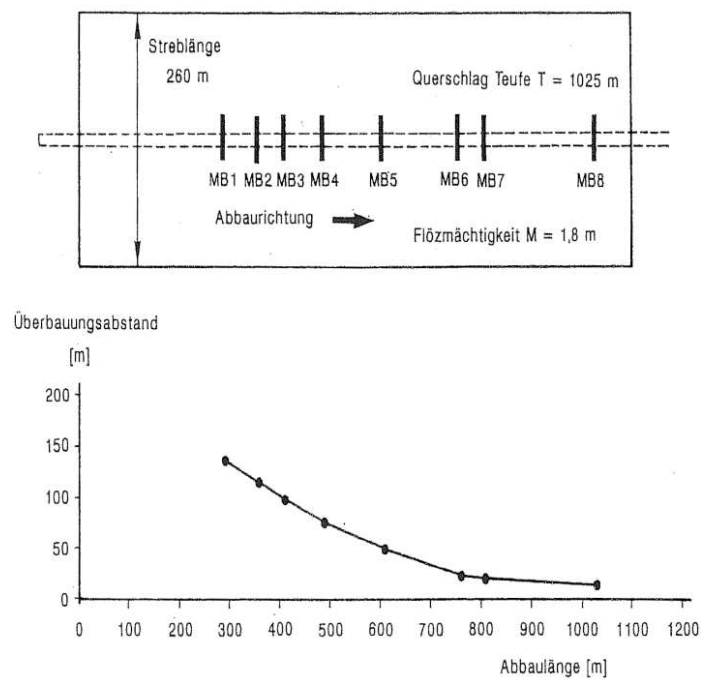


Abb. 4.17: Lage der Messpunkte zum Abbau und der Überbauungsabstand des Querschlags (aus *te Kook* ([teKo], Anlage 35, 1993))

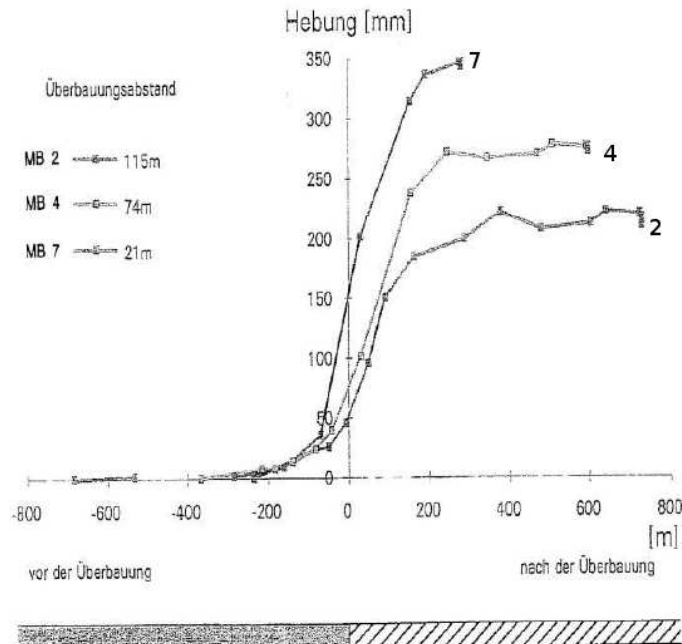


Abb. 4.18: Hebungskurven für drei Messpunkte (aus *te Kook* ([teKo], Anlage 36, 1993))

Neben der Veröffentlichung von *te Kook* existieren noch weitere Artikel, die sich auf Messungen in überbauten Strecken beziehen: *Bräuner* ([Brau94], 1994, S. 50-52), *Goerke-Mallet* ([Goer], 1994) und *Kirsch* ([Kirs], 1998). Dabei fällt bei *Kirsch* ([Kirs], 1998) und *Bräuner* ([Brau94], 1994) die Ähnlichkeit der dargestellten Hebungskurven (Abbildung (4.19)) mit Senkungskurven im Hangenden auf.

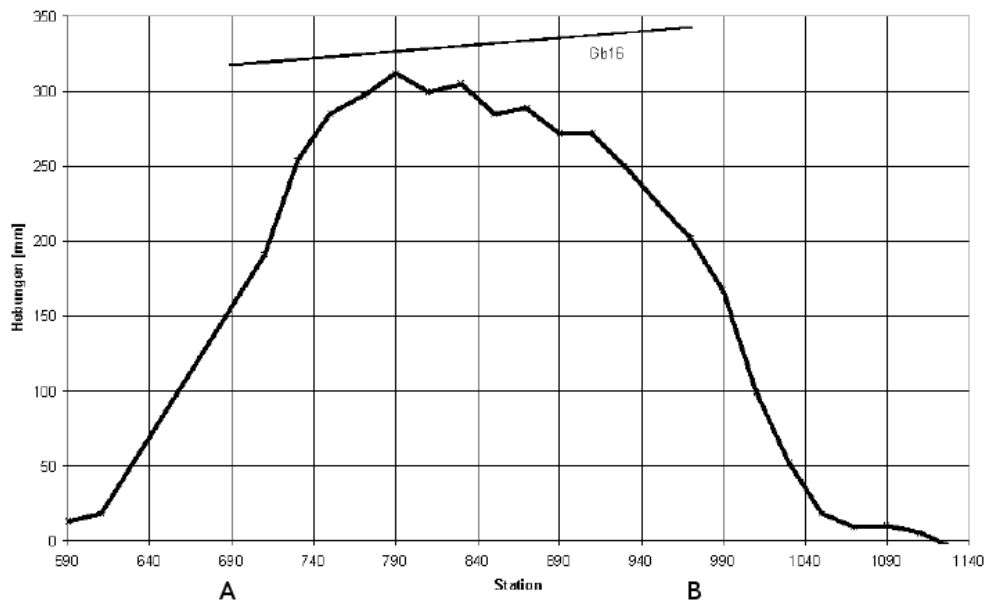


Abb. 4.19: Hebungskurve nach *Kirsch* ([Kirs], 1998) - 69 Tage nach der Überbauung

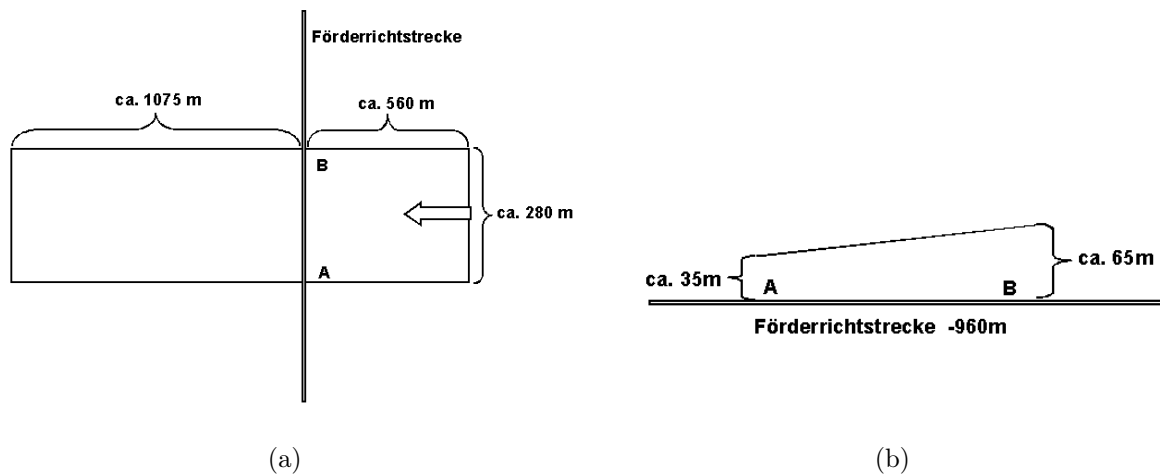


Abb. 4.20: Betrachtete Abbausituation bei *Kirsch* ([Kirs], 1998)

Im Gegensatz zu den Messungen, die bei *te Kook* zu finden sind, wurden die bei *Kirsch* ([Kirs], 1998) beobachteten Hebungen in einem stark durchbauten Gebirge gemessen. Mehrere Abbaukanten mögen deshalb weitere Einflüsse auf die Hebungswerte genommen haben. Die überbaute Förderrichtstrecke mit ihrer Lage zum Abbau ist in den Abbildungen (4.20(a)) und (4.20(b)) zu erkennen. Der Abbau hatte eine Mächtigkeit von ca. 1,8 m und wurde in einer mittleren Teufe von 910 m geführt. Auch in diesem Beispiel ist klar erkenntlich, dass die Hebungen weit vor der Überbauung wahrgenommen werden konnten. So waren ca. 160 m vor der Überbauung an den meisten Messpunkten schon Hebungen zu beobachten. 135 m vor der Überbauung wurden an allen Messpunkten Hebungen gemessen. Die Hebungswerte lagen über dem maximalen Hebungswert nach Gleichung (4.40) wie auch in Abbildung (4.19) erkennbar ist. Dieses mag ein Indiz sein, dass die einfache lineare Abhängigkeit nach Gleichung (4.40) bei großen Teufen nicht mehr gilt. Allerdings

lassen sich aus den dargestellten Fällen noch keine neueren Zusammenhänge verifizieren.

### Zeitliche Aspekte der Hebungen

Im Strebvorfeld kann es zuerst zu Senkungen kommen, die dann in Hebungen übergehen, wie dies zum Beispiel bei *Kirsch* ([Kirs], 1998) und *Bräuner* ([Brau94], 1994) festgestellt worden ist. Die Senkungen betragen dabei einige Millimeter, gingen aber bei geringerem Strebabstand in Hebungen über. Eine mögliche Erklärung ist die Zunahme der vertikalen Spannungen im Strebvorfeld. Im Gegensatz dazu wurden bei *te Kook* ([teKo], 1993) nur Hebungen gemessen. Die zeitliche Entwicklung der Hebung eines Punktes im Liegenden ist in Abbildung (4.21) skizziert.

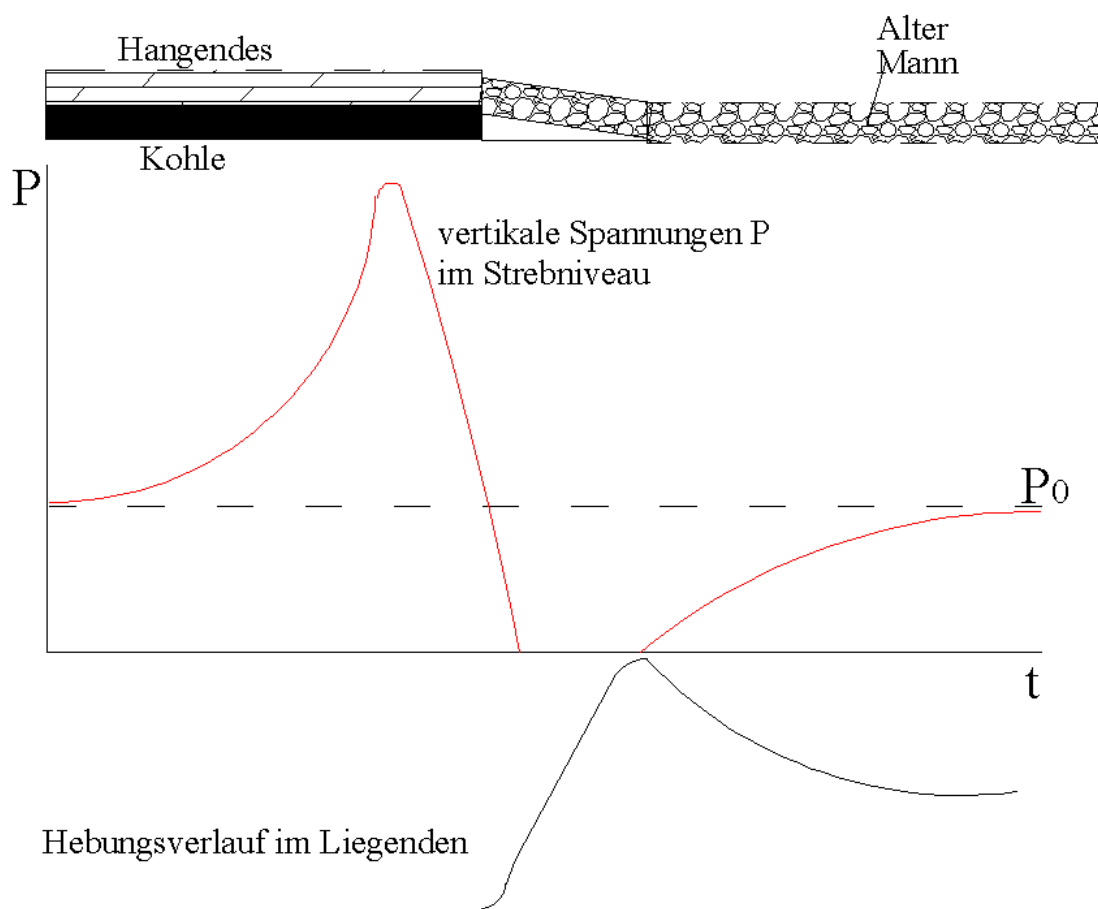


Abb. 4.21: Skizzierung der unterschiedlichen zeitlichen Abschnitte des Hebungsverlaufs im Liegenden und der vertikalen Druckverteilung im Strebniveau

Zu erkennen sind in Abbildung (4.21) drei Phasen, die mit den Phasen der vertikalen Druckverteilung im Strebniveau zusammen fallen. Die erste Phase geht bis zu dem Zeitpunkt, an dem die vertikale Spannung unter den Überlagerungsdruck  $P_0$  fällt. Ab diesem Zeitpunkt kommt es zu einer Entlastung der liegenden Schichten. Diese nimmt in der zweiten Phase, in der auch die Überbauung des Punktes fällt, weiter zu. Im Bereich

der unmittelbaren Überbauung ist auch die Hebungsgeschwindigkeit am größten. Das Hebungsmaximum wird allerdings erst nach der Überbauung erreicht. Verdichtet sich die abgebaute Bruchzone hinter dem Streb, so nehmen die vertikalen Spannungen zu und die Hebungen nehmen ab (dritte Phase). Zur Zeit ist eine abschließende Beurteilung nicht möglich, ob ein Hebungsendwert angenommen wird, oder ob es zu einer asymptotischen Annäherung an einen Endwert kommt.

Auf die zu untersuchenden Fragen lassen sich somit zur Zeit die folgenden Antworten geben:

- (1) Bisher muss von einem maximalen Hebungsbetrag ausgegangen werden, der nur von der Abbauteufe abhängt und gut 0,027% der Abbauteufe beträgt. Allerdings wurden vereinzelt um bis zu 30% höhere Werte beobachtet.
- (2) Hebungen lassen sich nicht nur in der unmittelbaren Umgebung des Abbaus nachweisen, sondern können in Abhängigkeit von der Abbauteufe auch in einigen Hundert Metern Überbauungsabstand noch gemessen werden.
- (3) Mit wachsendem Überbauungsabstand nehmen die Hebungswerte exponentiell ab.
- (4) Auch bei geringen Überbauungsabständen reichen die Hebungen weit ins Strebvorfeld.
- (5) Die Hebungen nehmen in einer Zeitspanne kurz vor der direkten Überbauung bis kurz nach der Überbauung am schnellsten zu. Bis zu einem maximalen Hebungswert vergeht eine längere Zeit. Nach Erreichen des maximalen Hebungswertes nehmen die Hebungen wieder ab. Ob ein endgültiger Hebungswert erreicht wird, kann wegen fehlender Messungen nicht beantwortet werden.

## 4.10 Mathematische Modellierung der Hebungen

In diesem Abschnitt soll ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Hebung eines Punktes im Liegenden eines laufenden Abbaus entwickelt werden. Dabei soll möglichst die gleiche mathematische Struktur verwendet werden, wie bei der Senkungsberechnung.

### Notwendige Unterschiede zur Senkungsberechnung

Die Hebungsberechnung lässt sich nicht als genaue Umkehrung der Senkungsberechnung erzielen. Dieses liegt an der exponentiellen Abnahme der Hebungsbeträge mit wachsendem Überbauungsabstand (Gleichung (4.42)). Eine Möglichkeit diesen Unterschied zu demonstrieren, liegt in der Betrachtung eines kreisförmigen Abbaus.

Nach *Sroka* und *Schober* ([Srok86], 1996) berechnet sich die Senkung mit Hilfe des sogenannten Ruhrkohleverfahrens oberhalb des Mittelpunktes eines kreisförmigen Abbaus

mit dem Radius  $r$  zu:

$$S_p(r) = aM \left[ 1 - \exp\left(-k \frac{r^2}{R^2}\right) \right] \quad (4.43)$$

$$k = -\ln 0,01$$

für  $r = R$  beträgt die Senkung  $S_p(R) = 0,99aM$

$R$  : Vollflächenradius

Wird ein immer größerer Radius  $r$  abgebaut, so nähert sich die Senkung der Endsenkung  $aM$  ( $a$ : Abbaufaktor,  $M$ : Mächtigkeit). Mit steigendem vertikalem Abstand zwischen dem Berechnungspunkt und der Abbaufäche, nimmt auch der Vollflächenradius zu. Wird dann der abgebaute Radius  $r$  vergrößert, so dass er sich wieder dem Vollflächenradius nähert, beträgt die Senkung im Berechnungspunkt erneut  $0,99aM$ . Im Unterschied dazu nehmen die Hebungen ohne Einfluss der abgebauten Fläche immer mit dem Überbauungsabstand ab. Wird ferner angenommen, dass sich die Abnahme nach Gleichung (4.42) bestimmen lässt, so kann dies nicht durch eine Regulierung des Vollflächenradius geschehen. Mit mathematischen Mitteln ist dieses zwar lösbar, aber es wäre dann  $R = R(r, z)$ . Somit wäre  $R$  eine Funktion der abgebauten Fläche, und aus physikalischer Sicht keine sinnvolle Modellierung.

### Mathematische Modellierung

Trotz der aufgezeigten Unterschiede soll aufgrund der Ähnlichkeit zwischen den Senkungs- und Hebungskurven versucht werden, die Gleichung (4.1) zu modifizieren. Ausgehend von einem in kleine Abbauelemente unterteilten Abbau, wird die endgültige Hebung durch ein Abbauelement in Bezug auf einen Punkt  $P(x, y, z)$  mittels

$$h(x, y, z) = C \cdot h_{max} \exp\left(-\pi \frac{z^2}{B^2}\right) \cdot \frac{k}{\pi} \frac{F}{R^2(z)} \exp\left(-k \frac{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}{R^2(z)}\right) \quad (4.44)$$

berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Mächtigkeit  $M$  größer als die maximale Hebung  $h_{max}$  ist.  $F$  ist die Grundfläche des Abbauelementes,  $z$  der Überbauungsabstand und  $B$  wie in Gleichung (4.42). Auf  $R(z)$  wird noch genauer eingegangen. Da einige der oben erwähnten Beispiele größere Werte für  $h_{max}$  zeigten als der theoretische Wert, wurde die obige Gleichung mit einer Konstanten  $C$  multipliziert. Es muss für jeden Einzelfall entschieden werden, ob  $C \neq 1$  gilt. Die Struktur von Gleichung (4.44) spiegelt die bekannten Ergebnisse wieder, ist aber ähnlich zu der Funktion für die Endsenkung und enthält damit auch die Analogie zu den Senkungskurven.

Die Datenlage zur horizontalen Verteilung der Hebungen ist sehr gering, so dass die Definition von  $R(z)$  auf plausiblen Annahmen beruhen muss. Aus den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts (4.9) ist bekannt, dass schon bei geringen Überbauungsabständen  $z$  die Hebungen weit im Strebvorfeld einsetzen, ähnlich wie die Senkungen des Hangenden im Abbauvorfeld (Abbildung (4.22)).

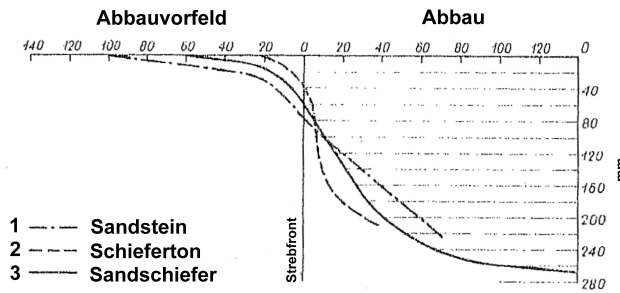


Abb. 4.22: Senkung des Hangenden im Abbauvorfeld (linker Bereich) und abgebauter Teil (rechter Bereich) nach Hoffmann für unterschiedliche Gesteine: 1. Sandstein 2. Schiefertone 3. Sandschiefer (aus *Borecki und Chudek* ([Bore72], 1972))

Deshalb wird die Annahme getroffen, dass schon im Strebenniveau Hebungen im Strebvorfeld existieren. Da auch bei der Festlegung von  $R(z)$  für die Hebungen eine Analogie zur Senkungsberechnung erfolgen soll, soll  $R(z) = R(H) \cdot f(z)$  gelten.  $R(H)$  ist dabei der für die Senkungsberechnung bestimmte Wert  $R(H) = H \cdot \cot(\gamma)$ .

Für  $f(z)$  ( $z$  Überbauungsabstand) wird folgender Ansatz gewählt, wie er z. B. in Polen, im Unterschied zu dem im Abschnitt (4.2) vorgestellten Ansatz, auch für die Berechnung des Vollflächenradius im Hangenden benutzt wird (z. B. *Drzeźła* ([Drez79], 1979)):

$$f(z) = \left( \frac{z + z_D}{H + z_D} \right)^n \quad (4.45)$$

Somit gilt für  $R(z)$ :

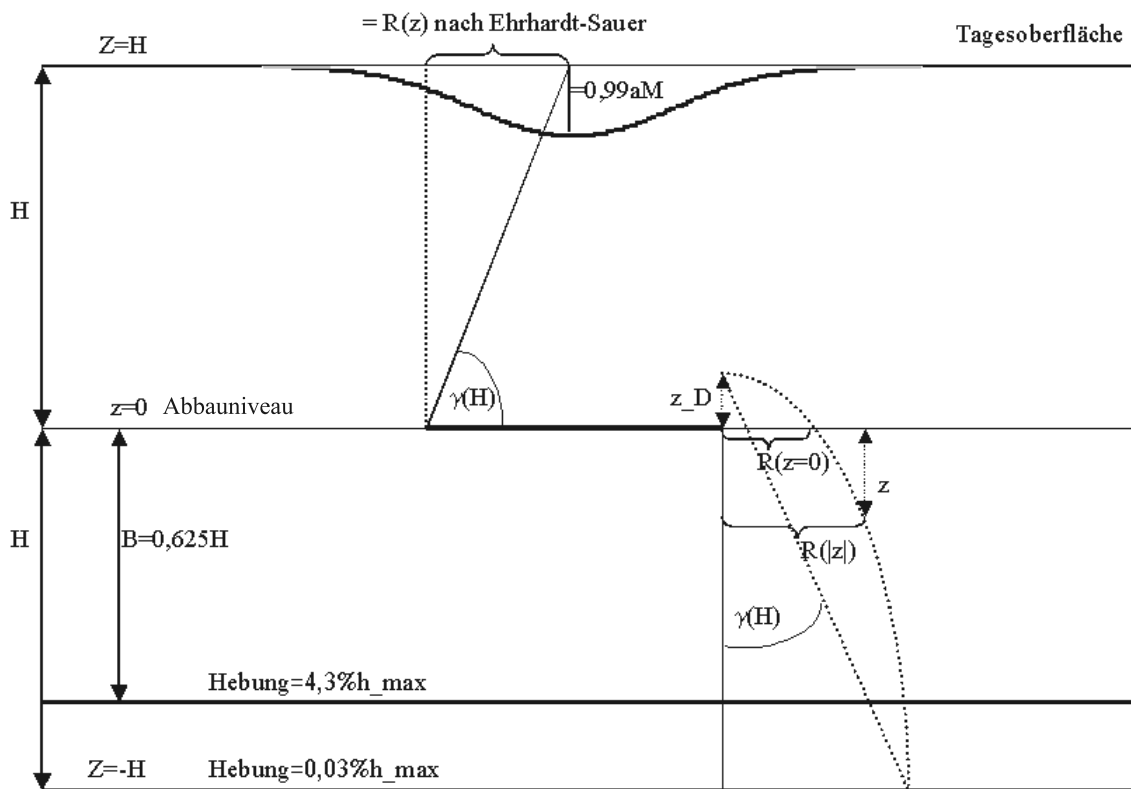
$$R(z) = R(H) \cdot \left( \frac{z + z_D}{H + z_D} \right)^n \quad (4.46)$$

$n$  ist hierbei der gleiche Gebirgsfaktor wie bei der Senkungsberechnung. Die Berechnung von  $z_D$  erfolgt nach:

$$z_D = H \cdot \frac{\left( \frac{R(z=0)}{R(H)} \right)^{\frac{1}{n}}}{1 - \left( \frac{R(z=0)}{R(H)} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (4.47)$$

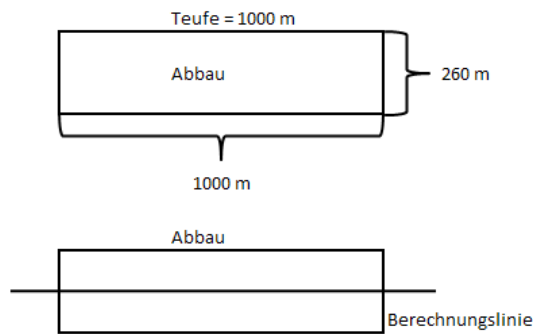
Dabei gibt  $z_D$  den gedachten vertikalen Abstand oberhalb des Abbaus an, um im Abbau-niveau schon einen Radius von  $R(z = 0) > 0 \text{ m}$  zu erhalten (vgl. Abbildung (4.23)).



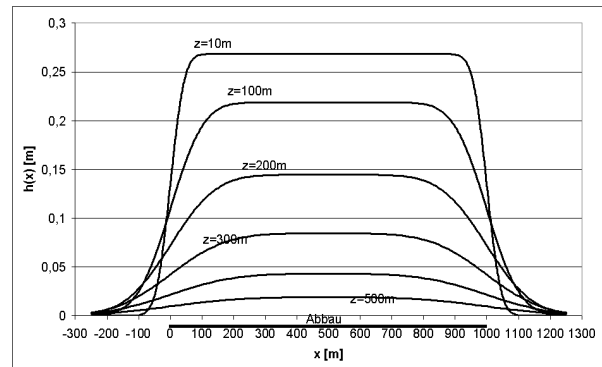

 Abb. 4.23: Ansatz für  $R(z)$  im Liegenden

### Theoretische Beispiele

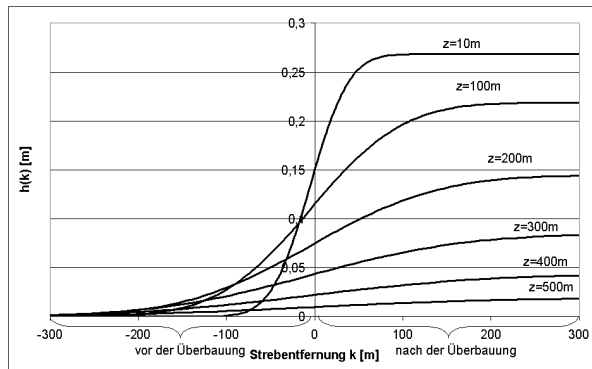
Um die Auswirkungen der oben aufgeführten Gleichungen abschätzen zu können, sollen in diesem Abschnitt zwei Beispiele aufgezeigt werden. Dazu wird ein theoretischer Abbau mit einer Tiefe von 1000 m und einer gedachten Streblänge von 260 m als Modell verwendet, der auf einer Länge von 1000 m abgebaut wird. In Abbildung (4.24(b)) ist die Hebung im Liegenden des gedachten Abbaus entlang einer Berechnungslinie dargestellt. Für einen bankparallelen Abstand von 55 m vor dem Abbau ist der qualitative Hebungsverlauf in Abhängigkeit vom Überbauungsabstand in Abbildung (4.24(d)) wiedergegeben. Zu erkennen ist in Abbildung (4.24(b)), dass die Hebungen der direkt unterhalb des Abbaus liegenden Punkte mit dem Überbauungsabstand abnimmt. Betrachtet man hingegen die Abbildung (4.24(d)), so wird deutlich, dass vor dem Abbau die Hebungen in vertikaler Richtung bei einem Überbauungsabstand von ca. 100 m für dieses Beispiel am größten sind, bevor sie stetig abnehmen. Für unterschiedliche Überbauungsabstände sind die Hebungen in Abhängigkeit von der Strebentfernung in Abbildung (4.24(c)) dargestellt.



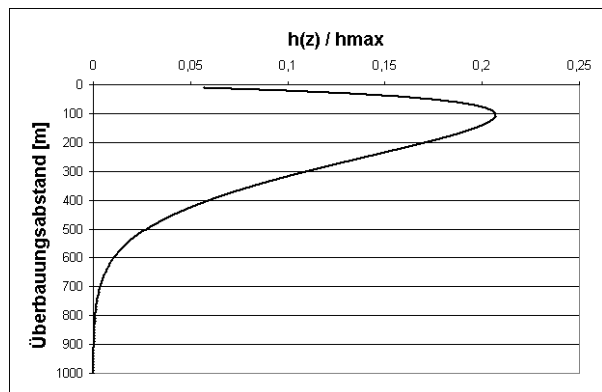
(a) Abbausituation für die theoretischen Beispiele



(b) Berechnete Hebungen entlang einer Linie



(c) Berechnete Hebungen in Abhängigkeit von der Strebenfernung

(d) Qualitativer Verlauf der maximalen Hebungen vor dem Abbau (normiert auf  $h_{max}$  für eine Tiefe von 1000 m) in Abhängigkeit vom ÜberbauungsabstandAbb. 4.24: Hebungen bei unterschiedlichen Überbauungsabständen  $z$ 

Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die Hebungen schon bei großen Strebenfernungen einsetzen. Vor der Überbauung erhält man in vertikaler Richtung ein zu Abbildung (4.24(d)) analogen Verlauf. Auch wenn bisher nur die endgültigen Hebungen betrachtet wurden, somit noch keine Zeitfunktion in die Berechnung eingeht, ist insbesondere für  $z = 10 \text{ m}$  eine hohe Hebungszunahme im Bereich der direkten Überbauung zu erkennen.

## 4.11 Hebungsrechnung anhand eines realen Beispiels

Die mathematische Modellierung beruht zum Großteil auf der Ähnlichkeit zwischen den Senkungs- und Hebungskurven wie sie in der Literatur zu finden ist. Bisher wurde das entwickelte Modell (Gleichung (4.44)) noch nicht durch Vergleiche mit Hebungsmessungen verifiziert. Dies soll in diesem Abschnitt vorgenommen werden. Dazu wird auf die Messungen von *Kirsch* ([Kirs], 1998) zurückgegriffen.

### Abbau- und Messsituation

*Kirsch* ([Kirs], 1998) stellt in seinem Artikel Messungen vor, die in einer Förderrichtstrecke unterhalb mehrerer Abbaue vorgenommen wurden. Die Abbausituation und die Lage der Förderrichtstrecke wurden in Abschnitt (4.9) in den Abbildungen (4.19) und (4.20) dargestellt. Entlang der Förderrichtstrecke wurde in 20 m Abständen gemessen. Für die nachstehenden Betrachtungen wird dabei folgende Notation verwendet: Der in Abbildung (4.20) eingezeichnete Punkt *A* entspricht in Abbildung (4.26) Punkt 1 und der Punkt *B* entspricht Punkt 14.

Messwerte wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren aufgenommen. Somit wurden auch Zeitabschnitte betrachtet, zu denen der Abbau beendet war, und eine Abnahme der Hebungen beobachtet werden konnte. Die Nullmessung erfolgte ca. 260 m vor der Überbauung. Anschließend wurden vor der Überbauung weitere 7 Messungen und nach der Überbauung noch 11 Messungen vorgenommen. In zeitlicher Nähe der Überbauung wurde wöchentlich gemessen, so dass ein gutes Bild über den Anstieg der Hebungen in diesem Bereich entstehen konnte.

In den Abbildung (4.25) und (4.26) (durchgezogene Linien) werden mehrere Eigenschaften der Hebungen deutlich. Die erwähnte hohe Hebungszunahme während der direkten Überbauungsphase ist das erste auffällige Merkmal. Als zweites ist zu erkennen, dass die Hebungen nach Erreichen des jeweiligen Maximums wieder betragsmäßig abnehmen. Drittens liegen die Maximalwerte zum Beispiel bei Abbildung (4.25(c)) über den theoretischen Werten nach Gleichung (4.40).

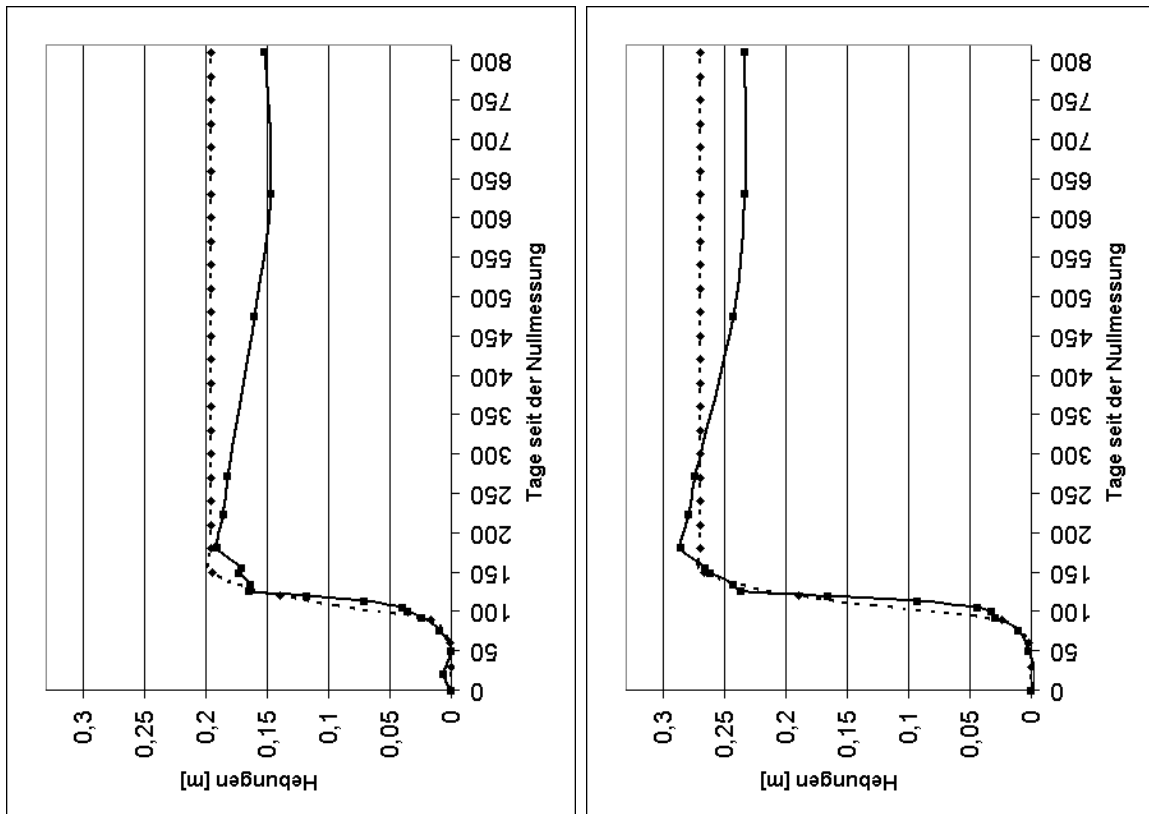
Inbesondere der zuletzt genannte Punkt muss bei der Nachberechnung beachtet werden. Dabei sollen die Parameter so gewählt werden, dass mit einem Parametersatz alle Punkte unter Verwendung von Gleichung (4.44) möglichst gut nachberechnet werden können. In dem hier verwendeten Fall wurden folgende Parameter verwendet.

$$\gamma = 60 \text{ gon}$$

$$F = 10 \text{ m} * 10 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$$

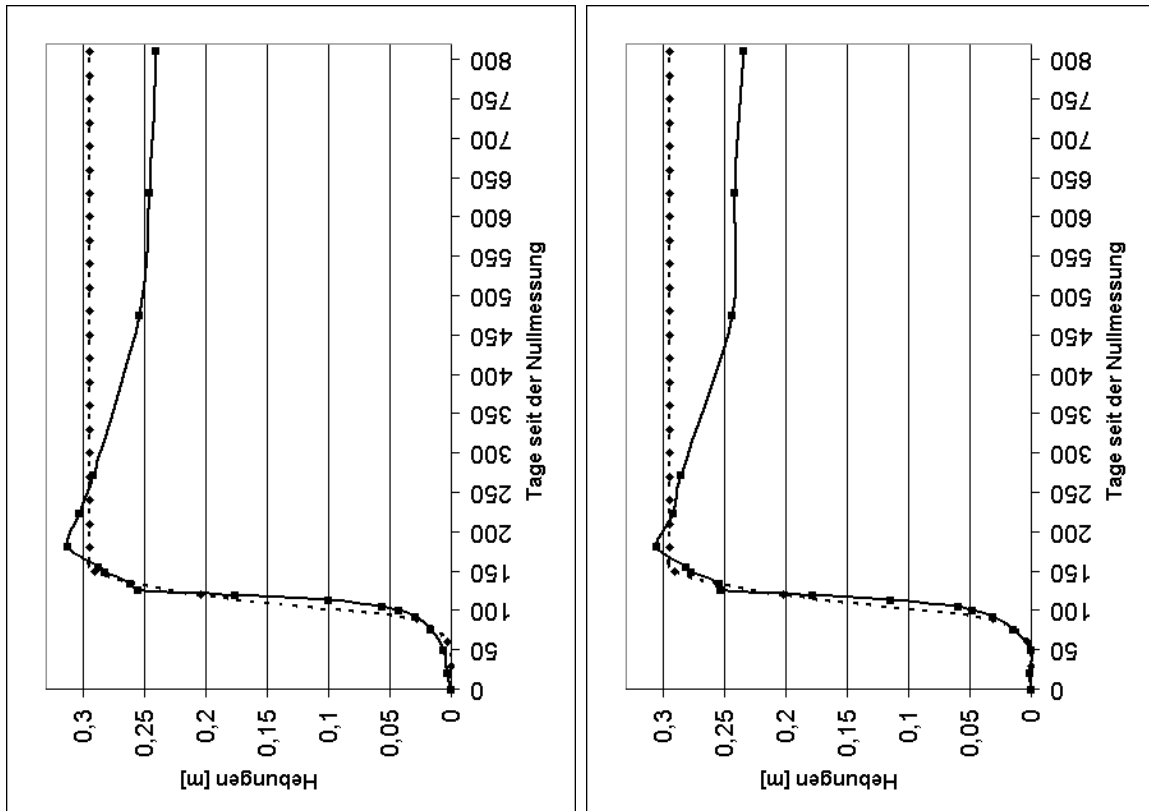
$h_{max}$  für jedes Abbauelement nach Gleichung 4.40

$$C = 1,26$$



(a) Punkt 1

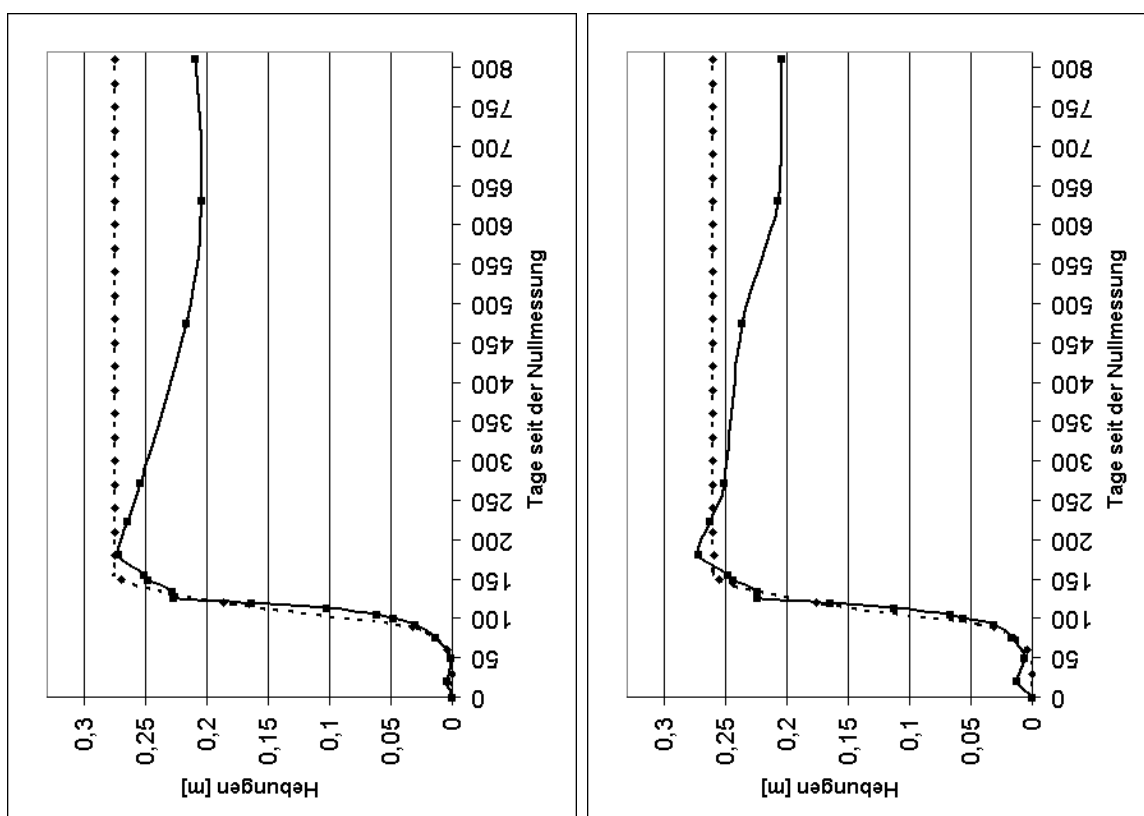
(b) Punkt 3



(c) Punkt 5

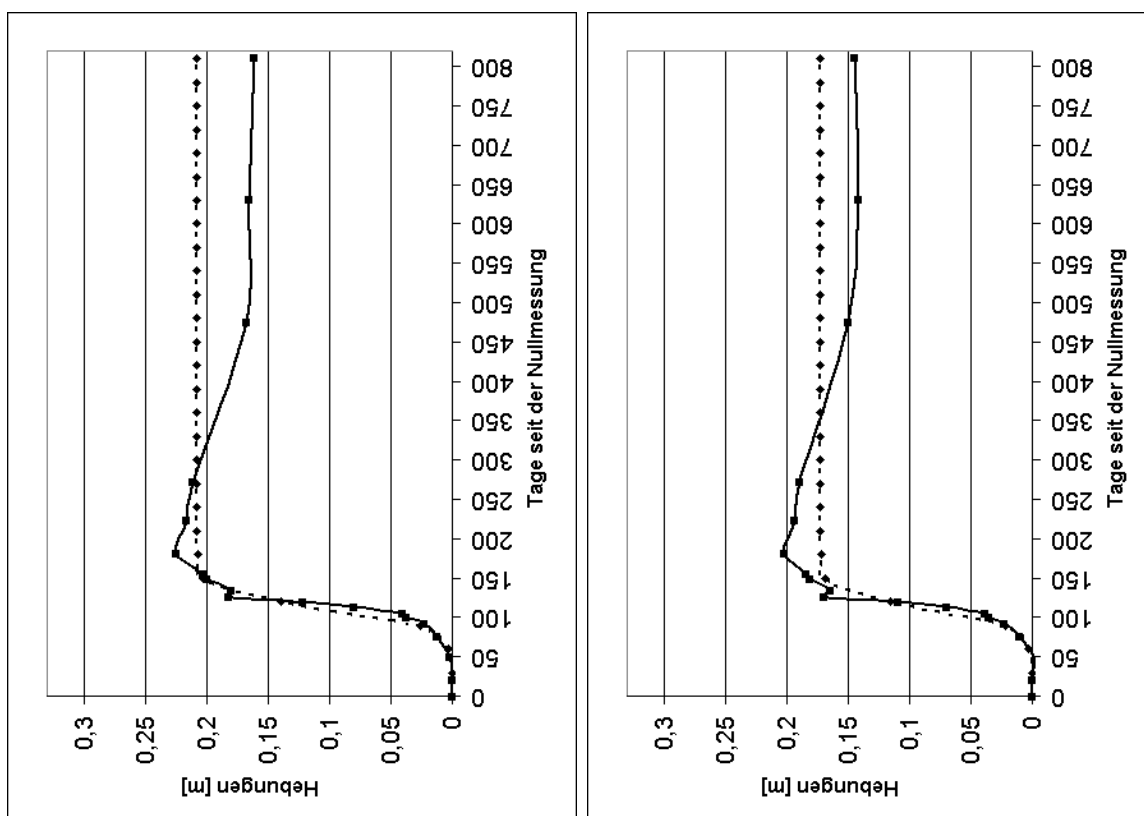
(d) Punkt 7

Abb. 4.25: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen Endhebungen (gestrichelte Linie) nach Gleichung (4.44)



(a) Punkt 10

(b) Punkt 11



(c) Punkt 13

(d) Punkt 14

Abb. 4.26: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen Endhebungen (gestrichelte Linie) nach Gleichung (4.44)

Die berechneten Kurven (gestrichelte Kurven) wurden in den Abbildungen (4.25) und (4.26) den gemessenen Werten gegenübergestellt (durchgezogene Kurven). Da keine Zeitfunktion mit in die Berechnungen einfluss, nahmen die berechneten Werte nach Erreichen des Maximalwertes nicht ab. Aus diesem Grunde ist bei den hier betrachteten Hebungen nur die Zeit bis zum Erreichen des Maximalwertes von Bedeutung. Die berechneten Kurven geben den prinzipiellen Verlauf der gemessenen Hebungskurven bis zum Erreichen des Maximalwertes wieder. Auch die hohe Hebungsgeschwindigkeit im Bereich der direkten Überbauung werden durch die theoretischen Werte modelliert. Da alle berechneten Hebungskurven mit einem Parametersatz bestimmt wurden, wird nicht bei allen Punkten der Maximalwert exakt berechnet. Bei Punkt 14 (Abbildung (4.26(d))) ist die Abweichung mit 17,3% am höchsten. An den anderen Punkten betrug sie weniger als 8,5%. Dieses deutet darauf hin, dass das aufgestellte Modell (Gleichung (4.44)) prinzipiell zur Berechnung von Hebungserscheinungen im Liegenden eines laufenden Abbaus geeignet ist. Die vorkommenden Abweichungen können in diesem Fall auf die starke Durchbbauung des Gebirges zurückgeführt werden, die es nicht ermöglichen, mit einem Parametersatz alle Punkte gleichwertig nachzurechnen.

### Hebungsberechnung mit einer Zeitfunktion

Die Modellierung der Hebungen alleine durch Verwendung der endgültigen Hebungen führt im Bereich der Überbauungen zu guten Ergebnissen. Ist allerdings der Maximalwert erreicht, so kann auf diese Weise keine Abnahme der Hebungswerte erreicht werden. Mittels Einführen einer Zeitfunktion  $f_{Heb}(t)$  soll auch die Abnahme modelliert werden können. Hierbei wird das gleiche Prinzip angewendet wie bei der Senkungsberechnung in Abschnitt (4.9), so dass jedes Abbauelement mit der Zeitfunktion multipliziert wird.

Die Zeitfunktion muss die in Abbildung (4.21) dargestellten Phasen wiedergeben. Dazu wird eine mehrparametrische Zeitfunktion pro Abbauelement verwendet.

$$f_{Heb}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t - t_0 < 0 \\ 1 - \exp\left(-\left(c_1(t - t_0)\right)^{m_1}\right) & \text{für } 0 < t - t_0 < \tilde{t} \\ \left[1 - \exp\left(-\left(c_1(t - t_0)\right)^{m_1}\right)\right] \cdot C_2 \cdot \exp\left(\frac{1}{c_2(t - t_0)}\right)^{m_2} & \text{für } t - t_0 \geq \tilde{t} \end{cases} \quad (4.48)$$

Hierbei ist  $t_0$  die Zeit, zu der das jeweilige Element abgebaut wird. Ab dem Zeitpunkt  $\tilde{t}$  haben sich genügend vertikale Spannungen aufgebaut, um einen Einfluss auf die Hebungsgeschwindigkeit zu haben. Bis zur Zeit  $\tilde{t}$  wird die gleiche Zeitfunktion verwendet wie bei der Senkungsberechnung. Die beiden Parameter  $m_1$  und  $c_1$  erlauben eine Anpassung auch für die Hebungsberechnung. Für die Zeit größer  $\tilde{t}$  ist der eigentliche Hebungsprozess noch nicht abgeschlossen. Die vertikalen Spannungen bewirken aber eine den Hebungen entgegengerichtete Komponente. Dieses wird durch Multiplizieren mit einer weiteren Funktion berücksichtigt. Gleichung (4.9) gilt auch für  $c_1$  und  $c_2$  wobei  $z$  gleich dem Überbauungsabstand ist.

Mit den nachstehenden Parametern für die Zeitfunktion wurden an den gleichen Punk-

ten wie für die Endhebungen die Hebungskurven berechnet.

$$\begin{aligned}c_1 &= 16,57 \frac{1}{\text{Jahr}} \\m_1 &= 150,5 \\c_2 &= 2,12 \frac{1}{\text{Jahr}} \\m_2 &= 1,06 \\C_2 &= 0,75 \\\tilde{t} &= 125 \text{ Tage}\end{aligned}$$

Bei einem mittleren Teufe von  $\bar{H} \approx 920 \text{ m}$  und einem Überbauungsabstand von ca.  $z \approx 40 \text{ m}$  gilt  $c_1(40 \text{ m}) \approx 79,47 \frac{1}{\text{Jahr}}$  und  $c_2(40 \text{ m}) \approx 10,17 \frac{1}{\text{Jahr}}$ . Somit gilt schon nach vier Tagen:

$$1 - \exp\left(-\left(c_1(t - t_0)\right)^{m_1}\right) \approx 1$$

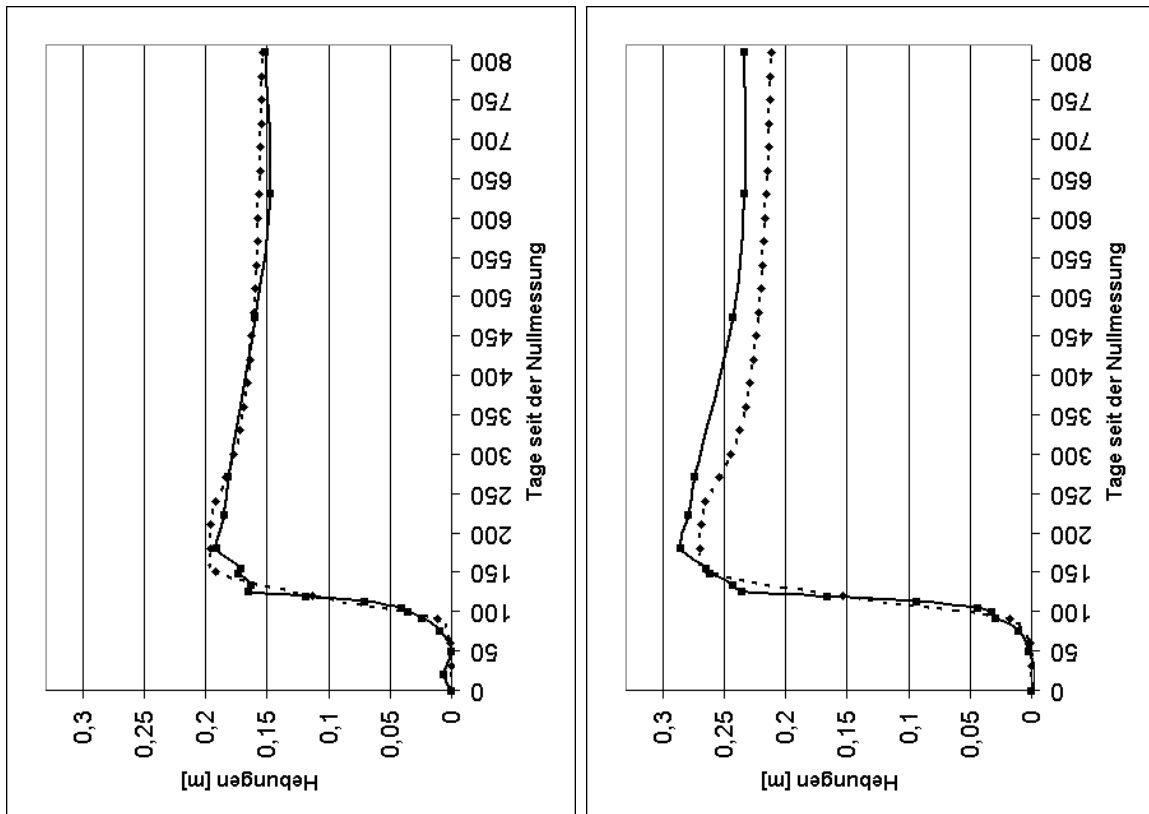
Für die Zeitfunktion  $f_{Heb}(t)$  ergibt sich dann:

$$f_{Heb}(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t - t_0 < 0 \\ 1 & \text{für } 0 < t - t_0 < \tilde{t} \\ C_2 \cdot \exp\left(\frac{1}{c_2(t-t_0)}\right)^{m_2} & \text{für } t - t_0 \geq \tilde{t} \end{cases} \quad (4.49)$$

In den Abbildungen (4.27) und (4.28) sind den berechneten Kurven (gestrichelte Linie) die gemessenen Werte (durchgezogene Linie) gegenübergestellt.

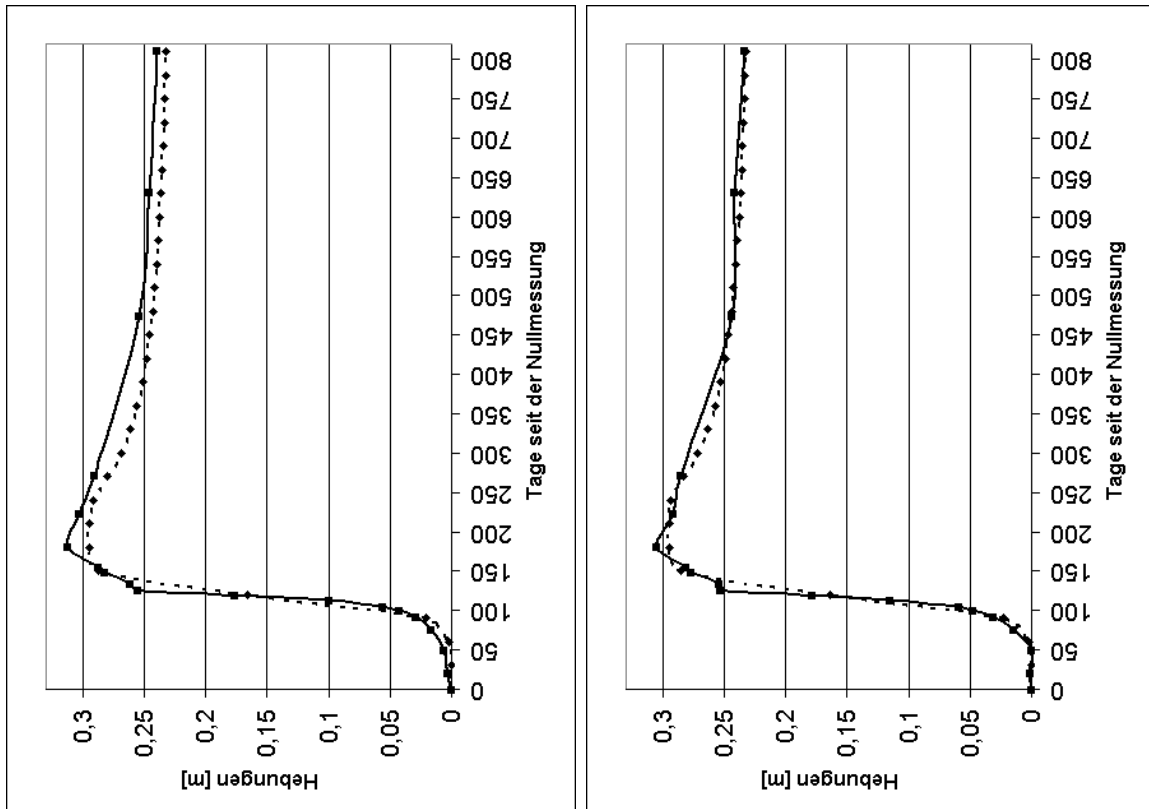
Die berechneten Kurven geben dabei den Verlauf der Zeit-Hebungskurven wieder. Dieses gilt sowohl für den Bereich der direkten Überbauung, für den Maximalwert als auch für das Abklingen der Hebungen nach Erreichen des Maximalwertes. Abweichungen sind allerdings zum Beispiel bei Punkt (4.28(b)) im Bereiche der Hebungsabnahme zu erkennen. An diesem Punkt verringert sich die Geschwindigkeit in der Abnahme der Hebungswerte, um nach einigen Hundert Metern Strebentfernung erneut zu steigen. Im weiteren zeitlichen Verlauf nähern sich die berechneten und gemessenen Werte wieder an.

Aufgrund der Gültigkeit von Gleichung (4.49) besteht zwischen den Kurven mit der Zeitfunktion bzw. ohne Zeitfunktion kein Unterschied bis zum Erreichen des Maximalwertes. Allerdings kann nur unter Verwendung der Zeitfunktion die Abnahme der Hebungswerte modelliert werden.



(a) Punkt 1

(b) Punkt 3

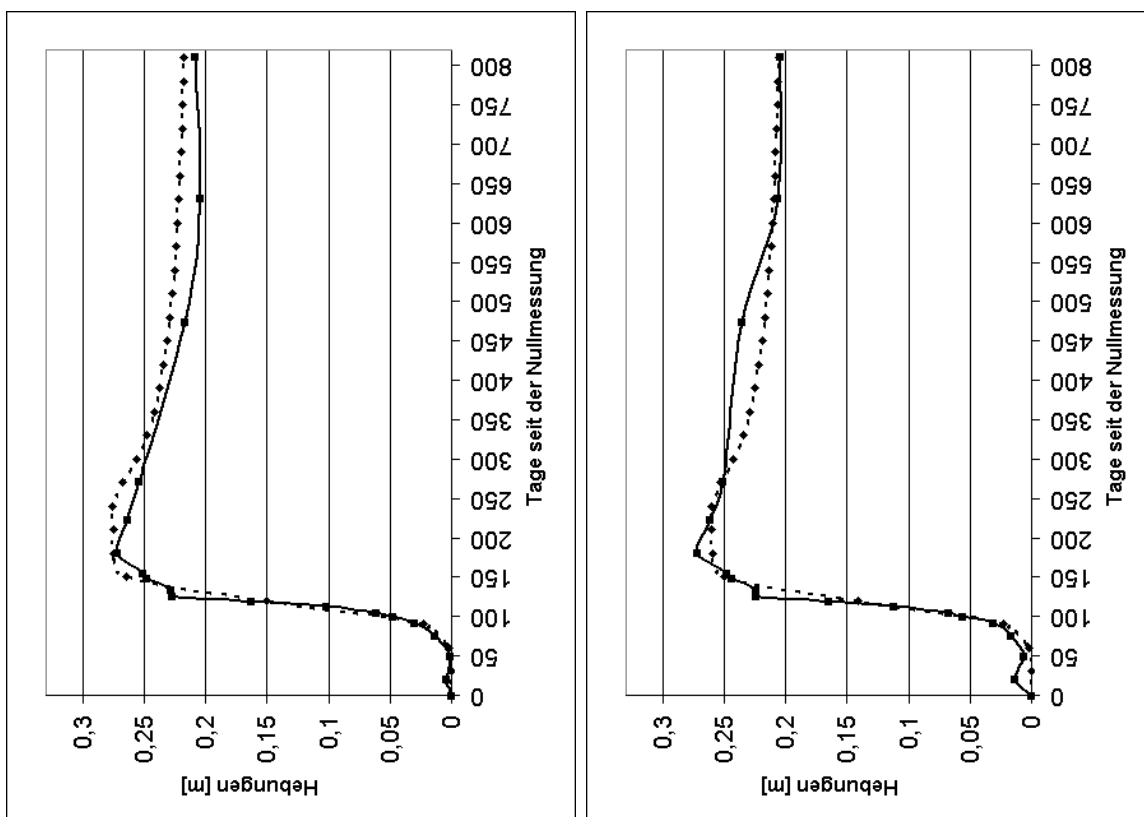


(c) Punkt 5

(d) Punkt 7

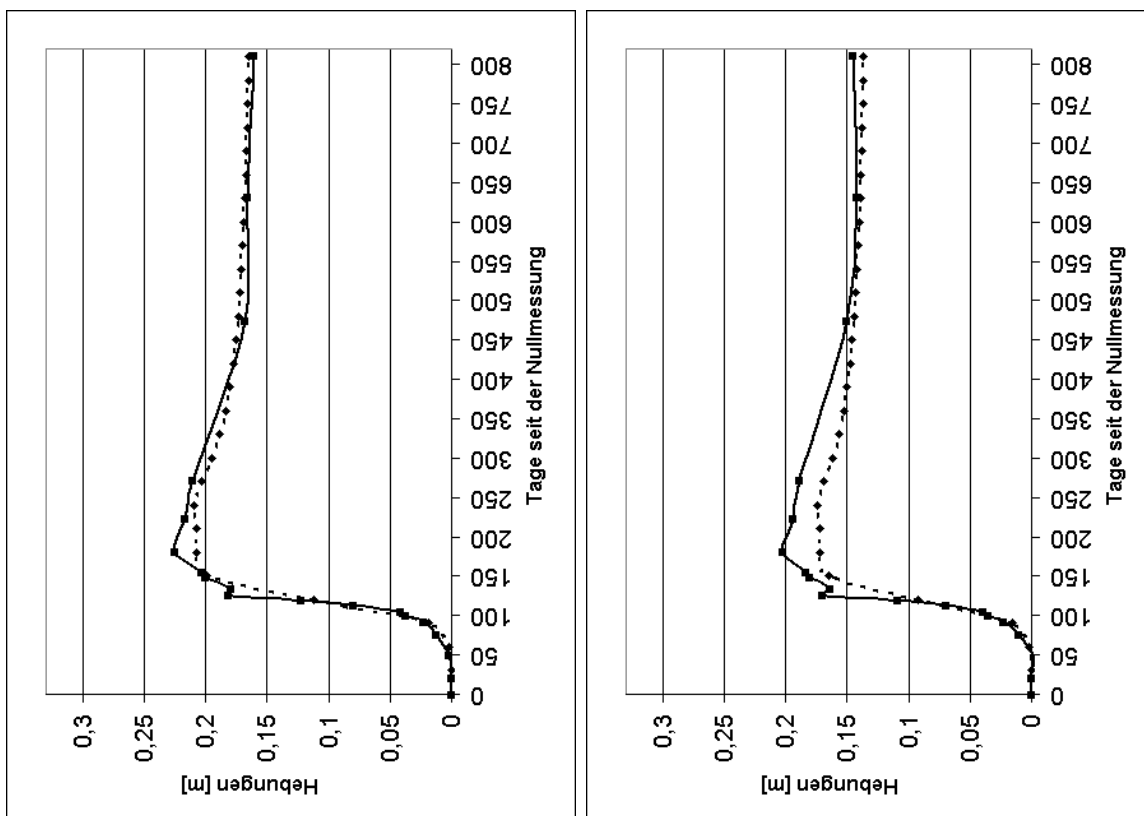
Abb. 4.27: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretischen dynamische Hebungen (gestrichelte Linie)





(a) Punkt 10

(b) Punkt 11



(c) Punkt 13

(d) Punkt 14

Abb. 4.28: Gegenüberstellung der Messwerte (durchgezogene Linie) zu den theoretische dynamische Hebungen (gestrichelte Linie)

# 5 Deformationskennziffern und bergbauinduzierte Ereignisse

Die Grundlagen für ein Prognosemodell bergbauinduzierter Ereignisse, das auf Gebirgsbewegungen sowohl im Liegenden als auch im Hangenden beruht, wurde mit der Einführung eines dynamischen Senkungs- und Hebungsmodells im vorherigen Kapitel dargelegt.

In diesem Kapitel soll in einem ersten Abschnitt anhand eines Beispiels aus dem östlichen Ruhrgebiet die Anwendbarkeit des in Abschnitt (3.3) vorgestellten Prognosemodells überprüft werden, indem die dort verwendeten Indizes mit dem modifizierten Bewegungsmodell bestimmt werden. In einem nachfolgenden Abschnitt werden weitere Zusammenhänge zwischen seismischen Ereignissen und aus den Gebirgsbewegungen berechneten Werten aufgezeigt.

## 5.1 Anwendung auf ein bestehendes Prognosemodell

Das in Abschnitt (3.3) vorgestellte Prognosemodell wurde im polnischen Steinkohlenbergbau erfolgreich eingesetzt. *Fritschen* ([Frit], 2001) hat in seiner Dissertation einen von *Drzęźła et al.* ([Drez99], 1999) untersuchten Messfall (BW Ost) verwendet, für den sich die Ereignisanzahl quantitativ gut für zwei kommende Zeitabschnitte prognostizieren lässt. Nach den zwei Zeitabschnitten wurde zwar eine Abnahme der Ereignisanzahl berechnet, diese fiel aber wesentlich geringer aus als die tatsächlich beobachtete Abnahme (Abbildung (3.1)). Aufgrund der vorhandenen Datenlage wurden bei *Fritschen* Zeitintervalle von einer Woche betrachtet. Die seismische Energie konnte dabei nicht gut prognostiziert werden. Ein Grund dafür wurde in den nur monatlich vorliegenden Strebständen gesehen. In diesem Abschnitt wird die Bauhöhe S704 im Flöz Sonnenschein des Bergwerks Ost untersucht, für die tägliche Abbaufortschritte an 326 Tagen vorlagen. Dabei wurde die Bauhöhe auf einer Länge von ca. 1000 m von Süd-West nach Nord-Ost abgebaut. Die Streblänge betrug 265 m bei einer konstant angenommenen gebauten Flözmächtigkeit von 2,37 m in einer mittleren Teufe von 1110 m.

An den 326 Tagen wurden insgesamt 502 Erschütterungen, die der betrachteten Bauhöhe zugeordnet werden konnten, registriert. 30 Ereignisse hatten eine seismische Energie von über  $10^7 J$ , wobei das stärkste Ereignis eine seismische Energie von  $3,9 \cdot 10^7 J$  besaß. 21 dieser starken Ereignisse fielen in die ersten beiden Monate des Abbaus.

Der betrachtete Abbau lag in stark durchbautem Gebirge. Die Berechnungen gingen von der Annahme aus, dass insbesondere zwei Altabbau im Flöz Dickebank ca. 60 m oberhalb des analysierten Abbaus für die Erschütterungssituation von Bedeutung waren. Die Abbausituation ist in Abbildung (5.1) dargestellt, wobei die Altabbau rot umrandet sind und die Bauhöhe S704 blau. Auffällig ist, dass der Teil oberhalb der Bauhöhe S704 im Flöz Dickebank nicht abgebaut worden ist. Die in der selben Abbildung durch Kreuze dargestellten georteten Ereignisse liegen zum Teil südwestlich des Abbaus, was auf den Einfluss der vorhandenen Restfeste schließen lässt, die sich auf dieses Gebiet ausdehnt.

Hierfür spricht auch, dass zu Abbaubeginn 21 der 30 starken seismischen Ereignisse auftraten. Es ist anzunehmen, dass sich der erschütterungsfähige Horizont zwischen dem betrachteten Abbau und einem nicht skizzierten Altabbau oberhalb von 60 m befindet. Die in Abbildung (5.1) zu erkennende Verlagerung der Ereignisorte entlang einer gedachten Linie kann nicht eindeutig geklärt werden. Auffällig ist allerdings die fast parallel dazu verlaufende Abbaukante des in der Abbildung unteren Altabbaus.

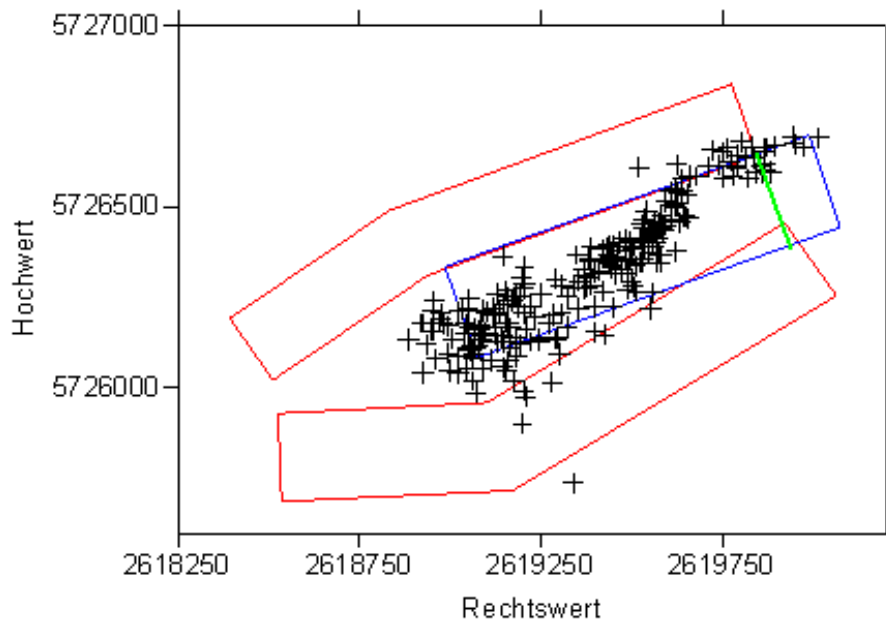
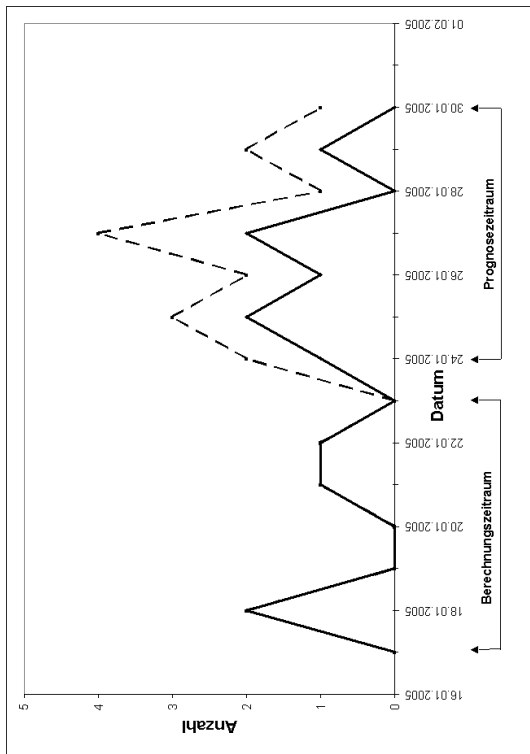


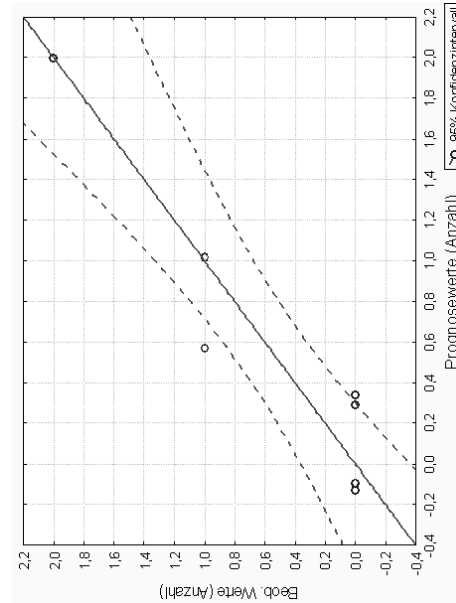
Abb. 5.1: BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704 (blau) und Altabbau im Flöz Dickebank (rot) sowie der georteten Ereignisse (weitere Beschreibung im Text)

### Prognose der Anzahl und seismischen Energie nach Abschnitt (3.3)

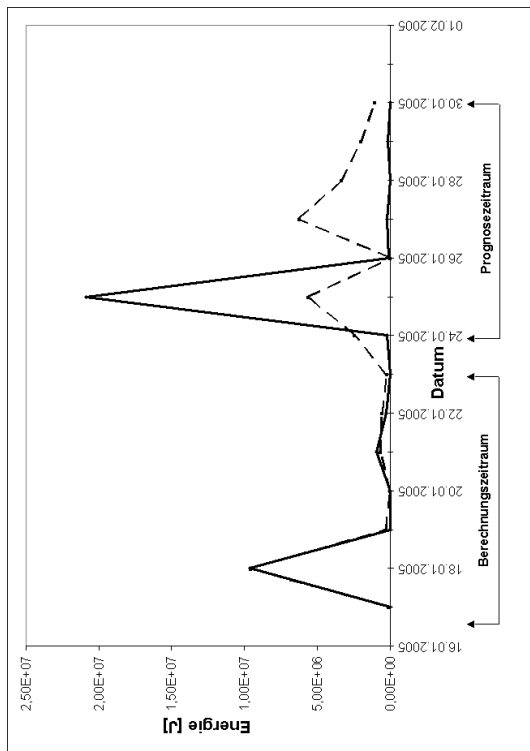
Um das Prognosemodell aus Abschnitt (3.3) anzuwenden, wurden die Gebirgsbewegungen an 366 Berechnungspunkten ermittelt. Bei einer Wahl der Punkte 85 m oberhalb des Abbaus, somit in einem Bereich in dem die Ereignisse vermuten werden können, ergaben sich die besten Ergebnisse. Mit den berechneten Werten konnten anschließend die Indizes nach Gleichung (3.21) bestimmt werden. Da nur innerhalb einer Gebirgsschicht gerechnet wurde, gleichen sich die Werte des linearen (Gleichung (3.22)) und nicht linearen Modells (Gleichung (3.23)). Mittels Gleichung (3.22) können auch negative bzw. nicht ganzzahlige Werte ermittelt werden. Von daher wurden die Werte auf ganze Zahlen gerundet und negative Werte zu Null gesetzt. Die Anwendung des Modells sollte zeigen, ob bei täglich vorliegenden Abbaudaten eine Prognose schon für kurze Berechnungszeiträume möglich ist. Dazu wurden über einen Zeitraum von sieben Tagen die Indizes berechnet, mit denen für die folgenden sieben Tage eine Prognose erstellt werden konnte. Als ein Beispiel sind die Ergebnisse eines vierzehntägigen Zeitraums in Abbildung (5.2) den beobachteten Werten gegenübergestellt. Dabei gibt die durchgezogene Linie die beobachteten Werte und die gestrichelte Linie die berechneten Werte wieder. Ferner sind die Konfidenzintervalle der Regressionsgeraden für den Berechnungszeitraum dargestellt. Der betrachtete Zeitraum lag gegen Ende des Abbaus, wobei der zugehörige Strebstand zu Beginn der Prognose in Abbildung (5.1) als grüne Linie ersichtlich ist.



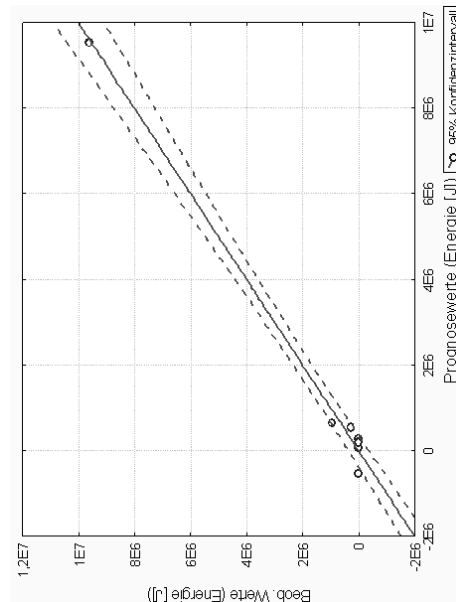
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 5.2: Prognose der Anzahl und der seismischen Energie nach Abschnitt(3.3) sowie den 95% Konfidenzintervallen für die Regressionsgerade - durchgezogene Linie: beobachtete Werte, gestrichelte Linie: berechnete Werte (BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704)

Die Abbildung (5.2(a)) zeigt die Prognosewerte für die Ereignisanzahl gegenüber den beobachteten Werten. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der gerundeten Regression, die in diesem Beispiel mit den beobachteten Werten übereinstimmen, dargestellt. In Abbildung (5.2(b)) sind kleine Abweichungen bei der Regression zu erkennen, wenn nicht gerundet wird und die Werte nur nach Gleichung (3.22) bestimmt werden.

An den Prognosewerten ist auffällig, dass sie an allen Tagen größer als die beobachteten Werten sind. Die Abweichungen betragen maximal zwei Ereignisse, was aber einer hundertprozentigen Abweichung entspricht. Die Tendenz wird hingegen sehr gut wiedergegeben.

Die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den aus der Regression bestimmten Werten ist auch bei der seismischen Energie in Abbildung (5.2(c)) und (5.2(d)) für den Berechnungszeitraum zu erkennen. Größere Abweichungen sind im Gegensatz dazu bei der Prognose der seismischen Energie zu bemerken. Ein Maximum am zweiten Prognosetag wird zwar angenommen, ist indes deutlich geringer als das beobachtete Maximum. Am dritten Tag stimmen die Daten nahezu überein, um für die letzten drei Prognosetage zu divergieren. Eine grundsätzliche Übereinstimmung in der Tendenz ist ebenfalls nicht festzustellen.

Ähnlich wie bei *Fritschen* ([Frit], 2001) kann aus dem betrachteten Beispiel die Folgerung gezogen werden, dass sich die seismische Energie nur unzureichend bestimmen lässt. Der Übergang zu einer täglichen Betrachtung brachte hierbei keine Verbesserung. Für die Vorhersage der Anzahl ist das Bild differenzierter. Die Ereignisanzahl wird in dem Beispiel nicht exakt vorhergesagt, dagegen ist aber eine sehr gute Übereinstimmung mit den registrierten Werte in der Tendenz zu erkennen. Zusammen mit den Ergebnissen von *Fritschen* kann vermutet werden, dass sich die Ereignisanzahl bei einer hohen Stationsdichte gut prognostizieren lässt, die seismische Energie nicht. Ein Grund kann darin liegen, dass ein seismisches Ereignis mit einer hohen Energie mehr von der durchschnittlichen Energie abweicht als ein zusätzliches Ereignis von der durchschnittlichen Ereignisanzahl. Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass für andere Zeiträume schlechtere Ergebnisse auch für die Ereignisanzahl ermittelt wurden, das heißt sehr große Abweichungen zwischen den beobachteten und den berechneten Werten bestanden.

## 5.2 Weitere Zusammenhänge

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob zwischen weiteren Gebirgsbewegungen oder daraus ableitbarer Kennziffern und dem Auftreten seismischer Ereignisse ein Zusammenhang besteht. Nach Kapitel (2) kann ein enger Zusammenhang zwischen Gebirgsspannungen und den seismischen Ereignissen vermutet werden, so dass sich die Untersuchungen auf die vertikalen Spannungen konzentrieren. Dazu werden ähnlich dem oben angewandten Verfahren Indizes definiert, über die mittels einer Regressionsrechnung Parameter für eine Prognose bestimmt werden.

### Betrachtete Berechnungspunkte

Die Ergebnisse aus Kapitel (2) lassen darauf schließen, dass die seismischen Ereignisse in Deutschland alle in einer nahen Umgebung zum Streb stattfinden. Die Umgebung kann dabei bis zu 200 m betragen. Da die Berechnungspunkte nur an diskreten Stellen

existieren, soll im Folgenden erklärt werden, wie die relevanten Punkte pro Strebstand festgelegt werden.

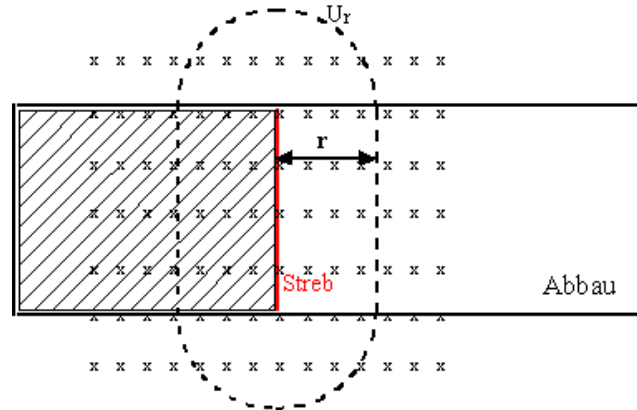


Abb. 5.3: Streb (rot) und Bereich  $U_r$  für die relevanten Berechnungspunkte mit Abstand  $r$

Die Strebstände sind für jeden betrachteten Zeitpunkt bekannt oder können berechnet werden. Da die Koordinaten der Berechnungspunkte ebenfalls bekannt sind, kann über eine Abstandsberechnung festgestellt werden, ob sich der Punkt in einer Entfernung von höchstens  $r$  vom Streb befindet. Dieses ist in Abbildung (5.3) skizziert. Alle Punkte, die innerhalb des gestrichelt umrandeten Bereichs  $U_r$  liegen, werden für die Berechnungen zu dem betrachteten Zeitpunkt miteinbezogen. Wird mehr als ein Abbau untersucht, so wird um jeden Abbau eine Umgebung  $U_{r_i}$  mit Abstand  $r_i$  betrachtet, und alle Punkte ausgewählt, die in mindestens einer dieser Umgebungen liegen. Fällt ein Punkt in mehr als eine dieser Umgebungen, so wird er nur einmal verwendet.

### 5.2.1 Festlegung der verwendeten Indizes

In diesem Abschnitt werden auf den vertikalen Zusatzspannungen basierende Indizes eingeführt. Hierbei wird eine ähnliche Vorgehensweise angewandt wie in Abschnitt (3.3). Dazu werden die Werte der Altbaue und die Werte des aktuell laufenden Abbaus getrennt betrachtet und anschließend geeignet miteinander verknüpft. Die Berechnungen der vertikalen Zusatzspannungen bzw. Spannungen erfolgt wie in Abschnitt (4.6) erläutert.

Für jeden betrachteten Zeitpunkt  $i$  werden die Indizes einzeln berechnet. Dazu wird der Strebstand bestimmt und die Berechnungspunkte gesucht, die sich innerhalb einer  $r$ -Umgebung  $U_r$  um den Streb befinden. Sei nun mit  $p_{zz,j}^A$  der Wert der vertikalen Spannungen am Berechnungspunkt  $j$  bezeichnet, der sich durch die Altbaue  $A$  und den Spannungen  $z\bar{\rho}_0g$  aufgrund des überlagernden Gebirges ergibt. Bei den Altbaue wird davon ausgegangen, dass die Werte für alle Zeitpunkte konstant sind, folglich die Endsenkung bzw. Endhebungen praktisch erreicht sind. Mit  $\dot{p}_{zz,j,i}$  werde ferner die zeitliche Änderung zum Zeitpunkt  $i$  der durch die aktuellen Abbaue induzierten Zusatzspannungen bezeichnet. Somit gilt  $\dot{p}_{zz,j,i} = \frac{p_{zz,j,i} - p_{zz,j,i-1}}{\Delta t}$  bzw. wird  $\dot{p}_{zz,j,1} = 0$  gesetzt. Sei weiter  $V_i$  das seit dem vorherigen Zeitpunkt abgebaute Volumen bzw. der Abbaufortschritt, dann

werden die Indizes  $d_i$  zu jedem Zeitpunkt  $i$  wie folgt definiert:

$$d_i = V_i \cdot \sum_j \tilde{d}_{i,j} \quad (5.1)$$

mit

$$\tilde{d}_{i,j} = \begin{cases} \dot{p}_{zz,j,i} \cdot p_{zz,j}^A & \text{für } \dot{p}_{zz,j,i} < \varepsilon_1, p_{zz,j}^A < \varepsilon_2 \text{ und } j \in U_r \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.2)$$

Hierbei sind  $\varepsilon_1 \leq 0$  und  $\varepsilon_2 \leq 0$  zwei Schwellenwerte, über die die Indizes noch beeinflusst werden können. Weil  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  erst bei der Berechnung der Indizes verwendet werden, haben sie auf die Ergebnisse aus dem Gebirgsbewegungsmodell keinen Einfluss.  $\varepsilon_1$  drückt aus, dass nur die Werte in die weitere Berechnung einfließen, für die eine durch  $\varepsilon_1$  festgelegte Zunahme der vertikalen Spannungen pro Zeitintervall  $\Delta t$  an den einzelnen Punkten erfolgt. Zusätzlich müssen an diesen Punkten schon vertikale Spannungen aufgrund der Abtabbaue vorliegen, die durch  $\varepsilon_1$  festgelegt sind. In den Indizes  $d_i$  (Gleichung (5.1)) geht der Abbaufortschritt direkt ein, aber auch die  $\tilde{d}_{i,j}$  sind schon indirekt vom Abbaufortschritt abhängig.  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  und  $r$  sind so zu wählen, dass sich für den Berechnungszeitraum ein möglichst guter empirischer Korrelationskoeffizient berechnet. Im Unterschied zu dem in Polen verwendeten Verfahren, wird für jeden Zeitpunkt  $i$  nur ein Index definiert. Darüber hinaus wird der Abbaufortschritt explizit in den Berechnungen verwendet. Die Untersuchungen der Stillstandszeiten sowie die Zusammenhänge zwischen dem Volumen und der Energie wie sie in Kapitel (2) gezeigt wurden, geben die Begründung für dieses Vorgehen.

### Empirischer Korrelationskoeffizient

Um den Zusammenhang zwischen den Indizes (5.1) und den beobachteten Werten wie der seismischen Energie bzw. der registrierten Anzahl an Erschütterungen zu bewerten, wird im Folgenden der empirische Korrelationskoeffizient bestimmt. Für die Definition des empirischen Korrelationskoeffizienten wird von zwei eindimensionalen Stichproben  $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ ,  $i = 1, 2$  ausgegangen, mit denen sich die folgende Definition ergibt (*Bosch* ([Bosc], S. 133, 2000)):

$$r = r(x_1, x_2) = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{2j} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)^2\right) \left(\sum_{j=1}^n (x_{2j} - \bar{x}_2)^2\right)}} \quad (5.3)$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^n x_{1j}x_{2j} - n\bar{x}_1\bar{x}_2}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n x_{1j}^2 - n\bar{x}_1^2\right) \left(\sum_{j=1}^n x_{2j}^2 - n\bar{x}_2^2\right)}} \quad (5.4)$$

mit den Mittelwerten

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad i = 1, 2 \quad (5.5)$$

Für den Korrelationskoeffizienten gilt  $-1 \leq r \leq 1$ . Ist  $r = -1$  oder  $r = 1$  so besteht zwischen  $x_{1j}$  und  $x_{2j}$  mit  $j = 1, \dots, n$  eine lineare Beziehung der Form  $x_{2j} = ax_{1j} + b$ .

### Empirische Regressionsgerade

Gibt der Korrelationskoeffizient (5.4) Hinweise darauf, dass ein linearer Zusammenhang zwischen  $x_1$  und  $x_2$  existiert, so kann versucht werden, eine Gerade anzupassen, die diesen linearen Zusammenhang bestmöglich beschreibt. Durch die erhaltene Geradenvorschrift können Näherungswerte für  $x_{2i}$  berechnet werden. Die Bestimmung der Steigung  $a$  und des Achsenabschnitts  $b$  geschieht mit der Methode der kleinsten Quadrate. Hierbei werden  $a$  und  $b$  so bestimmt, dass (*Hartung* ([Hart], S. 574 / 75, 1989))

$$S^2 = \sum_{j=1}^n (x_{2j} - ax_{1j} - b)^2$$

minimal wird. Dazu müssen die ersten partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial S^2}{\partial b} = -2 \sum_{j=1}^n (x_{2j} - ax_{1j} - b)$$

$$\frac{\partial S^2}{\partial a} = -2 \sum_{j=1}^n x_{1j} (x_{2j} - ax_{1j} - b)$$

gleich Null werden. Die Lösung berechnet sich zu:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{2j} - \bar{x}_2)}{\sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)^2}$$

und

$$b = \bar{x}_2 - a\bar{x}_1$$

Für die Regressionsgerade erhält man  $\tilde{x}_2 = ax_1 + b$ , wobei  $\tilde{x}_2$  die Näherungswerte für  $x_2$  sind. Das Bestimmtheitsmaß  $B_{x_2, x_1}$  der Regression (*Hartung* ([Hart], S. 579, 1989)) ist ein Wert für die Qualität der Regressionsgeraden von  $x_2$  auf  $x_1$ . Im Falle der linearen Regression ist  $B_{x_2, x_1} = r^2$ . Falls  $B_{x_2, x_1} = 1$  ist, ist eine optimale Angleichung erreicht, allgemein ist  $0 \leq B_{x_2, x_1} \leq 1$ .

## 5.3 Anwendung auf verschiedene Messfälle

Für die erste Anwendung wird die Bauhöhe S704 (BW Ost, Flöz Sonnenschein) aus Abschnitt (5.1) betrachtet. Da die Abbaufortschritte für die Bauhöhe täglich vorlagen, wurden die Indizes täglich berechnet. Abweichend zu der Anwendung mit dem polnischen Prognosemodell wurden die Berechnungen an Punkten in einem vertikalen Abstand von 25 m im Hangenden des laufenden Abbaus vorgenommen. Die Punkte befanden sich damit im Liegenden der Altabbau, so dass für die Altabbau Hebungen berechnet werden mussten. Die Bestimmung der Indizes erfolgte mit  $\varepsilon_1 = 0 \text{ MPa/d}$  und  $\varepsilon_2 = 0 \text{ MPa}$ , wobei alle Punkte berücksichtigt wurden, die innerhalb einer Umgebung von 150 m um den jeweiligen Strebstand lagen. Für die folgenden Betrachtungen wurden zusätzlich die Indizes von drei aufeinanderfolgenden Tagen addiert, d. h. die Indizes der Tage 10.05.2004 bis 12.05.2004, anschließend 13.05.2004 bis 15.05.2004 usw. wurden zusammengefasst. Das



Gleiche geschah für die Ereignisanzahl. Anschließend konnte der empirische Korrelationskoeffizient ermittelt werden, dessen Bestimmung mit jeweils 11 Werten erfolgte, so dass der Berechnungszeitraum 33 Tage betrug. Da sich für den Korrelationskoeffizienten ein Wert von  $r = 0,65$  ergab, ist ein linearer Zusammenhang nicht ausgeschlossen und wurde für die Bestimmung einer Regressionsgeraden angenommen. Die Regressionsgerade mit Konfidenzintervall ist in Abbildung (5.4) dargestellt.

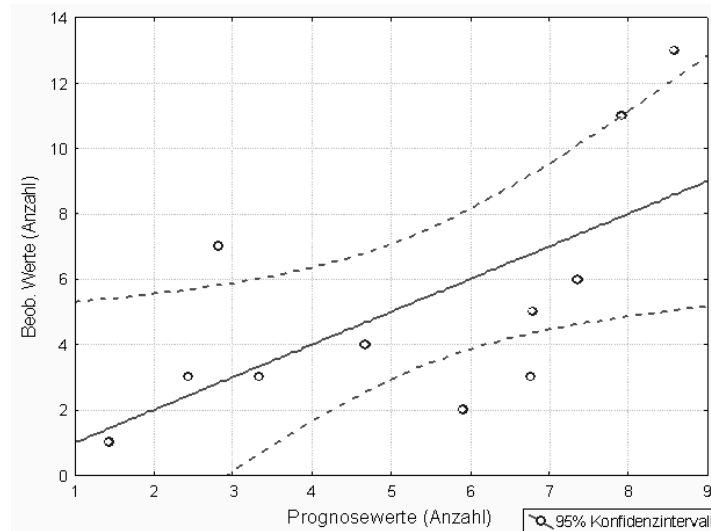


Abb. 5.4: Regressionsgerade und Konfidenzintervall (95%) für die Anzahl mit den Indizes aus Gleichung (5.1)

Mit Hilfe der Steigung  $a$  und dem Achsenabschnitt  $b$ , die sich aus der Bestimmung der Regressionsgeraden ergeben, wurde eine Prognose für die Erschütterungssituation gerechnet. Der Prognosezeitraum sowie die Ergebnisse der Prognose für die gesamte Abbauezeit sind in Abbildung (5.5) wiedergegeben. Dabei bezieht sich die Prognose erneut auf Dreitagesintervalle. In einigen Zeitabschnitten ist eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen den prognostizierten und den beobachteten Werten zu erkennen. Dieses gilt sicherlich für das halbe Jahr nach dem Berechnungszeitraum. Hier wurde neben der Tendenz auch die Ereignisanzahl zum Teil sehr gut vorhergesagt. Mit Beginn des Jahres 2005 gehen die Kurven deutlicher auseinander, insbesondere wird das auffällige Maximum Mitte Februar 2005 nicht berechnet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ergebnisse die Benutzung der gewählten Indizes rechtfertigen. Begünstigend kann hinzugekommen sein, dass die Anzahl seismischer Ereignisse wie in anderen Ländern auch in Deutschland in der Regel eine Funktion der Abbaugeschwindigkeit ist. Auch die Indizes sind stark von der Abbaugeschwindigkeit abhängig, so dass eine gute Prognose erwartet werden konnte.

Werden für die Prognose der seismischen Energie alle Ereignisse verwendet, so konnten auch über die Indizes (5.1) keine zufriedenstellenden Werte prognostiziert werden. Obwohl es während der Abbauezeit zu 30 seismischen Ereignissen mit einer Energie größer  $10^7 J$  kam, sind dieses doch nur 6% der Gesamtanzahl. Zu vermuten ist, dass aber gerade die starken Ereignisse die Prognose der seismischen Energie erschweren. Aus diesem Grund wurden für die folgende Betrachtung nur die Ereignisse mit einbezogen, die eine seismische Energie kleiner  $10^7 J$  besaßen. Da auch hierfür, wie für die Ereignisanzahl, keine erfolgreiche Prognose möglich war, wurde der Berechnungszeitraum auf drei Intervalle mit

je drei Tagen verkürzt und damit jeweils vier Intervalle mit je drei Tagen prognostiziert. Das Ergebnis der Prognose ist in Abbildung (5.6) dargestellt.

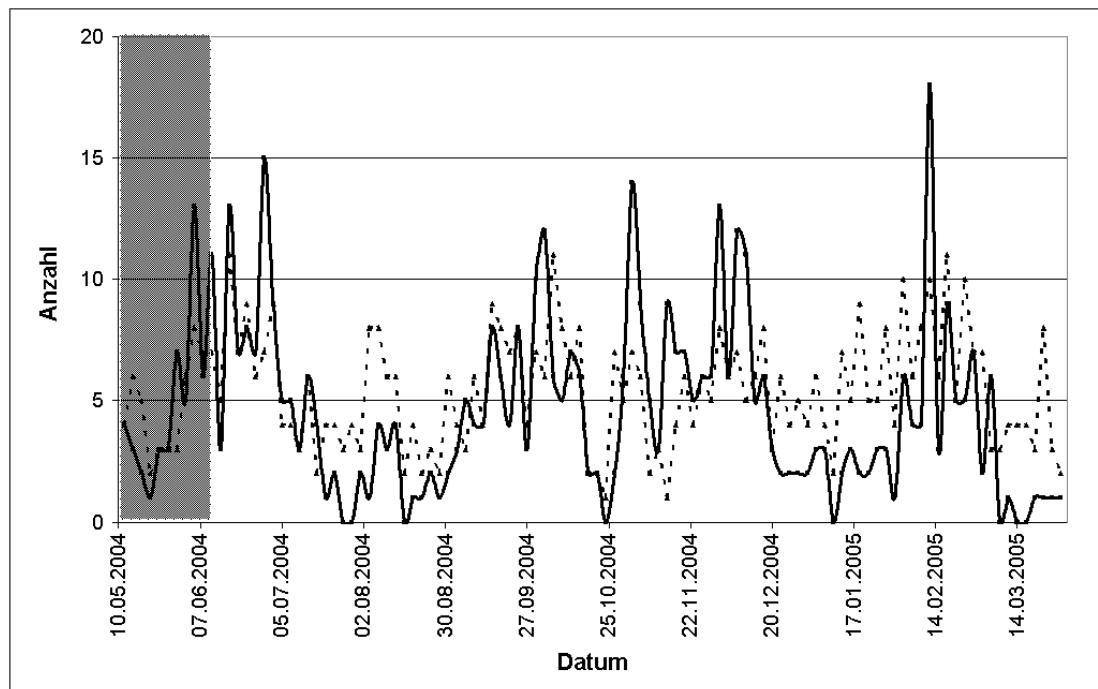


Abb. 5.5: Prognose (gestrichelt) der Erschütterungsanzahl (durchgezogene Linie), Berechnungszeitraum (punktierter Bereich): BW Ost, S704, Flöz Sonnenschein

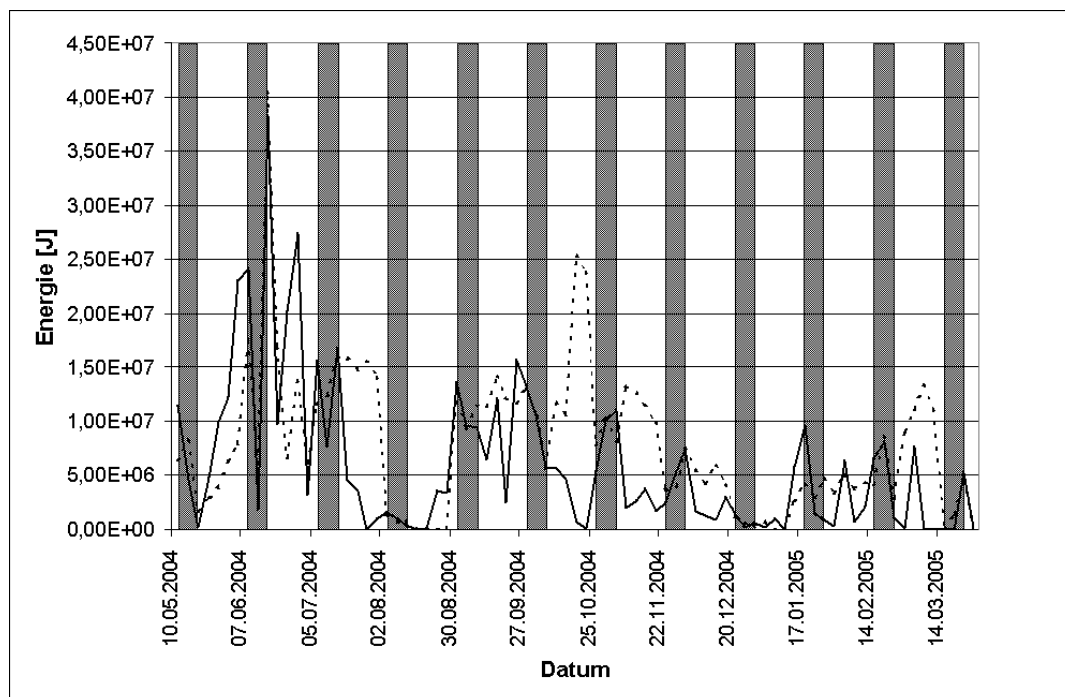


Abb. 5.6: Prognose (gestrichelte Linie) der seismischen Energie (durchgezogene Linie), Berechnungszeiträume (punktierter Bereiche): BW Ost, S704, Flöz Sonnenschein

Über den gesamten Abbauzeitraum kann keine einheitliche Aussage getroffen werden. Es existieren Intervalle, in denen praktisch keine Übereinstimmung mit den beobachteten Werten vorliegen, wie Mitte Juli 2004, und es existieren Prognosen, wie z. B. Anfang Januar 2005, wo eine gute Übereinstimmung erreicht wird. Da bei der Mehrzahl der Prognoseintervalle eine gute Übereinstimmung zumindest tendenziell vorliegt, kann über die Methode eine gute Abschätzung für die Energieverteilung über die Abbauzeit getroffen werden, wenn sehr starke Ereignisse nicht betrachtet werden.

## 5.4 Abbau mit Restfeste im Hangenden

In diesem Abschnitt wird eine zweite Bauhöhe (BW Saar, Flöz Grangeleisen, 20.3 Ost) untersucht, dessen Erschütterungssituation durch eine Restfeste im Hangenden gekennzeichnet ist. In zwei oberhalb liegenden Flözen (Schwalbach und Wahlschied) wurde bisher Kohle gefördert. Da die Abbaue des Flözes Schwalbach den analysierten Abbau komplett überbaut haben, wurden nur die Altabbau des Flözes Wahlschied betrachtet, die eine Restfeste im Hangenden des aktuellen Abbaus stehengelassen haben, wie es in Abbildung (5.7) wiedergegeben ist.

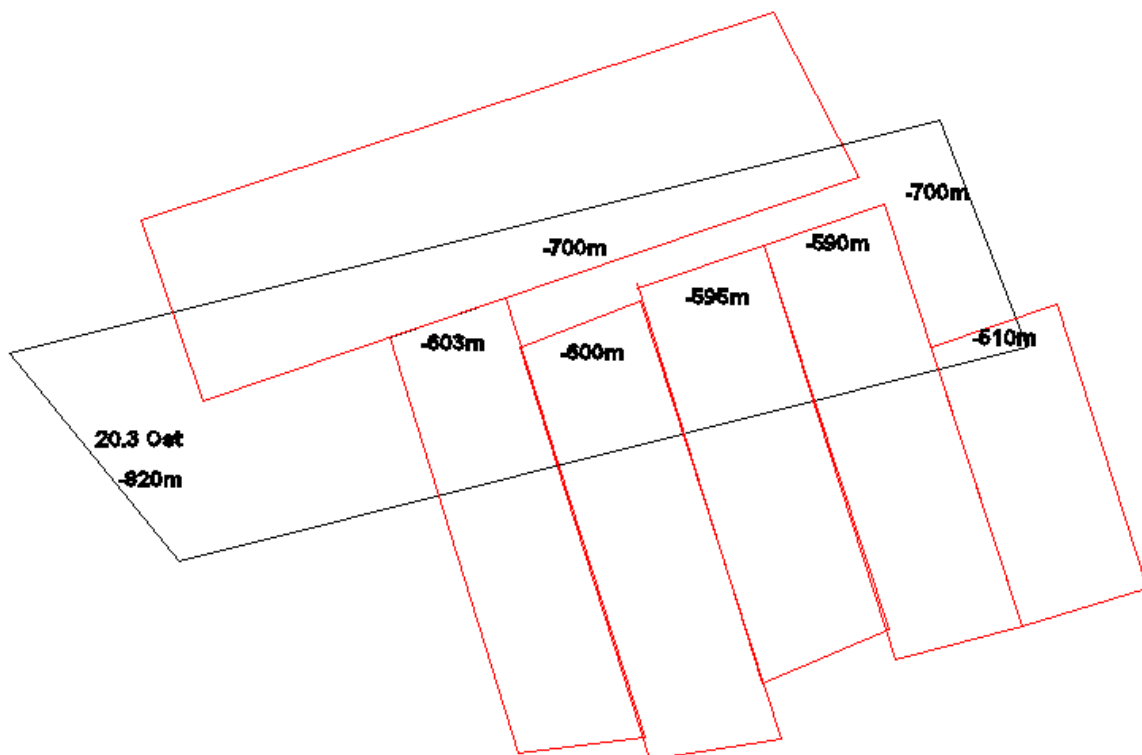


Abb. 5.7: Abbausituation für die Bauhöhe 20.3 Ost (schwarz), Flöz Grangeleisen, BW Saar, Altabbau im Flöz Wahlschied (rot)

Die Bauhöhe 20.3 Ost wird von Nord-Ost nach Süd-West 1400 m bei einer Streblänge von 380 m abgebaut. Für die Berechnungen wurde eine abgebaute Mächtigkeit von 2,97 m angenommen. Der untersuchte Zeitraum umfasst 406 Tage an denen 620 m Kohle gefördert

wurde. Die Erschütterungssituation war in diesem Zeitraum durch das Auftreten starker seismischer Ereignisse geprägt. Insgesamt kam es zu 39 seismischen Ereignissen, von denen 26 eine Energie größer  $7 \cdot 10^5 J$  besaßen und zeitlich mit dem Unterfahren der Restfeste zusammenfielen. Das erste dieser starken Ereignisse trat nach einem Abbau von einem halben Jahr auf. Nach einem weiteren halben Monat kam es innerhalb eines Tages zu zwei weiteren starken Ereignissen. Danach setzte eine Pause von gut zwei Monaten ein, bevor in geregelter Folge weitere starke seismische Ereignisse auftraten (vgl. Abbildung (5.8)). Die Abbildung (5.9) zeigt die zeitliche Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden starken Ereignissen. Dabei wurden drei Klassen gebildet. Deutlich zu erkennen ist, dass 64 % der Ereignisse innerhalb einer Woche nach Auftreten des vorherigen starken Ereignisses stattfanden. Weitere 24 % der starken Ereignisse fielen in die zweite Woche. Diese Daten zeigen die Tendenz auf, dass es für die Bauhöhe 20.3 Ost wesentlich wahrscheinlicher ist, dass es schon innerhalb der ersten sieben Tage nach dem vorherigen starken Ereignis erneut zu einem starken Ereignis kommt, als nach der ersten Woche.

Zeit	Energie [J]	Zeit	Energie [J]
13.12.2004 08:36	2,44E+06	20.04.2005 21:30	6,96E+06
30.12.2004 06:56	1,23E+06	26.04.2005 09:53	9,93E+06
30.12.2004 17:21	1,09E+06	03.05.2005 14:39	1,74E+07
24.02.2005 00:34	1,47E+06	05.05.2005 02:02	1,05E+07
26.02.2005 23:46	3,21E+06	14.05.2005 10:51	6,17E+06
03.03.2005 06:28	4,34E+06	10.06.2005 12:59	8,59E+06
15.03.2005 02:09	3,81E+06	16.06.2005 10:10	2,34E+07
16.03.2005 20:33	9,01E+05	23.06.2005 21:51	2,68E+07
18.03.2005 15:54	7,95E+05	29.06.2005 01:40	2,05E+07
23.03.2005 19:04	4,03E+06	02.07.2005 11:30	1,61E+07
30.03.2005 22:07	4,83E+06	08.07.2005 17:06	6,12E+06
06.04.2005 02:08	4,46E+06	11.07.2005 08:49	4,04E+07
14.04.2005 18:02	6,85E+06	14.07.2005 14:33	1,90E+07

Abb. 5.8: Starke Ereignisse der Bauhöhe 20.3 Ost, Flöz Grangeleisen, BW Saar

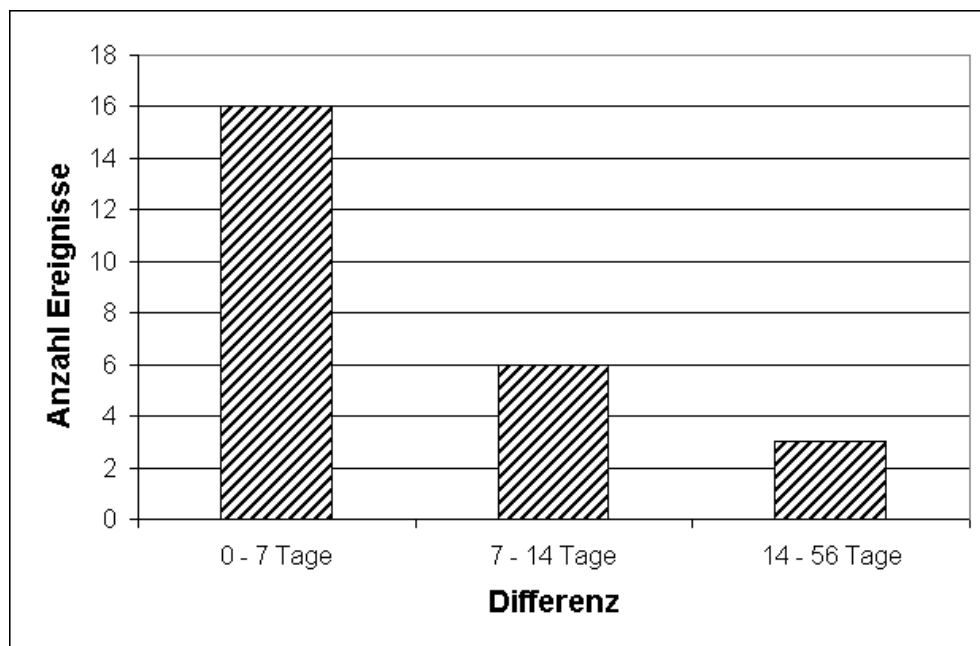


Abb. 5.9: Zeitliche Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden starken Ereignissen: BW Saar, Flöz Grangeleisen, 20.3 Ost

Die seismische Energie der einzelnen Ereignisse stieg kontinuierlich an, wie es auch in Abbildung (5.10) zu erkennen ist. Dieses fällt zeitlich mit dem Beginn der Unterbauung des breiteren Bereichs des Abbaupfeilers zusammen.

Eine auf Basis von Regressionsrechnungen beruhende Prognose der Ereignisanzahl kann aufgrund der geringen Ereignisanzahl keinen Erfolg haben. Da ferner zweidrittel der Ereignisse als starke Erschütterungen angesehen werden können, wurde untersucht, inwiefern sich das Auftreten dieser Ereignisse vorhersagen lässt. Dafür wurden  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  und  $r$  so bestimmt, dass zeitliche Zusammenhänge zwischen den Indizes (Gleichung (5.1)) und den Ereignissen erkennbar waren. Im Unterschied zu dem vorherigen Messfall aus Abschnitt (5.3) ergab sich:  $\varepsilon_1 = -0.145 \text{ MPa}/d$  und  $\varepsilon_2 = 0 \text{ MPa}$ . Eine Ortung der Ereignisse, u. a. mit untertägigen Messstationen zeigte, dass die Ereignisse aus dem Hangenden des betrachteten Abbaus stammten. Somit wurden die Berechnungspunkte ca. 250 m oberhalb des betrachteten Abbaus und damit auch oberhalb der Altabbau gewählt, so dass ausschließlich Senkungen berechnet wurden. Die Zusammenhänge waren am deutlichsten, als für die Berechnung der Indizes alle Punkte verwendet wurden, die in einer Umgebung von höchstens  $r = 30 \text{ m}$  um den jeweiligen Streb lagen. Die Abbildung (5.10) zeigt das Auftreten der seismischen Ereignisse mit einer Energie größer  $7 \cdot 10^5 \text{ J}$  über der Zeit. Dabei sind die Ereignisanzahl und die kumulierte Energie für jeden Tag sowie die berechneten Indizes dargestellt.

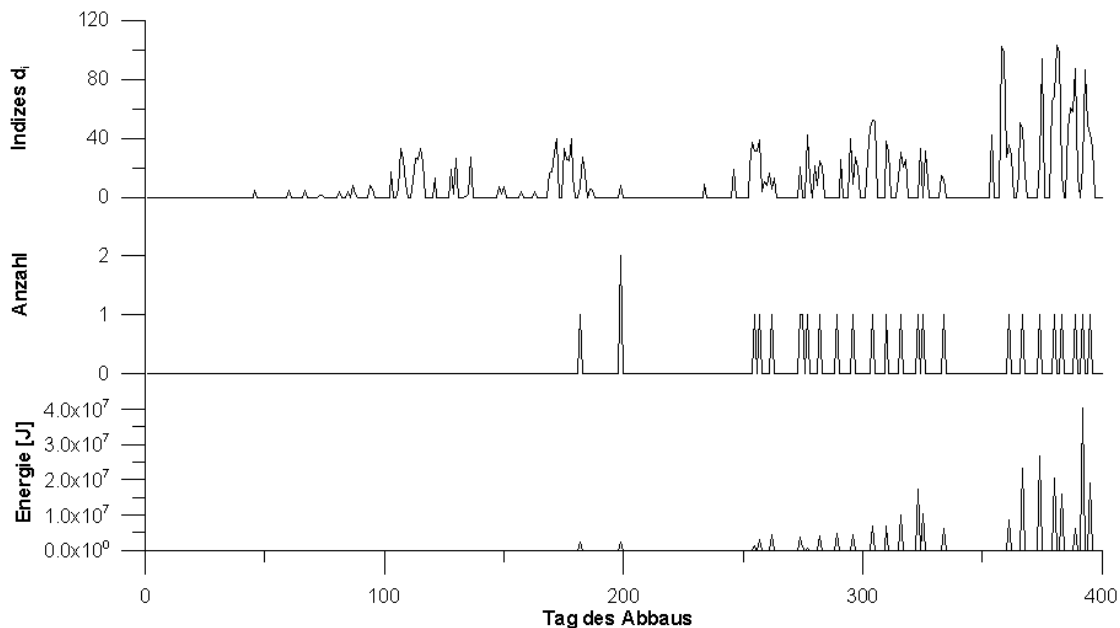


Abb. 5.10: Darstellung der Erschütterungssituation mit den berechneten Indizes  $d_i$  für die Bauhöhe 20.3 Ost, Flöz Grangeleisen, BW Saar

Wird der Zeitabschnitt nach Auftreten der ersten starken Erschütterung betrachtet, so ist auffällig, dass an allen Tagen ( $\pm 1$ Tag), an denen es zu weiteren relevanten Erschütterungen kam, auch ein lokales Maximum der Indizes  $d_i$  vorlag. Darüber hinaus gilt die Umkehrung fast vollständig. Hier gab es bis auf wenige Ausnahmen nur dann seismische Ereignisse, wenn auch die Indizes ein Maximum aufwiesen. Der Anstieg der seismischen Energie eines Ereignisses wird durch die Indizeverteilung nicht so gut ermittelt. Zwar sind die Indizes an den Zeitpunkten, an denen die Ereignisse eine hohe seismische Energie be-

saßen, auch sehr hoch, andererseits existieren mehrere Ausnahmen, an denen ein großes lokales Maximum der Indizes zu einem Ereignis mit geringerer seismischer Energie gehört.

Vor Auftreten der ersten starken Erschütterung lagen an mehreren Tagen lokale Maxima der Indizeverteilung vor, ohne das es zu seismischen Ereignissen kam. Es ist damit zu vermuten, dass es bei dieser Abbausituation zu weiteren starken Erschütterungen hätte kommen können. Für das Auftreten starker seismischer Ereignisse ist das Vorhandensein kompetenter Sandsteinschichten notwendig, die zudem durch die Altabbau noch nicht zerstört worden sein dürfen (vgl. Abschnitt (2.6.2)). Somit konnten weitere starke Ereignisse wahrscheinlich aufgrund der geologischen Verhältnisse nicht stattfinden.

Die beschriebene zeitliche Übereinstimmung legt den Rückschluss nahe, dass lokale Maxima in der Indizeverteilung ein deutlicher Hinweis für das Auftreten starker seismischer Ereignisse in der betrachteten Abbausituation sind, wenn die geologischen Verhältnisse dies unterstützen. Eine hohe seismische Energie scheint wahrscheinlicher zu sein, wenn die Indizes einen hohen Wert aufweisen.

Für den in Abschnitt (5.3) betrachteten Abbau S704 (BW Ost, Flöz Sonnenschein) wurde ebenfalls versucht, zeitliche Zusammenhänge zwischen den Indizes und den starken Ereignissen mit einer Energie größer  $10^7 J$  (30 von 502 Ereignissen) zu erkennen. Dazu wurden die gleichen Berechnungspunkte wie in Abschnitt (5.3) verwendet. Eine gute zeitliche Übereinstimmung ergab sich für:  $r = 150 m$ ,  $\varepsilon_1 = -2,5 MPa/d$  und  $\varepsilon_2 = -40,1 MPa$ . Die Wahl von  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  hat Einfluss auf die Indizeverteilung bzw. der Häufigkeit der auftretenden Maxima. Eine Wahl der beiden Parameter in der Nähe von 0 hätte wesentlich mehr Maxima über den gesamten Zeitabschnitt zur Folge und der Zusammenhang mit dem zeitlichen Auftreten der Ereignisse wäre grafisch nicht erkennbar. Die Verteilung der Ereignisanzahl, der kumulierten seismischen Energien und der Indizes ist in Abbildung (5.11) wiedergegeben.

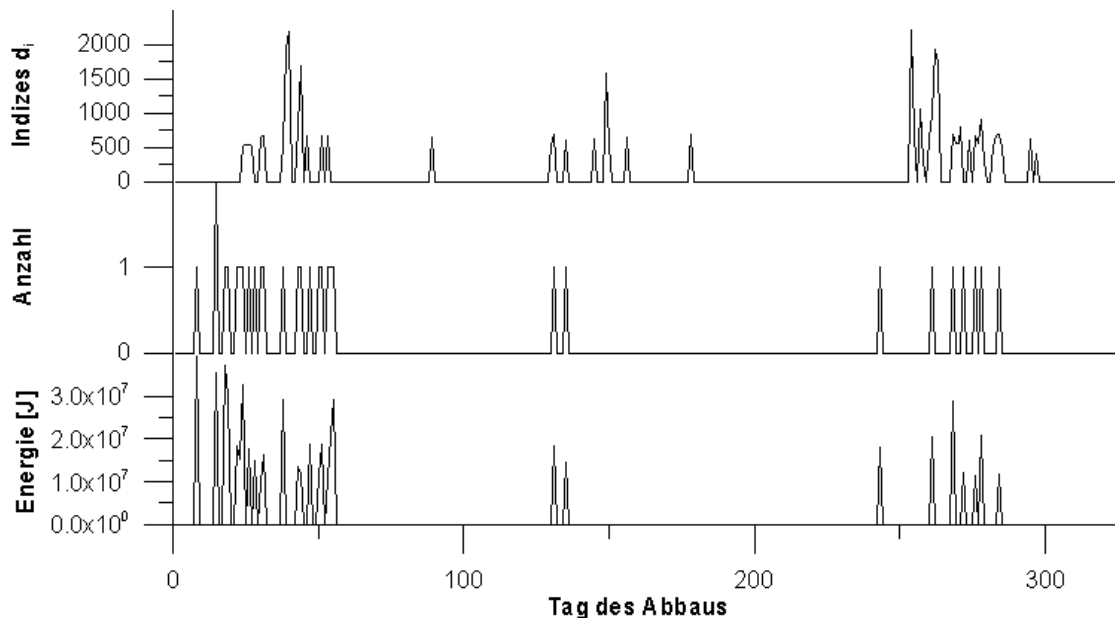


Abb. 5.11: Darstellung der Erschütterungssituation (starke Ereignisse) mit den berechneten Indizes  $d_i$  für die Bauhöhe S704 (BW Ost, Flöz Sonnenschein)

Die Darstellung (5.11) verdeutlicht, dass nicht bei jedem starken Ereignis ein lokales Maximum der Indizeverteilung vorliegt, wie es beim vorherigen Messfall (BW Saar, Flöz

Grangeleisen, 20.3 Ost) zu Beginn dieses Abschnitts der Fall war. Diese Ereignisse traten bis auf eine Ausnahme in der Anfangsphase des Abbaus auf. Umgekehrt existieren auch im aktuell betrachteten Messfall Tage, an denen ein lokales Maximum der Indizes vorliegt, aber kein starkes Ereignis registriert worden ist. Positiv ist hingegen, dass lokale Maxima in drei größeren Zeitabschnitten vorlagen, in denen es auch zu starken seismischen Ereignissen kam. Dieses deutet darauf hin, dass zumindest die Gefahr einer starken Erschütterung innerhalb eines Zeitintervalls durch die verwendete Methode in vielen Fällen vorausgesagt werden kann. In dem betrachteten Messfall existiert kein Zusammenhang zwischen den Indizes und der seismischen Energie.

Werden beide bisher untersuchten Messfälle betrachtet, so kann gesagt werden, dass sich durch das verwendete Verfahren Bereiche mit einem erhöhten Risiko an starken seismischen Ereignissen ausmachen lassen. Dazu müssen jedoch die Schwellenwerte  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  sowie die Umgebung  $U_r$  geeignet gewählt werden. Vor Abbaubeginn ist dieses nur eingeschränkt bis gar nicht möglich und es kann nur eine auf Erfahrungen beruhende Abschätzung getroffen werden. Deshalb ist die Wahl der Parameter nach jedem neuen starken Ereignis zu überprüfen und gegebenenfalls anzugleichen.

## 5.5 Doppelbetrieb ohne Altabbau im Hangenden

Die bisherigen Untersuchungen betrafen nur Bauhöhen in stark bzw. mittel durchbautem Gebirge. Zu diesem Zweck sind die Indizes so gewählt worden, dass sowohl Werte des laufenden Abbaus als auch der Altabbau in die Berechnung mit einfließen. Die folgenden Betrachtungen sollen die Möglichkeit einer Prognose von Erschütterungen des Typs 1 (vgl. Abschnitt (2.2)) überprüfen, ohne das sich im Hangenden Restfesten bzw. Abbauanten befinden. Für den Typ 1 wurde eine enge Korrelation zu dem aktuellen Abbaugeschehen gezeigt, so dass für diese Ereignisse eine gute Prognosemöglichkeit bestehen sollte. Dazu müssen die Indizes aus Gleichung (5.1) nicht modifiziert werden, wenn  $p_{zz,j}^A = 1$  gesetzt wird. Da im Folgenden die Erschütterungssituation eines Doppelbetriebs untersucht werden soll, wird als Volumen  $V_i$  die Summe der abgebauten Volumen der beiden separaten Strebe angesehen. Als Messfall wird der Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost (BW Ensdorf (heute Saar)) (Abbildung (5.12)) untersucht.

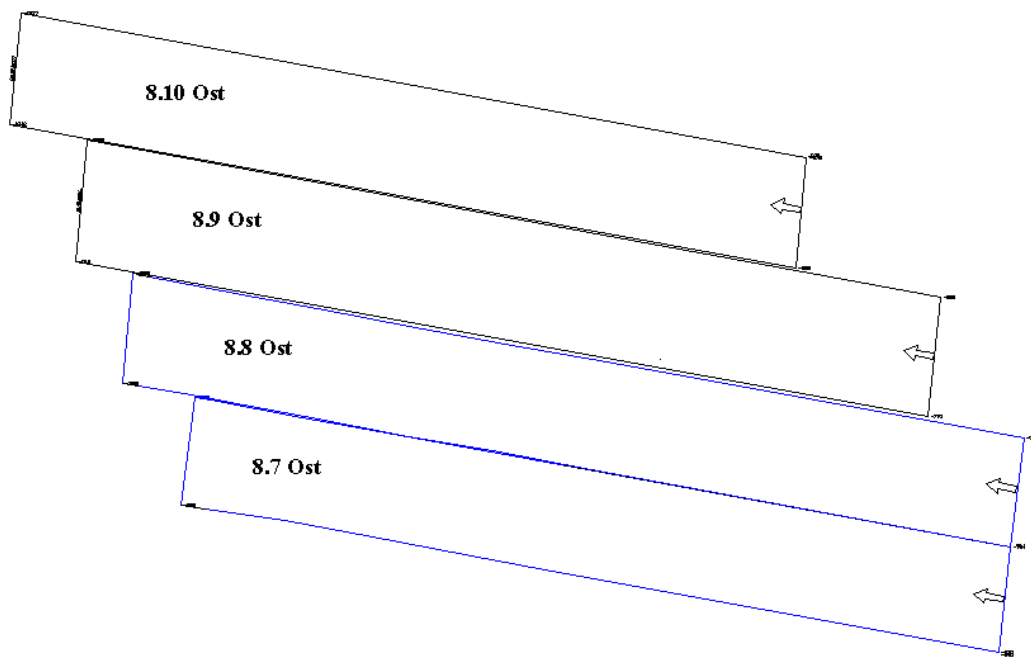


Abb. 5.12: Abbausituation für die Doppelbetriebe 8.7 Ost / 8.8 Ost (blau) und 8.9 Ost / 8.10 Ost (schwarz) (BW Ensdorf, Flöz Schwalbach)

Die beiden Bauhöhen wurden auf einer Länge von 2750 m abgebaut. Dabei betrug die Streblänge zusammen ca. 660 m. Der Abbaubeginn des Strebs 8.7 Ost lag drei Monate vor dem Abbaubeginn des Strebs 8.8 Ost, was zu Beginn des Strebs 8.8 Ost einer Differenz von ca. 80 m entsprach. Betrachtet wurde die Erschütterungssituation über 905 Tage bei denen es zu 2996 seismischen Ereignissen des Typs 1 kam. Zwischen dem Abbaubeginn der ersten Bauhöhe und dem Beginn der zweiten Bauhöhe kam es nur zu vier Ereignissen. Kennzeichnend für diesen Messfall ist das Auftreten starker Ereignisse vom Typ 2 und Typ 4 im Verlauf des Abbaus. Zeitgleich mit dem Auftreten dieser Typen gingen die seismischen Ereignisse des Typs 1 sehr stark zurück, wie in Abbildung (5.13) zu erkennen ist.



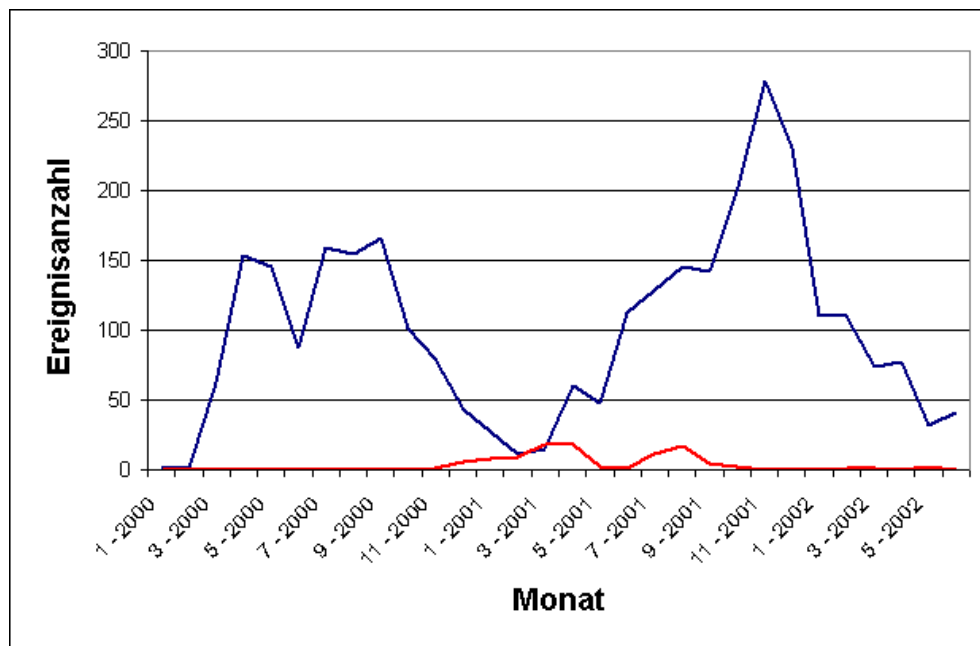


Abb. 5.13: Ereignisanzahl über die Zeit nach Typen (BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost): Typ 1 - blau, Typ 2 und Typ 4 - rot

Aus weitergehenden Untersuchungen (Uhl *et al.* ([Uhl04], 2004)) ist bekannt, dass das Auftreten der starken Ereignisse mit dem Vorhandensein bestimmter Sandsteinschichten zusammenhing. Für die Typ 2 und Typ 4 Ereignisse wurden erneut die zeitlichen Differenzen zu den vorherigen Ereignissen bestimmt, um so zu einer Abschätzung zu gelangen, wann ein weiteres Ereignis dieser Typen zu erwarten ist (Abbildung (5.14)). Dabei ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die starken Ereignisse der Bauhöhe 20.3 Ost im Flöz Grangeleisen (BW Saar) (Abbildung (5.9)). Aufgrund der höheren Anzahl an Ereignissen (102 Ereignisse) konnten die Klassenbreite diesmal zu drei Tagen gewählt werden. Bei dem Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost bestand die Besonderheit, dass ab dem 01.05.2001 von 0 Uhr bis 6 Uhr nicht abgebaut wurde. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen für drei Zeitabschnitte vorgenommen. Zum einen für den gesamten Abbauphase, dann bis einschließlich dem 30.04.2001 (59 Ereignisse) und ab dem 01.05.2001 (43 Ereignisse). In den drei Abschnitten fanden jeweils 73 % (gesamter Zeitraum), 66 % (bis 30.04.2001) und 56 % (ab 01.05.2001) der Ereignisse innerhalb der ersten drei Tage nach dem vorherigen Ereignis statt. Somit traten bei diesem Doppelbetrieb die Ereignisse der Typen 2 und 4 mit einer hohen Wahrscheinlichkeit innerhalb von 3 Tagen untereinander auf. Nach der vorliegenden Datenlage scheint der nächtliche Abbaustopp eine Verbesserung der Erschütterungssituation in Bezug auf die Typen 2 und 4 gebracht zu haben.

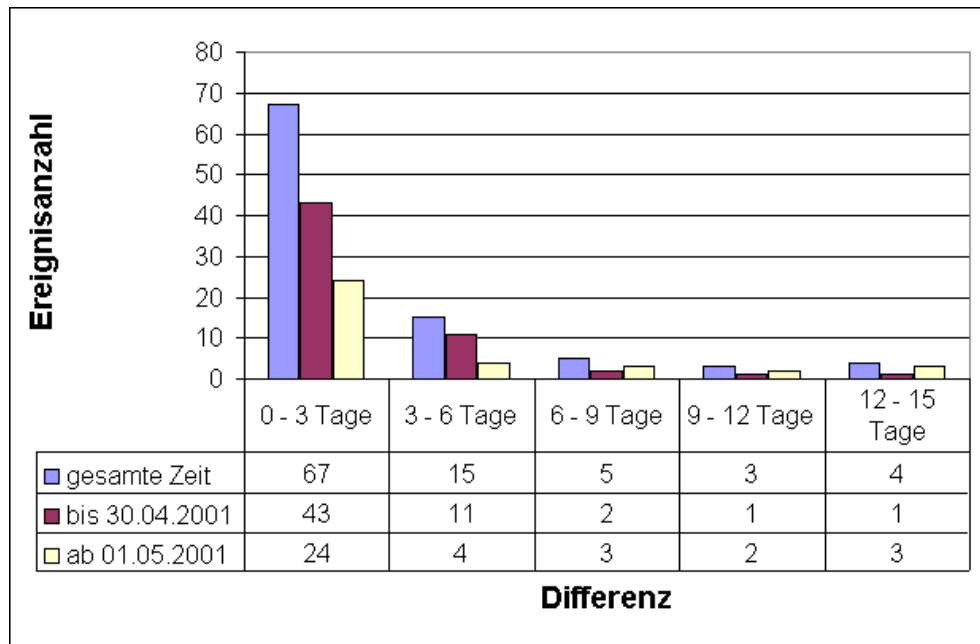


Abb. 5.14: Zeitliche Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden starken Ereignissen: BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost

Die Ereignisanzahl der Typ 1 Ereignisse wurde auf zwei Wegen prognostiziert. Hierbei wurde zuerst versucht (Prognose 1) die Anzahl über längere Zeiträume vorherzusagen. Dazu wurden die Werte mehrerer Tage verwendet, um die notwendigen Parameter  $a$  und  $b$  zu bestimmen. Mit diesen konnte anschließend eine Prognose erstellt werden. Die Ergebnisse und die Berechnungszeiträume sind in Abbildung (5.15) und (5.16) wiedergegeben.

Der erste Prognosezeitraum ging bis zum Anfahren des Strebes 2 (8.8 Ost). Da es in dieser Zeitspanne nur zu vier Ereignissen kam, war eine Prognose dieser Ereignisse über das erste Prognoseverfahren nicht möglich. Allgemein wurden immer 4 Tage zu einer Einheit verbunden, wie es analog auch in Abschnitt (5.3) vorgenommen worden ist. Mit Beginn des zweiten Abbaus wurden die Parameter erneut bestimmt. Hierbei wurde insgesamt ein Berechnungszeitraum von über 2 Monaten verwendet. Mit Einsetzen der Typ 2 und Typ 4 Ereignisse wurden die Parameter abermals berechnet. Der Prognosezeitraum ging anschließend bis zu einem Abbaustopp sieben Monate später. Daran anschließend wurden die Parameter letztmalig berechnet. Die zweite Prognose erfolgte, in dem drei Zeitintervalle (somit 12 Tage) für die Berechnung der Parameter verwendet wurden, und anschließend 4 Zeitintervalle (16 Tage) prognostiziert wurden, so dass die lokalen Eigenschaften bei der zweiten Prognose besser berücksichtigt werden.

Die Ereignisanzahl wird durch das zweite Prognosemethode sehr gut berechnet. Dieses gilt für den gesamten Abbauzeitraum. Eine Ausnahme befindet sich ca. im Mai 2000. Für diese Zeit werden wesentlich zu viele Ereignisse vorhergesagt. Für die gesamten 905 Tage werden durch die zweite Prognose 171 Ereignisse zu viel prognostiziert. Im Vergleich zu den annähernd 3000 registrierten Ereignissen ein geringer Prozentsatz von 5,7%. Erwartungsgemäß lässt sich die Ereignisanzahl über längere Zeiträume nur schlecht vorhersagen, wie die erste Prognose bestätigt. Eine Ausnahme bildet hierbei der Zeitabschnitt mit Anfahren des zweiten Strebes. In dieser Zeit bis zum Eintreten der starken Erschütterungen wird die Ereignisanzahl verhältnismäßig gut bestimmt, auch wenn die prognostizierte Kurve flacher verläuft als die registrierte Kurve.

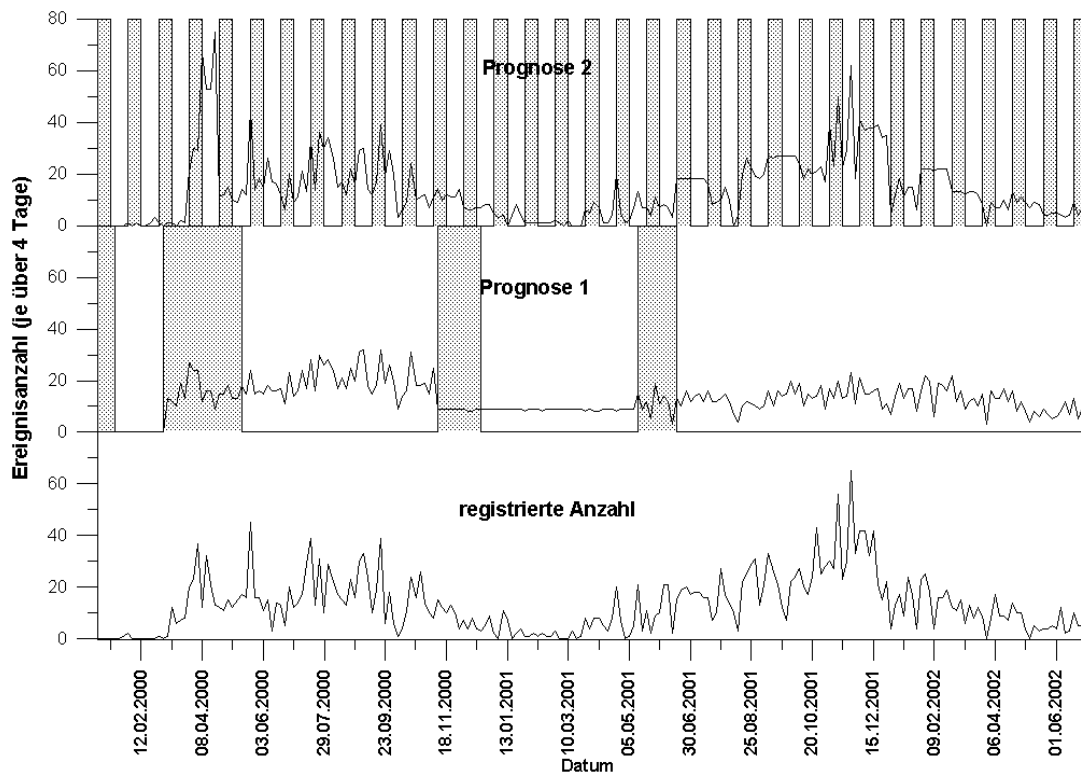


Abb. 5.15: Gegenüberstellung der registrierten Ereignisanzahl und zweier Prognosen für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1. Die zur Prognose verwendeten Berechnungszeiträume sind punktiert dargestellt.

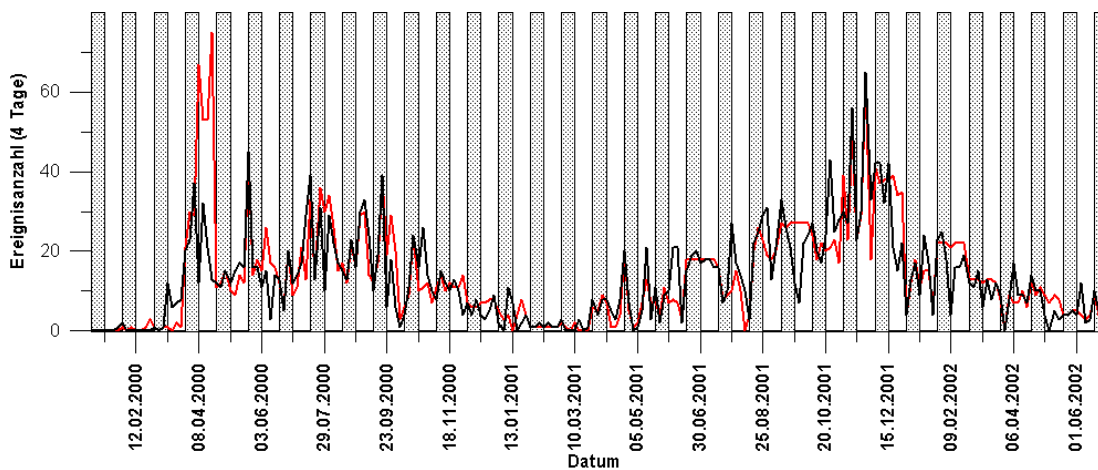


Abb. 5.16: Gegenüberstellung der registrierten Ereignisanzahl (schwarz) und der zweiten Prognose (rot) für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1. Die zur Prognose verwendeten Berechnungszeiträume sind punktiert dargestellt.

Wie bei der Prognose der Ereignisanzahl wurden für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost auch die Energien prognostiziert. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung (5.17) und (5.18) wiedergegeben. Dabei sind entsprechende Ergebnisse wie bei der Prognose der Ereignisanzahl zu erkennen. Allerdings werden auch für den Zeitabschnitt nach dem Anfahren des zweiten Strebens keine brauchbaren Werte prognostiziert. Dieses ändert sich, wenn die

zweite Prognosemethode angewandt wird. Hier werden für den gesamten Zeitraum gute Werte berechnet.

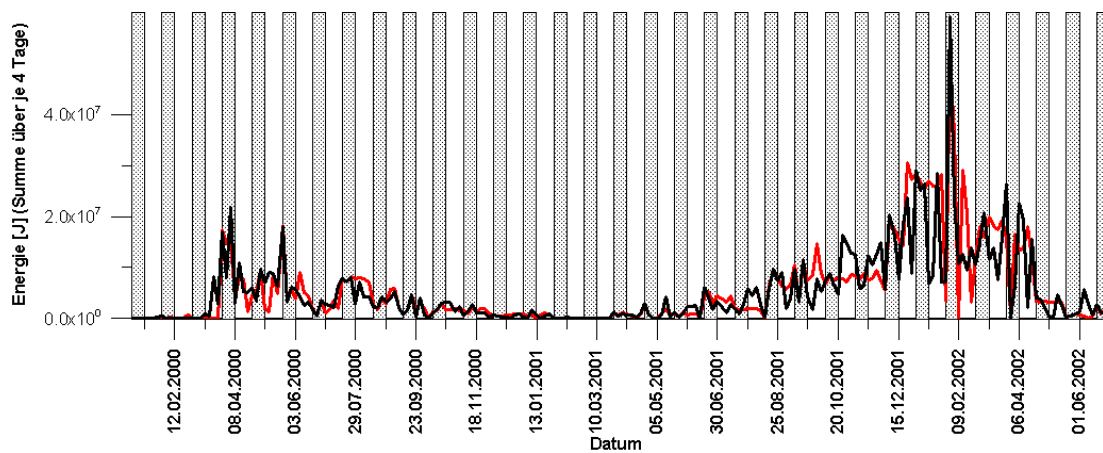


Abb. 5.17: Gegenüberstellung der registrierten Energie (schwarz) und der zweiten Prognose (rot) für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1. Die zur Prognose verwendeten Berechnungszeiträume sind punktiert dargestellt.

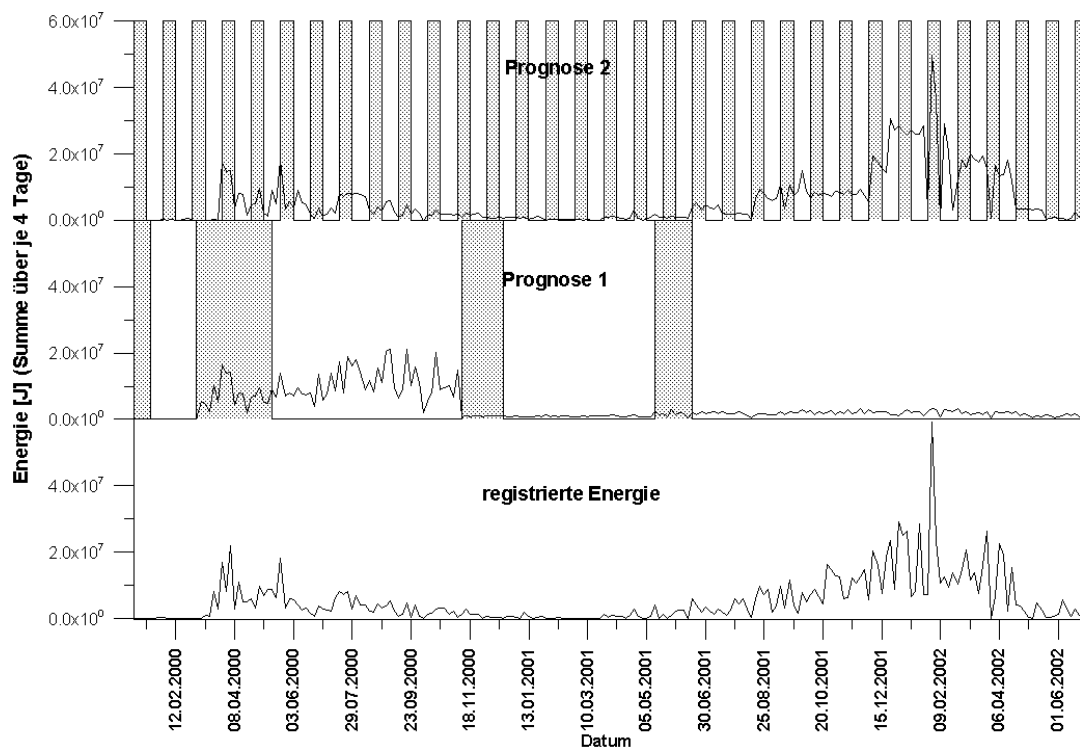


Abb. 5.18: Gegenüberstellung der registrierten Energie und zweier Prognosen für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost - Typ 1. Die zur Prognose verwendeten Berechnungszeiträume sind punktiert dargestellt.

Zwei Jahre nach Beenden des ersten Doppelbetriebs 8.7 Ost / 8.8 Ost wurde mit dem Abbau eines weiteren Doppelbetriebs (8.9 Ost und 8.10 Ost vgl. Abbildung (5.12)) begonnen. Der erste Streb (8.9 Ost) wurde vier Monate vor Beginn des zweiten Abbaus (8.10

Ost) angefahren. Zusammen besitzen die beiden Strebe eine Streblänge von ca. 775 m. Ein großer Unterschied bestand in der Erschütterungssituation vor Anlaufen des zweiten Strebes. Wurden bei dem ersten Doppelbetrieb in der entsprechenden Zeitspanne nur vier seismische Ereignisse registriert, so waren es im zweiten Fall 628 seismische Ereignisse. In den hier betrachteten 335 Tagen kam es insgesamt zu 1146 seismischen Ereignissen vom Typ 1. Einen Monat nach Beginn des zweiten Strebes traten erste Erschütterungen vom Typ 4 auf. Ereignisse des Typs 2 wurden bisher nicht beobachtet. Wie beim ersten Doppelbetrieb, nahm die Anzahl der Typ 1 Ereignisse vor Auftreten der Typ 4 Ereignisse stark ab. Die Erschütterungssituation für den zweiten Doppelbetrieb ist in Abbildung (5.19) dargestellt. Wie zuvor sind zusätzlich die Ergebnisse zweier Prognosen für die Anzahl wiedergegeben. Dabei wurden die Prognosen analog zum ersten Doppelbetrieb erstellt.

Die zweite Ereignisprognose gibt die realen Messwerte erneut sehr gut wieder. Dies gilt sowohl für die Einzelstrebphase als auch für die übrige Zeit. Insgesamt wurden mit der zweiten Prognose 30 Ereignisse zu viel vorhergesagt. Die erste Prognosemethode errechnet für den Beginn bis zum Anfahren des zweiten Strebes gute Werte, allerdings wird anschließend keine verwertbaren Anzahl prognostiziert. Für die seismische Energie ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie im vorherigen Beispiel.

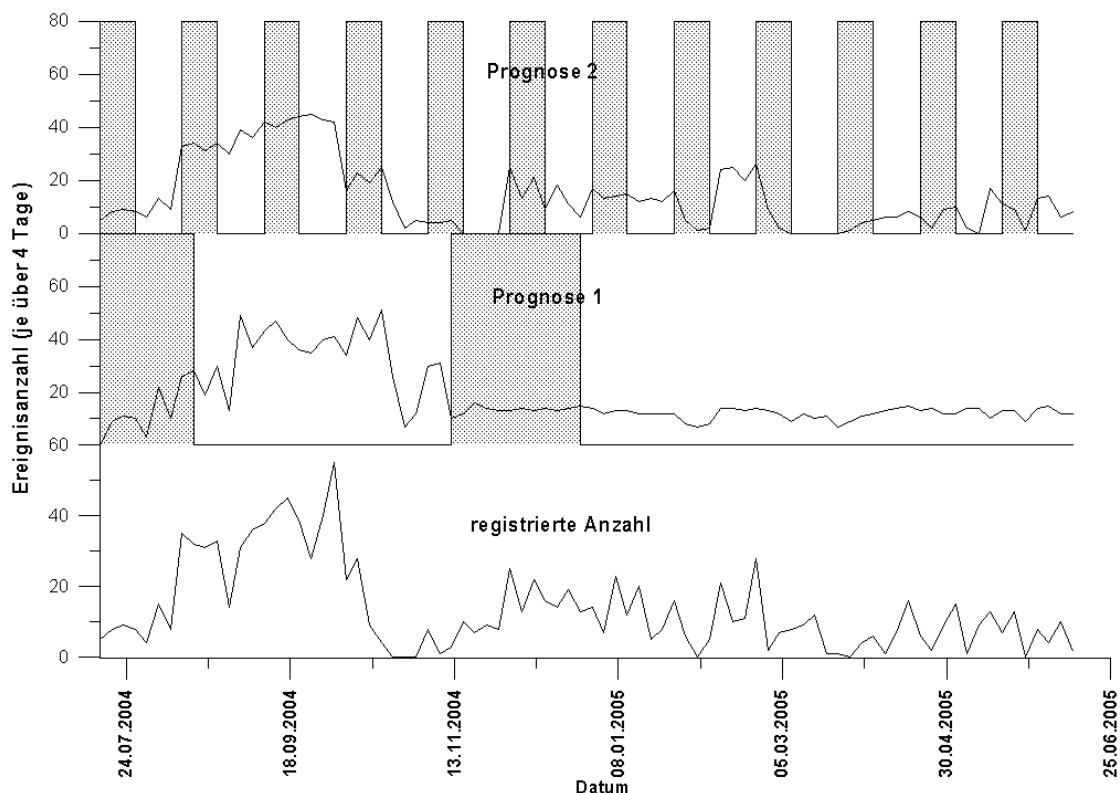


Abb. 5.19: Gegenüberstellung der registrierten Ereignisanzahl und zweier Prognosen für den Doppelbetrieb 8.9 Ost / 8.10 Ost (BW Saar, Flöz Schwalbach) - Typ 1. Die zur Prognose verwendeten Berechnungszeiträume sind punktiert dargestellt.

Da sich der zweite Doppelbetrieb direkt an den ersten Doppelbetrieb im Norden anschloss, wurde zusätzlich untersucht, ob die Regressionsparameter des ersten Doppelbetriebs auf die neue Situation übertragbar sind. Dazu wurden die Parameter bestimmt, indem der gesamte Zeitabschnitt nach Anfahren des zweiten Strebes bis zum Auftreten

des ersten Typ 4 Ereignisses verwendet wurde. Mit den ermittelten Parametern ergaben sich bei der Prognose keine realistischen Werte, so dass für dieses Beispiel eine direkte Übertragung der Parameter nicht möglich war.

Für die beiden Doppelbetriebe war das Auftreten sehr starker Erschütterungen vom Typ 4 auffallend. Wie in Abschnitt (2.2) aufgeführt, wurden die Ereignisse vom Typ 4 im Liegenden des Abbaus lokalisiert und hängen mit einem speziellen geologischen Aufbau zusammen. Mittels einer Hebungsberechnung wurden die Gebirgsbewegungen im Liegenden für beide Doppelbetriebe ermittelt und Indizes berechnet. Hierfür wurden die Indizes aus Gleichung (5.1) angeglichen.

$$d_i = V_i \cdot \sum_j \tilde{d}_{i,j} \quad (5.6)$$

mit

$$\tilde{d}_{i,j} = \begin{cases} \dot{p}_{zz,j,i} \cdot p_{zz,j,i} & \text{für } \dot{p}_{zz,j,i} < \varepsilon_1, p_{zz,j,i} < \varepsilon_2 \text{ und } j \in U_r \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.7)$$

Statt der berechneten vertikalen Spannungen durch vorhandene Altabbau, werden die vertikalen Spannungen an jedem Punkt  $j \in U_r$  zu jedem Zeitpunkt  $i$  genommen, die durch den laufenden Abbau induziert werden. Wie auch bei der Definition der Indizes (5.1) werden auch diese Indizes (5.6) allein durch den Abbaufortschritt und die aus den Gebirgsbewegungen berechneten vertikalen Spannungen bestimmt. Ein Einfluss auf die Indizes erfolgt lediglich über die Schwellenwerte und die Umgebung  $U_r$ . Die Schwellenwerte haben in (5.6) eine analoge Bedeutung zu den Schwellenwerten in (5.1), wobei sich  $\varepsilon_2$  jetzt auf die durch den aktuellen Abbau induzierten Spannungen bezieht.

Die Indizes mit der Erschütterungssituation der Typ 4 Ereignisse für den ersten Doppelbetrieb (8.7 Ost / 8.8 Ost) sind in Abbildung (5.20) zu erkennen, wobei immer sieben Tage zur besseren Erkenntnis zusammengefasst worden sind. Um zu einer guten zeitlichen Übereinstimmung zwischen den Indizes und den Ereignissen zu gelangen, wurden  $\varepsilon_1 = -5,5 \text{ MPa/d}$  und  $\varepsilon_2 = -31 \text{ MPa}$  gefunden, sowie  $r = 60 \text{ m}$  gewählt.

Die Abbildung (5.20) zeigt bei den Indizes  $d_i$  sehr viele lokale Maxima. Diese stimmen zeitlich in mehreren Fällen mit dem Auftreten der Typ 4 Ereignisse überein. Maxima der Indizes vor dem Auftreten des ersten Typ 4 Ereignisses im November 2000 könnten ein Hinweis darauf sein, dass Typ 4 Ereignisse schon eher aufgetreten wären, wenn die Sandsteinverteilung im Liegenden anders verlaufen wäre (vgl. Abschnitt (2.6.1)). Im Jahr 2002 kam es noch zu einem seismischen Ereignis vom Typ 4, das darüber hinaus nicht mit einem Maximum der Indizeverteilung zusammenfällt. Der Zusammenhang zwischen den Indizes und den Typ 4 Ereignissen kann in diesem Beispiel zwar vermutet werden, ist aber nicht eindeutig. Trotzdem können die Maxima ein erhöhtes Risiko andeuten, dass es zu einem Typ 4 Ereignis kommt, wenn die geologischen Verhältnisse entsprechend vorliegen. Dies wird auch durch die Untersuchungen an dem zweiten Doppelbetrieb (8.9 Ost / 8.10 Ost) verdeutlicht. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung (5.21) dargestellt, und mit  $\varepsilon_1 = -6,8 \text{ MPa/d}$ ,  $\varepsilon_2 = -32,1 \text{ MPa}$  und  $r = 60 \text{ m}$  berechnet und anschließend erneut zu sieben Tagen zusammengefasst worden. Da die Schwellenwerte für die beiden betrachteten Doppelbetriebe sehr nahe beieinander liegen, kann das darauf hindeuten, dass die Voraussetzungen für das Auftreten der Typ 4 Ereignisse für beide Doppelbetriebe gleich waren. Dieses mag ein Indiz sein, dass auch ähnliche geologische Bedingungen vorlagen.

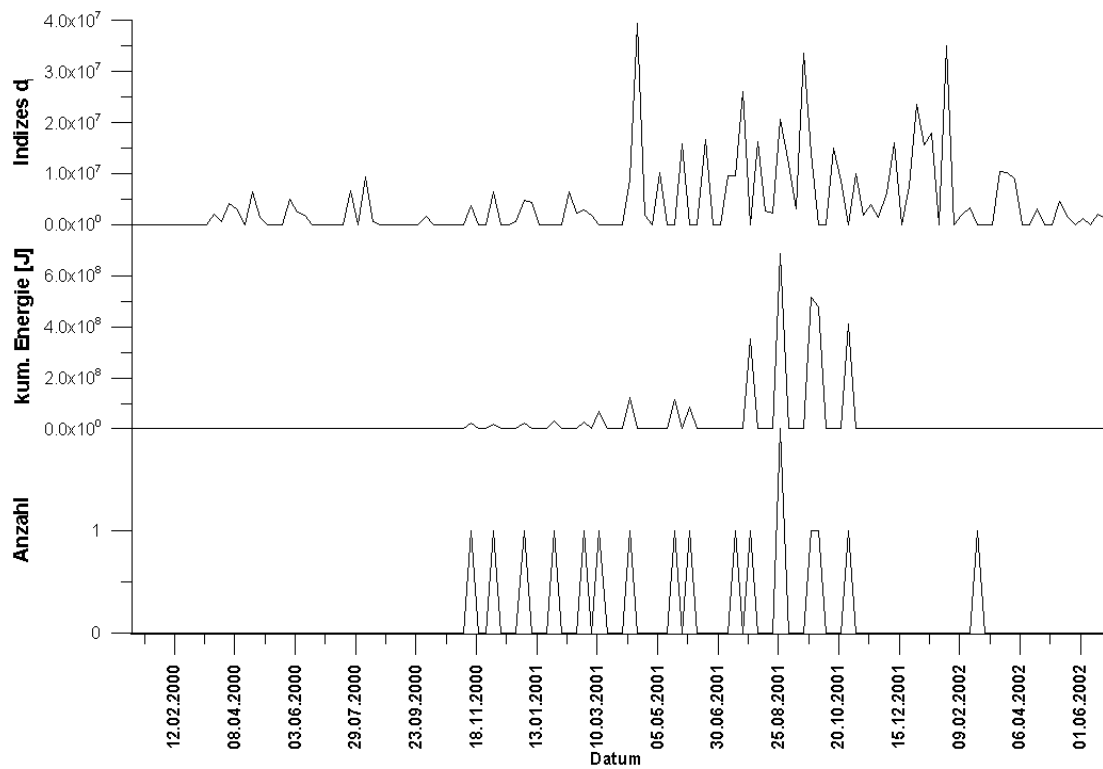


Abb. 5.20: Zusammenhang zwischen den Typ 4 Ereignissen und den Indizes  $d_i$  für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost

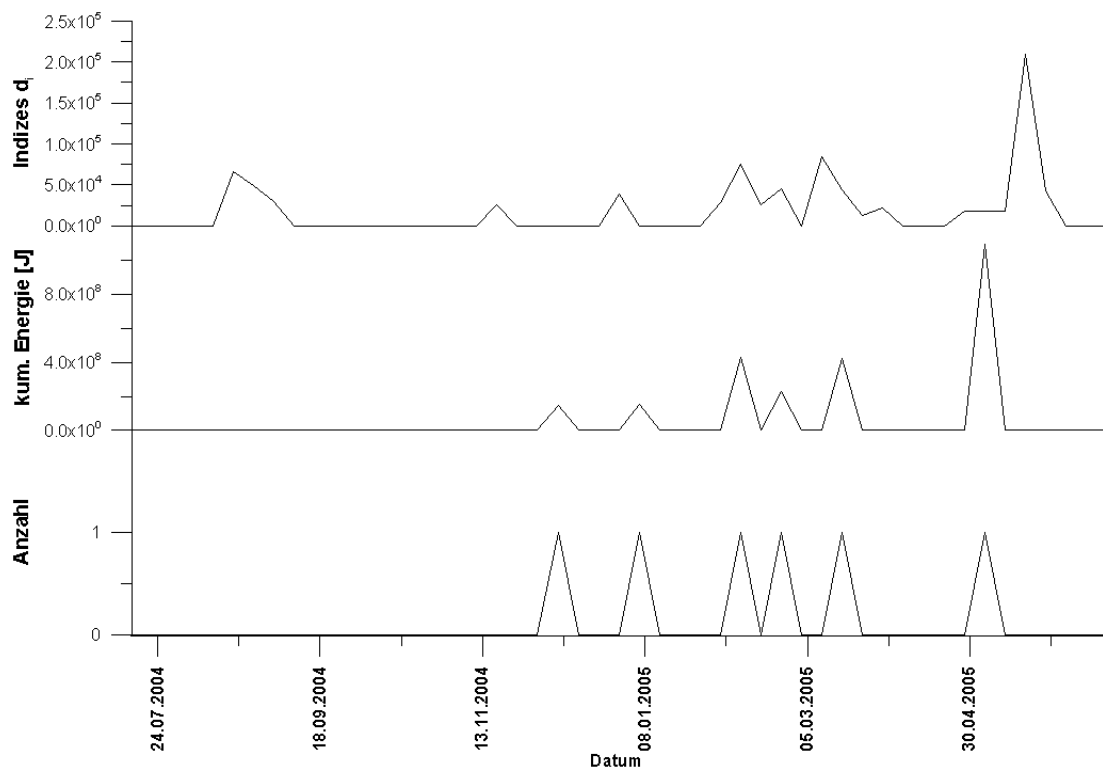


Abb. 5.21: Zusammenhang zwischen den Typ 4 Ereignissen und den Indizes  $d_i$  für den Doppelbetrieb 8.9 Ost / 8.10 Ost

Wie bei dem ersten Doppelbetrieb (8.7 Ost / 8.8 Ost) wurden auch für den zweiten Doppelbetrieb (8.9 Ost / 8.10 Ost) Indizewerte größer Null vor Auftreten des ersten Ereignisses vom Typ 4 berechnet. Ferner wurde ein Maximum ca. drei Wochen vor dem ersten Typ 4 Ereignis ermittelt. Ab dem zweiten Typ 4 Ereignis besteht eine enge zeitliche Übereinstimmung zwischen den Ereignissen und den lokalen Maxima der Indizeverteilung, so dass das Risiko eines seismischen Ereignisses vom Typ 4 durch die lokalen Maxima der Indizeverteilung angezeigt wird.

Eine Begründung, wieso die gewählten Indizes an den gezeigten Tagen ein Maximum annehmen, kann ohne weitergehende Untersuchungen nicht gegeben werden. Eine Vermutung ist, dass die Änderung der Abbaugeschwindigkeiten dabei eine zentrale Rolle spielt. Hierzu wurden die täglichen Änderungen der Abbaugeschwindigkeiten für den zweiten Doppelbetrieb berechnet, wobei die beiden Strebe separat betrachtet worden sind. Anschließend wurden die Änderungen der einzelnen Strebe täglich addiert. Um einen Vergleich mit den Indizes zu gewährleisten, wurden noch über die gleichen sieben Tagesabschnitte wie oben summiert, wenn die Summe der beiden Änderungen an den Tagen größer 4,1 m/d war. Der Vergleich zu den Indizes ist in Abbildung (5.22) wiedergegeben. Die Maxima der Indizes fallen zeitlich mit den Maxima der Geschwindigkeitsänderungen zusammen bzw. treten einen Zeitabschnitt nach den Maxima der Geschwindigkeitsänderungen auf. Dieses kann als ein Hinweis für die Richtigkeit der Vermutung gewertet werden.

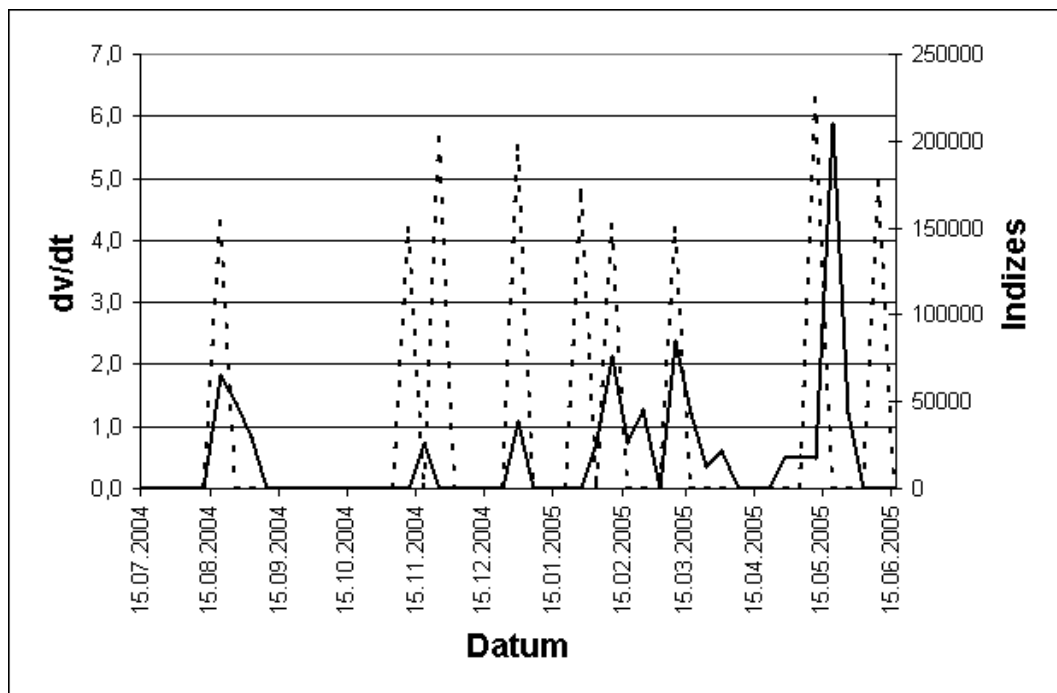


Abb. 5.22: Zusammenhang zwischen den Indizes und der Änderung der Abbaugeschwindigkeit für den Doppelbetrieb 8.9 Ost / 8.10 Ost

Wird diese Untersuchung auch für den ersten betrachteten Doppelbetrieb (8.7 Ost / 8.8 Ost) unternommen, so ergibt sich allerdings kein so eindeutiger Zusammenhang. Zwar liegen die meisten Maxima auch dort zeitlich eng beieinander oder fallen sogar in einen Zeitabschnitt, aber es existieren auch viele Tage an denen Abweichungen vorliegen. Somit kann keine abschließende Aussage getroffen werden.



## 5.6 Zusammenfassung

Die vorgestellten Bauhöhen zeigen, dass sich seismische Ereignisse teilweise vorhersagen lassen. Dazu sind anscheinend mehrere Voraussetzungen notwendig. Zum ersten benötigt eine auf Regressionsrechnung beruhende Prognose eine Vielzahl von Ereignissen innerhalb eines Berechnungszeitraumes. Somit ist es für diesen Fall nicht möglich, vor Beginn eines Abbaus, bzw. vor Auftreten der ersten seismischen Ereignisse eine Prognose zu rechnen. Ist die erste Voraussetzung erfüllt, so kann mit den vorgestellten Indizes die Ereignisanzahl teilweise sehr gut vorausgesagt werden, wenn es sich um kurze Prognosezeiträume handelt, die ungefähr die Länge des Berechnungszeitraumes besitzen. Bei einer Bauhöhe (BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704) gelang zusätzlich auch eine längerfristige Prognose. Für den Fall kurzer Prognosezeiträume ist unter Ausschluss starker Ereignisse auch die Verteilung der seismischen Energie über kurze zeitliche Distanzen teilweise möglich. Allerdings ist die Vorhersage der seismischen Energie als nicht so gelungen zu betrachten, wie die Prognose der Ereignisanzahl. Der Einfluss der Geologie wird bei der vorgestellten Prognosemethode nicht berücksichtigt. Dieses wird bei der Untersuchung der Doppelbetriebe (8.7 Ost / 8.8 Ost und 8.9 Ost / 8.10 Ost) deutlich, bei denen die Ereignisse vom Typ 1 stark zurückgingen, bevor die Ereignisse vom Typ 2 und Typ 4 auftraten. Durch kurze Berechnungs- und Prognosezeiträume kann dieser Effekt reduziert werden.

Für das Auftreten starker Ereignisse konnten an zwei Bauhöhen (BW Saar, Flöz Gran-geleisen, 20.3 Ost und BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704), die in durchbauten Gebirge lagen, Risikozeitzone abgeschätzt werden, in dem die lokalen Maxima der Indizeverteilung betrachtet wurden. Auch für die beiden Doppelbetriebe (8.7 Ost / 8.8 Ost und 8.9 Ost / 8.10 Ost) konnte durch die lokalen Maxima der modifizierten Indizes Bereiche erkannt werden, in denen es häufig zu Typ 4 Ereignissen kam.

# 6 Untersuchungen zur erschütterungsmindernden Abbauplanung

Die Frage, ob durch eine veränderte Abbauführung möglicherweise Einfluss auf das Auftreten und die Intensität seismischer Ereignisse genommen werden kann, ist Gegenstand dieses Kapitels. Dabei sollen die Ergebnisse aus den Kapiteln (2) und (5) verwendet werden. Eine Aussage für alle Abbausituationen kann hierbei nicht erwartet werden. Insbesondere seismische Ereignisse, die in einem engen Zusammenhang mit dem Vorhandensein einer speziellen geologischen Ausprägung auftreten, können mit dem in Kapitel (5) verwendeten Modell nicht vorausgesagt werden. Dies gilt auch für die vorgestellten Prognosemodelle aus Polen.

## 6.1 Mögliche Einflussfaktoren

Einer möglichen Einflussnahme auf die Erschütterungssituation durch den Bergbaubetriebenden sind sowohl natürliche als auch betriebswirtschaftliche Grenzen gesetzt. Die natürlichen Faktoren liegen in der Lage der Kohlenflöze sowie der umgebenden Geologie im Handenden und Liegenden der Bauhöhe begründet und können durch den Menschen nicht verändert werden. Hier existiert gegebenenfalls nur die Möglichkeit den Zuschnitt des Abbaus zu ändern. Nach bereits erfolgtem Zuschnitt können Veränderungen hingegen in gewissem Maße bei der zeitlichen Abbauführung vorgenommen werden, indem z. B. ein gleichmäßiger Abbaurhythmus angestrebt wird. Durch mögliche Ausfälle von Maschinen und notwendige Reparaturschichten kann dieses jedoch nur begrenzt umgesetzt werden.

Der Abbaurhythmus ist insbesondere auch für die Bergschadensproblematik von großem Belang. So untersucht z. B. *Sroka* ([Srok99], 1999) den Einfluss von Stillständen und Abbaugeschwindigkeit auf das Bergschadensaufkommen. Auch *Knufinke* ([Knuf02], 2002) nimmt zu diesem Thema Stellung. Dass sich Änderungen der Abbaugeschwindigkeit sehr schnell bis an die Tagesoberfläche auswirken, ist z. B. bei *Knothe* und *Popiolek* ([Knot03], 2003) zu erkennen. So reduzieren sich z. B. die Senkungszunahmen an der Tagesoberfläche bei einem Stillstand am Wochenende innerhalb von 1-2 Tagen. Innerhalb des Gebirges treten die Auswirkungen eines Abbaustopps in Abhängigkeit des vertikalen und horizontalen Abstands zur Abbaufont noch schneller auf. Für die seismischen Ereignisse wurde in Abschnitt (2.7) gezeigt, dass insbesondere der Typ 1 dem aktuellen Abbaugeschehen unmittelbar folgt. Für die Typen 2 und 4 konnte dies aufgrund geringer Datenmengen nicht aufgezeigt werden. Bei längeren Stillständen über gut einen Monat konnte im Ostrava-Karviná Kohlengebiet (*Holub* ([Holu00], 2000)) ebenfalls ein Rückgang der Seismizität festgestellt werden.

Die Zusammenhänge zwischen Stillstandszeiten und einer Reduzierung der Ereignisanzahl bei einer Vielzahl von Ereignissen (z. B. Typ 1 Ereignisse im Saarland) zeigen, dass

die zeitliche Abbauführung einen wichtigen Ansatzpunkt für die Einflussnahme auf das Auftreten der Ereignisse darstellt. Gleichzeitig ist aber nicht auszuschließen, dass es während der gesamten Dauer eines Stillstandes zu Erschütterungen kommt, wie in Abschnitt (2.7) gezeigt wurde. Trotzdem kann z. B. ein nächtlicher Abbaustopp das Risiko einer Erschütterung vom Typ 1 in der Nacht stark reduzieren (vgl. Kapitel (2)).

## 6.2 Einfluss der Abbauart und des Abbaurhythmus

Verzweifelt sich mit einer Verdopplung des Abbaufortschritts auch die Erschütterungsanzahl, wie es in Abbildung (2.8) der Fall ist, so kann möglicherweise Einfluss auf das zeitliche Auftreten genommen werden, aber eine Reduzierung der Erschütterungsanzahl mittels des Abbaufortschritts über die gesamte Abbauphase ist nicht möglich. Für die Bevölkerung ist neben der Anzahl vielmehr die Erschütterungsintensität von Bedeutung. Ob das Auftreten sehr starker Ereignisse gegebenenfalls vermieden werden kann, wird im Folgenden durch Variieren der zeitlichen Abbauführung untersucht, indem ein gleichmäßiger Abbaufortschritt über eine fünf Tage Woche bzw. sechs Tage Woche angenommen wird. Dies wird auf die beiden Messfälle angewandt, die bereits in Abschnitt (5.4) behandelt wurden. Bei beiden Bauhöhen wurden Abbaukanten und Restfesten unterfahren und ein Zusammenhang zwischen der berechneten Indizeverteilung und dem Auftreten starker seismischer Ereignisse vermutet (vgl. Abbildungen (5.10) und (5.11)).

Da ein Abbau nicht unter veränderten Bedingungen erneut geführt werden kann, können die Auswirkungen nur mittels Modellrechnungen untersucht werden. Dazu werden die Indizes mit den gedachten abgewandelten Abbaubedingungen neu berechnet, und die neue Indizeverteilung mit der ursprünglichen Verteilung verglichen. Der Vergleich kann anschließend einen Hinweis dafür liefern, ob die veränderte Abbauführung zu einer Reduzierung der starken Erschütterungen beitragen könnte. Zukünftig könnte an laufenden Abbauen, bei denen es zu starken Erschütterungen kommt, die Richtigkeit dieses Vorgehens überprüft werden.

Für die Berechnung der Indizes (5.1) wird neben dem abgebauten Volumen und den durch die Altbaubau induzierten vertikalen Spannungen die zeitliche „Ableitung“ der durch den laufenden Abbau induzierten vertikalen Zusatzspannungen verwendet. Deshalb wurde untersucht, ob sich eine gleichmäßige Abbauführung, die Beschleunigungen verhindern soll, auch auf die zeitliche Änderung der vertikalen Zusatzspannungen auswirkt. Dies hätte somit Einfluss auf die Indizes. Für die Untersuchungen wurde der im betrachteten Zeitraum erzielte Abbaufortschritt gleichmäßig auf eine fünf bzw. sechs Tage Woche aufgeteilt. Die in Abschnitt (5.4) gefundenen Schwellenwerte  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  sowie der Abstand  $r$  wurden bei den Berechnungen beibehalten, um einen Vergleich mit der ursprünglichen Indizeverteilung zu ermöglichen.

Die Abbildung (6.1) zeigt die Verteilung der Indizes über die Zeit für die veränderten Abbaubedingungen für den ersten Messfall aus Abschnitt (5.4). Bei einer kontinuierlichen sechs Tage Woche werden nur an zwei Tagen Indizes größer Null berechnet. Indizes größer Null bzw. lokale Maxima der Indizeverteilung wurden in Abschnitt (5.4) als Hinweis gedeutet, dass starke Ereignisse möglich sind. Für eine fünf Tage Woche werden an fast genauso vielen Tagen Werte größer Null berechnet wie bei dem ursprünglichen Abbaurhythmus, allerdings sind die Werte wesentlich geringer. Ob somit bei einer sechs Tage Woche fast keine bzw. weniger starke seismische Ereignisse aufgetreten wären, kann nur vermutet werden. In dem vorgestellten Messfall in Abschnitt (2.6) kam es durch einen

gleichmäßigen Abbau zwar zu einer Reduzierung der Intensität der starken Erschütterungen, hingegen aber zu einer Erhöhung der Ereignisanzahl. Wenn die Indizewerte mit der seismischen Energie in diesem Beispiel zusammenhängen, so könnten bei einer fünf bzw. sechs Tage Woche mit gleichmäßigem Abbaufortschritt die Intensitäten der starken Ereignisse möglicherweise reduziert werden.

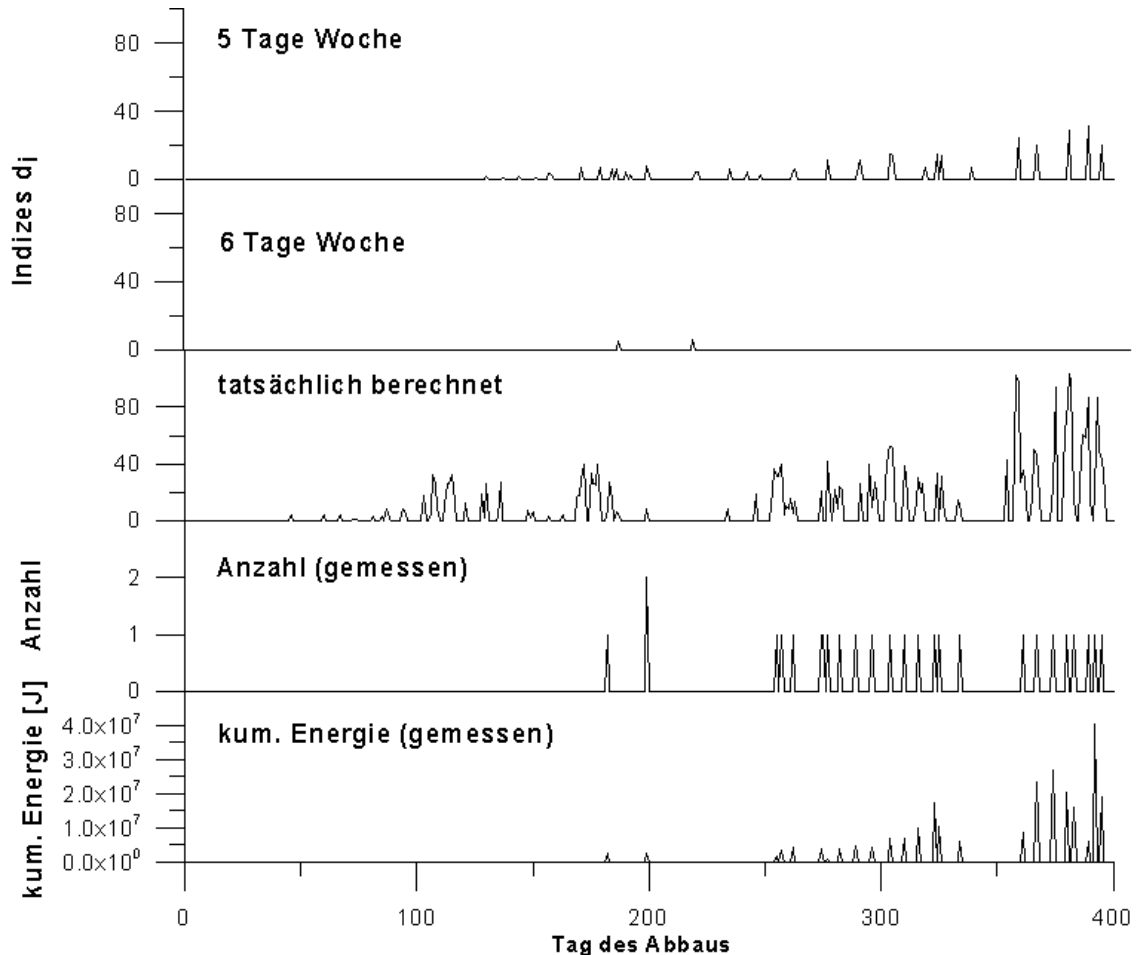


Abb. 6.1: Darstellung der Erschütterungssituation mit den berechneten Indizes  $d_i$  für den ersten Messfall aus Abschnitt (5.4)

Die Abbildung (6.1) beinhaltet zusätzlich die Information, dass sich täglich bzw. häufig wechselnde Abbaugeschwindigkeiten, und somit ständig stark variierende Beschleunigungen, auf die Indizes auswirken.

Für den zweiten Messfall aus Abschnitt (5.4) wurde ebenfalls der Abbaufortschritt auf eine gleichmäßige fünf Tage Woche bzw. sechs Tage Woche aufgeteilt und die Indizes berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung (6.2) wiedergegeben.

Auch in diesem Messfall ist der Einfluss der veränderten Abbaubedingungen erkennbar. Erneut sind die Werte der Indizes geringer als bei den ursprünglichen Berechnungen. Ferner berechnen sich die Indizes an fast allen Tagen zu Null. Da bei dieser Bauhöhe zu Beginn des Abbaus mehrere starke seismische Ereignisse stattfanden, aber keine Indizewerte größer Null berechnet worden sind, hätte eine Veränderung des Abbaurhythmus zu Beginn des Abbaus wahrscheinlich keinen Einfluss gehabt. Deutlich wird abermals der Einfluss eines gleichmäßigen Abbaufortschritts auf die Indizes.

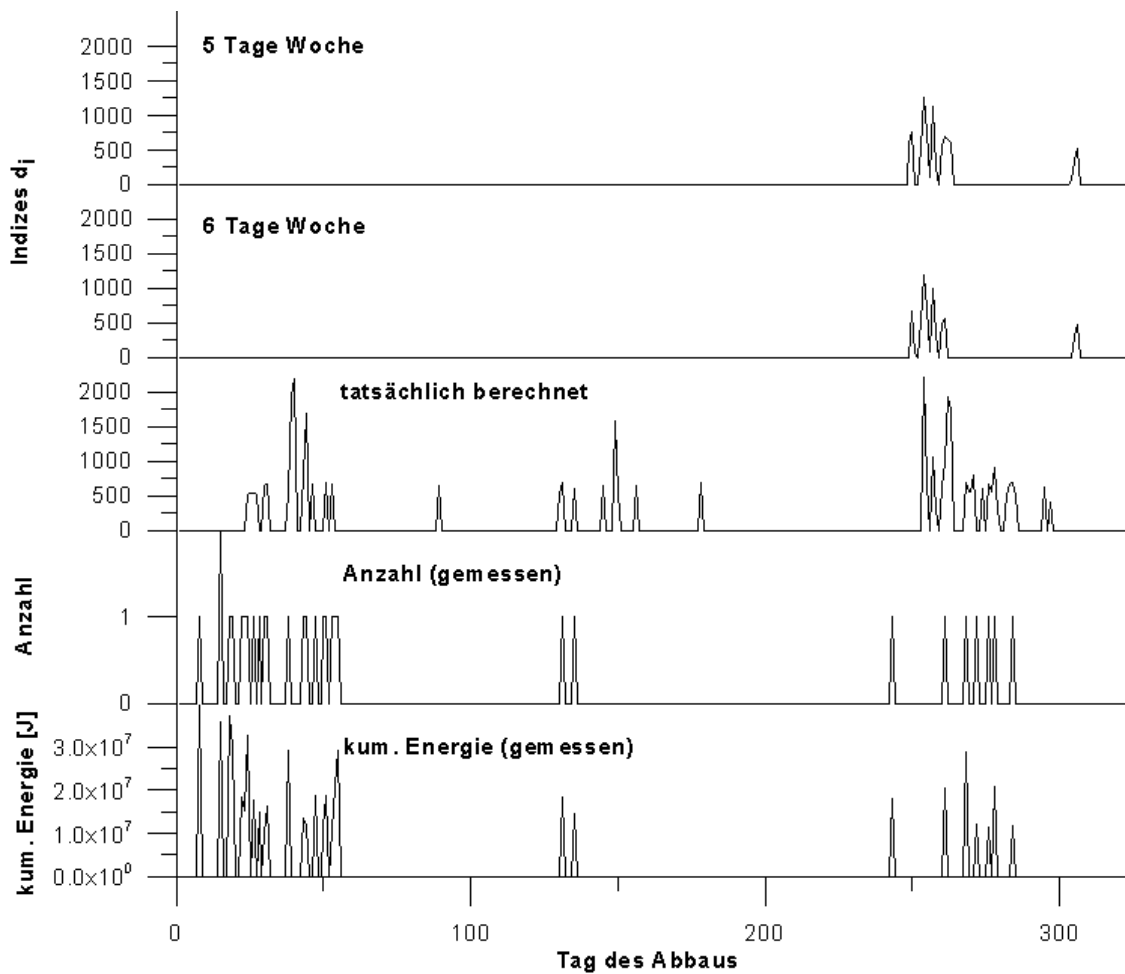


Abb. 6.2: Darstellung der Erschütterungssituation mit den berechneten Indizes  $d_i$  für den zweiten Messfall aus Abschnitt (5.4)

Die veränderten Abbausituationen stellen idealisierte Abbaubedingungen dar. Eine fünf bzw. sechs Tage Woche mit immer gleichen Abbaufortschritten pro Tag ist kaum praktikabel, da es durch Ausfälle der Maschinen oder Wartungsarbeiten häufiger zu Unterbrechungen kommt. Trifft die Vermutung zu, dass die Indizes einen Hinweis für das Auftreten starker Ereignisse liefern, dann muss aus den obigen Untersuchungen der Schluss gezogen werden, dass für die Vermeidung starker seismischer Ereignisse ein möglichst gleichmäßiger Abbaufortschritt, wenn es geht über eine sechs Tage Woche, geführt werden sollte. Dieses wird auch durch den in Abschnitt (2.6) zitierten Messfall von *Stocks* und *Matern* ([Stoc03], 2003) untermauert, die durch eine Vergleichmäßigung des Abbaufortschritts eine Reduzierung der freigesetzten seismischen Energie erreichen konnten.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im deutschen Steinkohlenbergbau kommt es bei fast allen Bauhöhen zu seismischen Ereignissen, die aufgrund unterschiedlicher Intensitäten entweder nur von Messgeräten erfasst werden können oder zum Teil auch für die Bevölkerung in Form von Erderschütterungen wahrnehmbar sind. Die Wahrnehmbarkeit ist dabei auch von der momentanen Tätigkeit der einzelnen Personen abhängig und in Ruhe besonders hoch. Die seismischen Ereignisse treten während der Abbauphase über den ganzen Tag und die gesamte Woche auf, so dass es auch während der Nacht zu Erderschütterungen kommt. Eine Literaturstudie und eigene Untersuchungen ergaben, dass sich die seismischen Ereignisse im deutschen Steinkohlenbergbau mit dem aktuellen Abbaugeschehen korrelieren lassen. An vier Bauhöhen konnte dieser Zusammenhang genauer untersucht werden, indem die Dauer der Kohlenförderung dem Auftreten seismischer Ereignisse gegenübergestellt wurde. Hierzu lagen die Stillstandsberichte dieser vier Bauhöhen vor. Auffällig war dabei die starke Abnahme der Ereignisanzahl zu Beginn des Stillstandes und umgekehrt der schnelle Anstieg der Ereignisanzahl bei erneutem Anfahren.

Ferner ermöglichten die Stillstandsberichte eine Untersuchung, nach welcher Stillstandsdauer es vermutlich zu keinen weiteren seismischen Ereignissen mehr kommt. Hierbei stellte sich heraus, dass es während der üblichen Stillstände zu Ereignissen kommen kann, wobei es in der Anfangszeit des Stillstandes vermehrt der Fall ist. Nach zwei bis drei Tagen kommt es der Erfahrung nach zu keinen weiteren seismischen Ereignissen.

Alle Ereignisse im deutschen Steinkohlenbergbau gehören zu den abbaubegleitenden Ereignissen. Es existieren weitere auf Bruchmechanismen beruhende Einteilungen. Hierbei werden zwei unterschiedliche Scherbrüche (Typ 2 und Typ 4) und ein nicht Scherbruch (Typ 1) beobachtet. Für die unterschiedlichen Typen wurden Ereignisorte im Hangenden (Typ 1 und Typ 2) und im Liegenden (Typ 4) ermittelt. Der enge Zusammenhang zwischen der Ereignisanzahl und den Stillstandszeiten bzw. der Kohlenförderung konnte in der vorliegenden Arbeit für die Ereignisse vom Typ 1 anhand eines Doppelbetriebs (BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost) nachgewiesen werden. Für diesen Messfall konnten über 90% der Ereignisse zum Typ 1 gezählt werden, was ähnlich auch für den aktuellen Doppelbetrieb (BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.9 Ost / 8.10 Ost) gilt. Für die wesentlich selteneren Typen 2 und 4 kann aufgrund der geringen Anzahl an Ereignissen keine endgültige Aussage getroffen werden. Bei den untersuchten Bauhöhen aus dem Ruhrbergbau ergibt sich ebenfalls eine enge Korrelation zwischen dem aktuellen Abbaugeschehen und dem Auftreten seismischer Ereignisse. Zusätzlich konnte für einen Messfall (BW Ost, Flöz Wilhelm, W751) gezeigt werden, dass eine Verdopplung der Abbaugeschwindigkeit einer Zunahme der seismischen Ereignisse um den Faktor zwei entsprach. Somit wurde bei der Bauhöhe W751 pro abgebautem Volumen im Mittel immer dieselbe Anzahl an seismischen Ereignissen induziert. Eine Reduzierung der gesamten Ereignisanzahl über eine Veränderung des Abbaufortschritts ist in solchen Fällen nicht möglich.

Für die Beurteilung der Auswirkungen von Erschütterungen auf Gebäude nach DIN 4150-3 wird die Schwinggeschwindigkeit des Untergrundes am Sensorort verwendet. Da

die Schwinggeschwindigkeit einen Wert für den Aufnahmeort wiedergibt und für unterschiedliche Orte variiert, kann damit kein eindeutiger Wert für das seismische Ereignis festgelegt werden. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit die Stärkemaße lokale Magnitude und die genauere und in der Ingenieurseismologie üblichere seismische Energie eingeführt. Für die weiteren Betrachtungen wurde die seismische Energie verwendet, die sich aus den Seismogrammen berechnen lässt. Da nicht alle Ereignisse von der Bevölkerung verspürt werden, oder ein Schadenspotenzial für die umliegende Bebauung darstellen, sind insbesondere starke Ereignisse bei der Untersuchung seismischer Ereignisse von Interesse.

Aus der Literatur ist bekannt und zusätzlich konnte an Messfällen gezeigt werden, dass sich die seismische Energie der Ereignisse häufig erhöht, wenn Abbaukanten und Restfesten unterfahren werden. Das Auftreten starker seismischer Ereignisse kann darüber hinaus durch spezielle geologische Verhältnisse begünstigt werden, wie dies z. B. bei den vorgestellten Doppelbetrieben (BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost und 8.9 Ost / 8.10 Ost) im Saarland der Fall war. Für Ereignisse geringerer Stärke konnte an einer Bauhöhe (BW Ost, Flöz Wilhelm, W751) ein enger Zusammenhang zwischen dem abgebauten Volumen und der freigesetzten seismischen Energie festgestellt werden. Dieser Zusammenhang wird auch in der Literatur angenommen, und bildet die Grundlage für ein polnisches Prognosemodell, das in dieser Arbeit vorgestellt wurde. Ein weiteres ebenfalls in Polen angewandtes Prognosemodell bezieht den Einfluss der Altabbau mit in die Vorhersage ein. In der Literatur ist dazu eine mögliche Übertragbarkeit für den deutschen Steinkohlenbergbau zu finden, dieses gilt insbesondere für die Ereignisanzahl. Da für die Beispiele in der Literatur keine täglichen Abbaufortschritte vorlagen, wurde die Übertragbarkeit des zweiten Prognosemodells erneut an einer Bauhöhe (BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704) überprüft. Im Vordergrund stand dabei die Frage, ob eine Prognose der Energie bzw. der Ereignisanzahl schon durch kurze Berechnungszeiträume von sieben Tagen bei täglich vorliegenden Abbaufortschritten möglich ist. Für die seismische Energie ergaben sich keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die Ereignisanzahl der Prognose zeigte in Differenz zu der tatsächlich registrierten Anzahl teilweise nur geringe Abweichungen, so dass für den vorgestellten Zeitraum von einer guten Prognose für die Ereignisanzahl gesprochen werden konnte.

Die untertägige Förderung von Kohle zieht Spannungsumlagerungen im gesamten umgebenden Gebirgskörper nach sich. Insbesondere im Strebvorfeld kommt es zu einem Anstieg der vertikalen Zusatzspannungen auf ein Vielfaches der vorherigen Spannungsverhältnisse. Der Literatur sind Zusammenhänge zwischen seismischen Ereignissen und ihrer Energie auf der einen Seite sowie dem Maximum der vertikalen Spannungen auf der anderen Seite zu entnehmen. Dieses führte zu der Annahme, mittels einer Berechnung der vertikalen Zusatzspannungen über ein dynamisches Gebirgsbewegungsmodell zu einem neuem Prognoseverfahren zu gelangen. Dazu wurde ein bestehendes Gebirgsbewegungsmodell um eine Zeitfunktion erweitert. Somit ist eine dynamische Berechnung der Senkung und daraus ableitbarer Bewegungen möglich. Das Auftreten starker seismischer Ereignisse im Liegenden eines Abbaus machte es zusätzlich notwendig, neben den Gebirgsbewegungen des oberhalb des Abbaus befindlichen Gebirgskörpers auch die Gebirgsbewegungen im Liegenden berechnen zu können. Dazu wurde in dieser Arbeit ein Modell entwickelt, welches eine Analogie zur Senkungsberechnung aufweist. Allerdings musste eine Zeitfunktion bestimmt werden, die der Abnahme der Hebungen nach Erreichen des Hebungsmaximums gerecht wird. Sowohl das Senkungs- sowie das Hebungsmodell konnten anhand realer Messfälle verifiziert werden.

Die Prognosemöglichkeit über die Betrachtung der vertikalen Spannungen wurde anhand von vier Messfällen untersucht. Bei genügend großer Anzahl seismischer Ereignisse konnte eine Prognose über Regressionsparameter vorgenommen werden, indem eine Regression zwischen der Ereignisanzahl bzw. der seismischen Energie und definierten Indizes berechnet wurde. Bei geringer Ereignisdichte konnte die zeitliche Verteilung der Indizes mit dem zeitlichen Verlauf der seismischen Ereignisse verglichen werden.

Dazu wurden zunächst zwei Bauhöhen (BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704 und BW Saar, Flöz Grangeleisen, 20.3 Ost) in durchbautem Gebirge betrachtet. Bei der Bauhöhe S704 lag eine hohe Ereignisanzahl vor. Für diesen Messfall war eine Prognose der Ereignisanzahl über einen längeren Zeitraum möglich, wenn die 6% der stärksten Ereignisse mit einer Energie größer  $10^7 J$  außer Acht gelassen wurden. Eine Prognose der seismischen Energie der „schwächeren“ Ereignisse für die selbe Bauhöhe war nur möglich, wenn die Prognosezeiträume deutlich verkürzt wurden. Dabei konnte der zeitliche Verlauf der Freisetzung der Energie gut vorhergesagt werden. Die Prognose der starken Ereignisse war über eine Regressionsrechnung aufgrund der geringen Anzahl an Ereignissen nicht möglich. Hierzu wurden Indizes durch Schwellenwerte eingeschränkt, die allerdings die berechneten Gebirgsbewegungen nicht beeinflussen. Durch die Schwellenwerte konnten Zusammenhänge zu dem Auftreten der starken seismischen Ereignisse und den Indizes erkannt werden. Dies galt darüber hinaus für die zweite Bauhöhe 20.3 Ost. Auch für diesen Messfall ist ein Zusammenhang zwischen den Indizes und dem Auftreten starker Ereignisse ( $\geq 7 \cdot 10^5 J$ ) zu vermuten, da es häufig zu einer zeitlichen Übereinstimmung zwischen lokalen Maxima der Indizeverteilung und starken seismischen Ereignissen gekommen ist.

Zwei weitere Messfälle (BW Saar, Flöz Schwalbach, 8.7 Ost / 8.8 Ost und 8.9 Ost / 8.10 Ost) betrafen Bauhöhen, über denen zuvor kein Abbau betrieben wurde. Kennzeichnend für diese Bauhöhen waren sehr viele Ereignisse vom Typ 1 und das zeitlich begrenzte Erscheinen von Typ 2 und Typ 4 Ereignissen, wobei die Typ 4 Ereignisse im Liegenden geortet werden konnten und durch eine spezielle Geologie begünstigt waren. Die Ereignistypen unterscheiden sich erheblich in der freigesetzten seismischen Energie. Diese war insbesondere bei den Typ 4 Ereignissen vergleichsweise groß. Kurze etwa gleichlange Berechnungs- und Prognosezeiträume ermöglichten auch bei diesen Messfällen eine gute Vorhersage der Anzahl der seismischen Ereignisse in diesem Fall des Typs 1. Lange Prognosezeiträume von mehreren Monaten waren nicht möglich. Ebenfalls konnten die Parameter des einen Doppelbetriebs (8.7 Ost / 8.8 Ost) nicht auf den nachfolgenden Doppelbetrieb (8.9 Ost / 8.10 Ost) übertragen werden.

Auch wenn Typ 4 Ereignisse für die betrachteten Messfälle stark von der geologischen Ausprägung abhängig waren, so konnten durch Bestimmung von Indizes im Liegenden der Abbaue erneut Übereinstimmungen zwischen lokalen Maxima der Indizes und dem zeitlichen Auftreten der Typ 4 Ereignisse gefunden werden. Bei dem zweiten Doppelbetrieb (8.9 Ost / 8.10 Ost) war ein Zusammenhang zwischen der Änderung der Abbaugeschwindigkeit und der Indizeverteilung zu erkennen. Dieses lässt vermuten, dass sich eine möglichst gleichmäßige Abbaugeschwindigkeit positiv auf die Erschütterungssituation auswirkt.

Eine Abschätzung bezogen auf das zeitliche Auftreten der Ereignisse vom Typ 2 und Typ 4 für den Doppelbetrieb 8.7 Ost / 8.8 Ost und den starken Ereignissen für die Bauhöhe 20.3 Ost wurde zusätzlich vorgenommen, indem die zeitliche Differenz zum vorherigen Ereignis berechnet wurde. Eine Klasseneinteilung ergab anschließend, dass für die Bauhöhe 20.3 Ost 64% der Ereignisse innerhalb einer Woche auf das jeweils vorherige Ereignis folgten. Für den Doppelbetrieb konnte die Klasseneinteilung verfeinert werden. Hier fan-



den über den gesamten Zeitraum 73% der Ereignisse innerhalb der ersten 3 Tage seit dem vorherigen Ereignis statt. Eine Änderung der zeitlichen Abbauführung mit einem nächtlichen Abbaustopp schien die Situation für diesen Doppelbetrieb zu verbessern, da anschließend nur noch 56% der Ereignisse in die ersten 3 Tage fielen.

Abschließend wurde untersucht, ob die Indizeverteilung durch eine gleichmäßige Abbauführung beeinflusst wird. Hierzu wurden die Bauhöhen (BW Ost, Flöz Sonnenschein, S704 und BW Saar, Flöz Grangeleisen, 20.3 Ost) betrachtet, die in durchbautem Gebirge lagen und bei denen ein Zusammenhang zwischen starken seismischen Ereignissen und den lokalen Maxima der Indizes vermutet wurde. Ein gleichmäßiger Abbaurhythmus wurde dadurch simuliert, dass der aufgelaufene Abbaufortschritt über den gleichen Zeitraum gleichmäßig auf eine fünf bzw. sechs Tage Woche aufgeteilt wurde. Bei beiden Messfällen konnte festgestellt werden, dass sich durch dieses Vorgehen die Werte der Indizes reduzieren und sich an einigen Tagen zu Null berechnen. Dabei ist dieser Effekt bei einer sechs Tage Woche stärker. Aus diesen Untersuchungen kann die Vermutung erfolgen, dass eine Vermeidung von Beschleunigungen sich wahrscheinlich positiv auf eine Reduzierung starker seismischer Ereignisse auswirkt. Als gesichert kann angesehen werden, dass die Werte der Indizes stark von der zeitlichen Abbauführung abhängig sind.

Die Zusammenhänge zwischen der berechneten Indizeverteilung und starken seismischen Ereignissen sowie einer möglichen Beeinflussung durch die zeitliche Abbauführung können als ein Ansatzpunkt zukünftiger Untersuchungen dienen. Dabei muss es darum gehen, Gefahrenzonen laufender Abbaue zu erkennen und durch eine Berechnung der Indizes mit veränderten Abbaubedingungen Möglichkeiten zur Einflussnahme auf diese Gefahrenzonen zu finden. Bei einem laufenden Abbau könnten die Auswirkungen veränderter Abbaubedingungen direkt überprüft werden.



# Literaturverzeichnis

- [Aki02] K. Aki, P. G. Richards: *Quantitative Seismology*. University Science Books, Sausalito, Canada, second edition, 2002.
- [Bank00] P. Bańka: *Dependence of induced seismicity on the changes of rock mass deformation state defined in the function of time*. In Acta Montana IRSM AS CR, Series A No. 16 (118), S. 7-16, 2000.
- [Baro] H. Baron: *Schachtbeanspruchungen beim Abbau eines Schachtsicherheitspfeilers unter mächtigem Deckgebirge*. Dissertation, Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1951.
- [Beuth] Beuth-Verlag: *DIN-Taschenbuch 289: Schwingungsfragen im Bauwesen*. Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [Bore72] M. Borecki, M. Chudek: *Gebirgsmechanik (polnisch)*. Verlag Śląsk, Katowice, 1972.
- [Bosc] K. Bosch: *Elementare Einführung in die angewandte Statistik, 7. Auflage*, Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 2000.
- [Brad93] B. H. G. Brady, E. T. Brown: *Rock mechanics for underground mining*. Chapman & Hall, London, second edition, 1993.
- [Brau64] G. Bräuner: *Zusatzdruck und Entlastung unter dem Abbau flachgelagerter Steinkohlenflöze*. In: Bergbau-Archiv 25, Heft 3, 1964.
- [Brau94] G. Bräuner: *Rockbursts in Coal Mines and their prevention*. A. A. Balkema, Rotterdam, 1994.
- [Cook76] N. G. W. Cook: *Seismicity associated with mining*. In: Engineering Geology, 10, S. 99-122, 1976.
- [Drez79] B. Drzeźła: *Die Änderung des Vollflächenradius im Gebirge (polnisch)*. In: Przegląd gór., Nr. 10, 1979.
- [Drez97] B. Drzeźła, J. Białek, A. Jaworski, P. Bańka: *Scientific description on chosen prediction methods applied in Poland*. Gliwice, 1997.
- [Drez99] B. Drzeźła, J. Białek, A. Jaworski, P. Bańka: *Prediction of seismicity changes in time basing on rockmass deformations induced by mining*. Gliwice, 1999.
- [Dzeg] B. Dzegniuk, Z. Niedojadło, A. Sroka: *Podstawy wymiarowania i eksploatacji szybowych filarów ochronnych (Grundlagen zur Bemessung und zum Abbau von Schachtsicherheitspfeilern)*. In: Proceedings of the School of Underground Mining 2003, Cracow, S. 77-93, 2003.

- [Ehrh] W. Ehrhardt, A. Sauer: *Die Vorausberechnung von Senkung, Schiefelage und Krümmung über dem Abbau in flacher Lagerung*. Bergbauwissenschaften (8), 1961.
- [Frit99] R. Fritschen, E. Räkers, A. Preuße, K.-H. Brandt: *Seismic events due to underground mining activities*. In: Proceedings of the 18th International Conference on Ground Control in Mining, 1999.
- [Frit] R. Fritschen: *Prognose von bergbauinduzierten Erderschütterungen im deutschen Steinkohlenbergbau*. Dissertation Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2001.
- [Frit03] R. Fritschen: *Messtechnische Erfassung von Erderschütterungen im deutschen Steinkohlenbergbau*. In: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2003-1 (4. Geokinemat. Tag). S. 82-88, 2003.
- [Frit04] R. Fritschen, F.-J. Kirsch, A. Sroka: *Erberschütterungen - Erfahrungen, bisherige Erkenntnisse und weitere Entwicklungen am Beispiel des Bergwerks Ost*. In: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2004-2 (5. Geokinemat. Tag). S. 172-181, 2004.
- [Gibo90a] S. J. Gibowicz: *Keynote lecture: The mechanism of seismic events induced by mining, A review*. In: C. Fairhurst (Hrsg.): *Rockbursts and seismicity in mines*, Rotterdam / Brookfield (A. A. Balkema), S. 3-27, 1990.
- [Gibo94] S. J. Gibowicz, A. Kijko: *An Introduction to Mining Seismology*, Academic Press, New York, 1994.
- [Glow89] E. Glowacka, A. Kijko: *Continuous Evaluation of seismic hazard induced by the deposit extraction in selected coal mines in Poland*. In: *Pure and Applied Geophysics (Pageoph)*, Volume 129 (1989), No. 3/4, S. 523-533, Birkhäuser Verlag, Basel, 1989.
- [Glow92] E. Glowacka: *Application of the extracted volume of a deposit as a measure of deformation for seismic hazard evaluation in mines*. In: *Tectonophysics*, 202, S. 285-290, 1992.
- [Glow93] E. Glowacka: *Excavated volume and long-term seismic hazard evaluation in mines*. In: R. P. Young (Ed.): *Rockbursts and seismicity in mines*, Rotterdam / Brookfield (A. A. Balkema), S. 69-73, 1993.
- [Goer] P. Goerke-Mallet: *Das Konvergenzverhalten langlebiger Grubenbaue in großer Teufe bei Über- und Unterbauung*. In: *Das Markscheidewesen* 101 (1994), Nr. 3, S. 85-91.
- [Hart] J. Hartung, B. Elpelt, K.-H. Klösener: *Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 7. durchgesehene Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1989.
- [Hase89] H. S. Hasegawa, R. J. Wetmiller, D. J. Gendzwill: *Induced seismicity in Mines in Canada - An Overview*. In: S. J. Gibowicz (Ed.), *Seismicity in Mines* (Reprint from *Pure and Applied Geophysics (Pageoph)*, Volume 129 (1989), No. 3/4), Birkhäuser Verlag, Basel, S. 423-453, 1989.
- [Hege02] M. Hegemann: *Ein Beitrag zur Vorausberechnung horizontaler Bodenbewegungen im Steinkohlenbergbau*. Dissertation Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2002.

- [Hejm] R. Hejmanowski: *Zur Vorausberechnung förderbedingter Bodensenkungen über Erdöl- und Erdgaslagerstätten*. Dissertation Technische Universität Clausthal, 1993.
- [Hin82] K.-G. Hinzen: *Source parameters of mine tremors in the eastern part of the Ruhr-District (West-Germany)*. In: Journal of Geophysics, 51 Jg. , S. 105-112, 1982.
- [Holu00] K. Holub: *The influence of temporary mining interruption on induced seismicity*. In: Acta Montana IRSM AS CR, Series A, No. 16, 118, S. 61-70, 2000.
- [John90] J. C. Johnston, M. H. Einstein: *A survey of mining associated seismicity*. In: C. Fairhurst (Hrsg.): *Rockbursts and seismicity in mines*, Rotterdam / Brookfield (A. A. Balkema), S. 121-125, 1990.
- [Kate] H.-J. Kateloe: *Lineare Modellierung der durch Abbaugeschwindigkeit und Abbaustillstände charakterisierten zeitlichen Senkungsmulde in einem stochastischen Medium*. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2002.
- [Kijk] A. Kijko: *Theoretical model for a relationship between mining seismicity and excavation area*. In: Acta Geophysica Polonica, Vol. 33 (3), 1985.
- [Kijk97] A. Kijko: *Keynote lecture: Seismic hazard assessment in mines*. In: S. J. Gibowicz und S. Lasocki (Hrsg.): *Rockbursts and seismicity in mines*, Rotterdam / Brookfield (A. A. Balkema), S. 247-256, 1997.
- [Kirs] F.-J. Kirsch: *Hebungsbeobachtungen bei der Überbauung einer Vollschnittmaschinenstrecke*. In: Das Markscheidewesen 105 (1998), Nr. 2, S. 169-172.
- [Knol80] P. Knoll, K. Thoma, E. Hurtig: *Gebirgsschläge und seismische Ereignisse in Bergbaugebieten*. In: Rock Mechanics, Suppl. 10, S. 85-102, 1980.
- [Knol84] P. Knoll, W. Kuhnt, E. Hurtig, H. Grosser: *Herdparameter schwacher seismischer Ereignisse in Bergbaugebieten und der Zusammenhang mit Bruchvorgängen in den Herdregionen*. In: Gerlands Beiträge zur Geophysik, Leipzig 93, 3, S. 161-172, 1984.
- [Knop77] L. Knopoff, Y. Kagan: *Analysis of the theory of extremes as applied to earthquake problems*. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 36, 1977.
- [Knot] S. Knothe: *Observations of surface movements under influence of mining and their theoretical interpretation*. Proceedings of the European Congress on Ground Movement, Leeds, 1957.
- [Knot03] S. Knothe, E. Popiołek: *Einfluss der Stillstandzeiten der Abbaufrent auf den Verlauf von Deformationen des Gebirges anhand der Beobachtungen*. In: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2003-1 (4. Geokinematischer Tag). S. 25-34, 2003.
- [Knuf02] P. Knufinke: *Abbaugeschwindigkeit und Kontinuität des Gewinnungsvorgangs im tiefen Steinkohlenbergbau im Hinblick auf unter- sowie übertägige Auswirkungen*. In: Markscheidewesen 109, Nr. 3, S. 89-93, 2002.
- [Kori02] N. Korittke, G. Palte: *Nutzung des NAVSTAR-GPS-Systems bei Messungen nach §125 Bundesberggesetz*. In: DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, 2002.

- [Krat86] H. Kratzsch: *Studie über die Anwendbarkeit eines polnischen Verfahrens zur Berechnung zeitlicher Bodensenkungen im Ruhrbergbau*. In: Das Markscheidewesen 93 (1986) Nr.2, S. 219-226.
- [Krat97] H. Kratzsch: *Bergschadenkunde*. Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum, 1997.
- [Kusc] M. Kuschke: *Seismische Ereignisse auf einer Schachtanlage der Bergbau AG Lippe*. In: Das Markscheidewesen 97 (1990) Nr. 1, S. 379-382.
- [Kusz84] N. J. Kuszniir, N. H. Al-Saigh: *Some Observations on the Influence of Pillars in Mining-induced Seismicity*. In: N. C. Gay, E. H. Wainwright (Hrsg.): *Rockbursts and seismicity in Mines*, Johannesburg (South African national group on rock mechanics), S. 253-256, 1984.
- [Land] G. Angenheister (Herausgeber): *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik*. In: Landolt-Börnstein, Neue Serie, Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung, Band 1: Physikalische Eigenschaften der Gesteine, Teilband b, 1982.
- [Land97] Landesoberbergamt NRW: *Richtlinien des Landesoberbergamtes NRW zum Schutz vor Gefahren durch Gebirgsschläge - Gebirgsschlag-Richtlinien vom 10. November 1997*.
- [Laso93] S. Lasocki: *Statistical short-term prediction in mining induced seismicity*. In: R. P. Young (Ed.): *Rockbursts and seismicity in mines*, Rotterdam / Brookfield (A. A. Balkema), S. 211-216, 1993.
- [Loef] W. Löffler: *Lageveränderungen der Schachtsäule durch Abbau*. In: Bergbau-Archiv, 12, Heft 1, 1951.
- [McGa76] A. McGarr: *Seismic moments and volume changes*. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 81, S. 1487 - 1494, 1976.
- [McGa97] A. McGarr, D. Simpson: *Keynote lecture: A broad look at induced and triggered seismicity*. In: S. J. Gibowicz und S. Lasocki (Hrsg.): *Rockbursts and seismicity in mines*, Rotterdam / Brookfield (A. A. Balkema), S. 385-396, 1997.
- [Mehr] S. Mehrhoff: *Bergbaubedingte Erderschütterungen im Ruhrgebiet*. In: Das Markscheidewesen 97, Nr. 1, S. 383-387, 1990.
- [Preu] A. Preuß: *Markscheiderische Analyse und Prognose der vertikalen Beanspruchung von Schachtsäulen im Einwirkungsbereich untertägigen Steinkohlenabbaus*. Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, 1990.
- [Raek] E. Räkera: *Seismoakustische Ereignisse in Steinkohlenflözen als Hilfe zur Erkennung von Abbaubereichen mit erhöhten Gebirgsdrücken*. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1989.
- [Sato88] K. Sato, Y. Fujii: *Induced Seismicity Associated with Longwall Coal Mining*. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, Vol. 25, No. 5, S. 253-262, 1988.

- [Schn75] G. Schneider: *Erdbeben: Entstehung - Ausbreitung - Wirkung*. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1975.
- [Scho87] F. Schober, T. Sroka, A. Sroka: *Zum Problem der Berechnung dynamischer, bergmännisch bedingter Senkungen*. In: Das Markscheidewesen 94, Nr. 4, S. 416-424, 1987.
- [Scho88] F. Schober, T. Sroka: *Die Vorausberechnung abbaubedingter Gebirgs- und Bodenbewegungen auf einem Personal-Computer*. In: Das Markscheidewesen 95, Nr. 3, S. 102-107, 1988.
- [Spic50] H. Spickernagel: *Ein Beitrag zur Vorausberechnung und zum Ablauf der durch Abbaueinwirkungen an der Erdoberfläche und im Gebirgskörper hervorgerufenen Festpunktveränderungen I*. In: Bergbau-Rundschau, Nr. 12, S. 528-535, 1950.
- [Spic51] H. Spickernagel: *Ein Beitrag zur Vorausberechnung und zum Ablauf der durch Abbaueinwirkungen an der Erdoberfläche und im Gebirgskörper hervorgerufenen Festpunktveränderungen II*. In: Bergbau-Rundschau, Nr. 1, S. 5-13, 1951.
- [Srok78] A. Sroka: *Die Theorie von S. Knothe in der Zeit-Raum-Fassung (polnisch)*. In: Polnische Akademie der Wissenschaften, Geodäsie, 24, S. 73-85, 1978.
- [Srok85] A. Sroka, F. Schober: *Ein Beitrag zur Erfassung der Durchbauung*. In: Proceedings, VI. Int. Congr. Mine Surv., Harrogate (England), S. 634-644, 1985.
- [Srok86] A. Sroka, F. Schober: *Beitrag zur Vorausberechnung von Bodenbewegungselementen für rechteckige Abbaufelder Teil I*. In: Das Markscheidewesen 93, Nr. 4, S. 295-302, 1986.
- [Srok88] A. Sroka, F. Schober, T. Sroka: *Vorausberechnung von Gebirgsbewegungen bei geneigten flözartigen Lagerstätten unter Berücksichtigung anisotroper Gebirgseigenschaften, des Durchbauungsgrades und des zeitlichen Konvergenz- und Verzögerungsverhaltens des Gebirges*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Ha 526/15-1, Technische Universität Clausthal, 1988.
- [Srok89] A. Sroka, F. Schober: *Die mathematische Modellbildung als Mittel bergmännischer Planung*. In: Das Markscheidewesen 96, S. 331-334, 1989.
- [Srok99] A. Sroka: *Abbaugeschwindigkeit und Abbaustillstände - bergschadensrelevante Elemente der Abbaudynamik*. In: Aachener Bergschadenkundliches Kolloquium, „Bergbauinduzierte Gebirgs- und Bodenbewegungen“, 1. und 2. Juni, 1999.
- [Srok01] A. Sroka: *Gutachterliche Stellungnahme „Zur Möglichkeit der erschütterungs- und bergschadenmindernden Abbauplanung für den aktuell laufenden Abbau der Strebe 8.7-Ost und 8.8-Ost und den geplanten Abbau der Strebe 8.7-West und 8.8-West sowie der Strebe 8.9-Ost und 8.10-Ost im Flöz Schwalbach des Bergwerkes Ensdorf“*. 2001.
- [Srok05] A. Sroka: *Studie: Einfluss der abbauintuzierten Erderschütterungen auf Gebäude*. Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2005.

- [Stoc03] S. Stocks, J. Matern: *Vorhersage und Umgang mit seismischen Ereignissen auf dem Steinkohlenbergwerk Prosper-Haniel*. In: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2003-1 (4. Geokinematischer Tag), S. 116-127, 2003.
- [Syre88] B. Syrek, A. Kijko: *Energy and frequency distributions of mining tremors and their relation to rockburst hazard in Wujek coal mine, Poland*. In: Acta Geophysica Polonica, 36, S. 189-201, 1988.
- [teKo] J. te Kook: *Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben „Bessere Gebirgsbeherrschung durch Abbau- und Ausbauplanung II“*. Vertrag zwischen der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl (EGKS) und der DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Forschungsvorhaben-Nr.: 7220-AD/140, 1993.
- [Uhl04] O. Uhl, N. Polysos, R. Fritschen, B. Loske, A. Sroka: *Seismologische und geologische Untersuchungen der Erderschütterungen des Bergwerks Ensdorf*. In: Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, S. 140-157, 44. Wissenschaftliche Fachtagung des Deutschen Markscheider-Verein e.V., 15.-18 September 2004, Bochum, 2004.
- [Utsu02] T. Utsu: *Relationships between Magnitude Scales*. In: W. H.K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, C. Kisslinger (Eds.), *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A*, S. 733-746, 2002.
- [Wisn] T. Wisniewski: *Bestimmung der vertikalen Bewegungen unterhalb abgebauter Steinkohlenflöze aufgrund von in-situ-Beobachtungen (polnisch)*. Dissertation an der Berg- und Hüttenakademie Krakau, 1979.
- [Wolf04] J. Wolff: *Prognose bergbauinduzierter Erderschütterungen mittels eines dynamischen Modells zur Senkungsvorausberechnung*. In: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2004-2 (5. Geokinematischer Tag). S. 182-193, 2004.
- [Wolf05] J. Wolff: *Hebungen und seismische Ereignisse im Liegenden eines laufenden Abbaus*. In: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2005-1 (6. Geokinematischer Tag), S. 179-189, 2005.





# Anhang

## Anhang A

Der Radius  $R(\phi)$  hängt nur von der relativen Lage des Radius zur großen Halbachse ab, somit vom Winkel  $(\phi - \phi_{max})$  (vergleiche Abbildung (4.4)). Deshalb wird im Folgenden nur eine gegenüber dem  $x - y - \text{Koordinatensystem}$  nicht gedrehte Ellipse betrachtet.

$$(1) y = x \cdot \tan\phi$$

$$(2) \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ (Ellipsengleichung)}$$

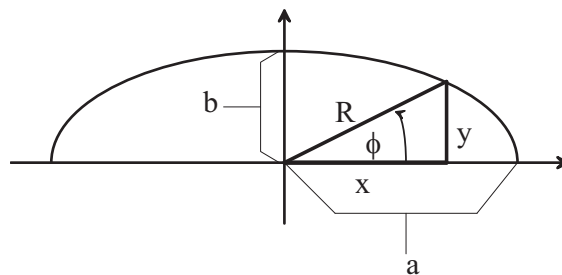


Abb. 7.1: Ellipse

Setzt man die Gleichung (1) in Gleichung (2) ein, so folgt:

$$\begin{aligned} (2) &\stackrel{\text{mit (1)}}{\implies} \frac{x^2}{a^2} + \frac{x^2 \tan^2 \phi}{b^2} = 1 \\ &\implies x^2 b^2 + x^2 a^2 \tan^2 \phi = a^2 b^2 \\ &\implies x^2 \cdot (b^2 + a^2 \tan^2 \phi) = a^2 b^2 \end{aligned}$$

Somit erhält man:

$$\begin{aligned} x^2 &= \frac{a^2 b^2}{b^2 + a^2 \tan^2 \phi} \\ &= \frac{a^2 b^2 \cos^2 \phi}{b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi} \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis wird in Gleichung (1) eingesetzt.

$$\begin{aligned} y^2 &= x^2 \tan^2 \phi \\ &= \frac{a^2 b^2 \sin^2 \phi}{b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi} \end{aligned}$$

Damit folgt abschließend:

$$\begin{aligned} R^2 &= x^2 + y^2 \\ &= \frac{a^2 b^2 \cos^2 \phi}{b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi} + \frac{a^2 b^2 \sin^2 \phi}{b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi} \\ &= \frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi} \end{aligned}$$

## Begriffe

Abbau	Teil der Lagerstätte, in dem das zu fördernde Mineral gewonnen wird. Insbesondere werden einzelne Gewinnungsbetriebe als <b>Bauhöhen</b> oder Abbaue bezeichnet.
Abbaukante	Seitliche Begrenzung eines Flözteils, der beim Abbau stehengeblieben ist.
Bergschaden	Schaden bzw. Beeinträchtigung der baulichen Anlagen an der Tagesoberfläche in Folge der bergbaulichen Tätigkeiten.
Bruchbau	Abbauverfahren, bei dem die Dachschichten planmäßig zu Bruch fallen.
Hangendes	Bezeichnung für die Gebirgsschichten oberhalb des Flözes.
kompetente Gesteinsschichten	Härtere Schichten, die in der Lage sind, vergleichsweise mehr Spannungen vor dem Bruch aufzunehmen als umgebende Schichten. Beispielsweise Sandsteine zwischen Tonsteinen im Karbon.
Kompressionswelle	<b>Longitudinalwelle</b> . Die Verschiebung dieser elastischen Welle ist parallel zu ihrer Ausbreitungsrichtung.
Liegendes	Bezeichnung für die Gebirgsschichten unterhalb des Flözes.
Seismisches Moment	Physikalisches Stärkemaß für Erdbeben [Nm].
Scherwelle	<b>Transversalwelle</b> . Die Verschiebung dieser elastischen Welle ist senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung.
Streb	Abbauraum, der zum einen von der anstehenden Lagerstätte und auf der anderen Seite vom <b>Alten Mann</b> begrenzt wird. Als <b>Streblänge</b> wird der Abstand zwischen den Begleitstrecken definiert.
Teufe	Tiefe, ab der Tagesoberfläche.

Tabelle 7.1: Im Text nicht definierte Begriffe