

## Zur Tagesbruchsimulation mit numerischen Modellen im Braunkohlentiefbau

### Simulation of Sinkholes with numerical Models in Brown Coal Mining

Jörg Meier

Bauhaus-Universität Weimar, Am Schirnbach 9,  
09600 Wegefarth, jmeier@dr-gmeier.de

#### ZUSAMMENFASSUNG :

*Mitteldeutschland und insbesondere der Großraum Halle sind durch umfangreiche Braunkohlen-Lagerstätten gekennzeichnet. Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert wurden die zahlreichen Vorkommen im Tiefbau intensiv gewonnen. Vor allem die Stollen- und Streckensysteme aber auch Schächte blieben jedoch nach der Stilllegung weitestgehend erhalten. Ihr heutiger Zustand stellt grundsätzlich ein unbekanntes Sicherheitsrisiko dar. Die landwirtschaftliche Nutzung und zunehmende Überbauung dieser bergbaulich überprägten Flächen stellt ein hohes Risikopotential dar und erfordert verstärkt umfangreiche geotechnisch-bergschadenkundliche Erkundungs-, Bewertungs- und Sanierungsmaßnahmen.*

*In diesem Beitrag wird eine statistische Analyse der Verbruchereignisse vorgelegt. Mit Hilfe des Programms „FLAC“ wird weiterhin der Versuch unternommen, Tagesbrüche numerisch zu simulieren. Die Ergebnisse werden mit denen des Programms „PARTICLES“ verglichen.*

#### ABSTRACT:

*Central Germany and in particular the region Halle are characterized by extensive brown coal stores. With the industrialization in 19th century, the numerous occurrences in the foundation engineering were mined intensively. Above all the gallery and drift systems, in addition, pits however remained as far as possible after the closing. Their current condition represents an unknown safety risk. The agricultural usage and increasing overbuild of these mining over-shaped surfaces represent a high risk potential and require strengthening extensive geotechnical study of possible damage of elaboration, reorganization and restoration.*

*In this contribution a statistic analysis of the break events will be presented. By means of the program "FLAC" and the program "PARTICLES" further attempt to simulate Sinkholes numerically will be taken.*

## 1 Der bruchauslösende Braunkohlentiefbau

Seit dem 18. Jahrhundert wurde Braunkohle im Großraum Halle im tagesnahen Bereich abgebaut. Angeregt durch den immer höher werdenden Energiebedarf und das Auskohlen der extrem tagesnahen Vorkommen wurde zum Tiefbau übergegangen. Verwendung fand die Kohle z. B. in Salinen, Ziegeleien, Glasfabriken und in der Zuckerindustrie. Der historische Braunkohlentiefbau wurde im Bruchbau betrieben. Bei dieser Abbaumethode wurden Schächte und an diese anschließende Strecken in die abbauwürdige Braunkohle vorgetrieben. Innerhalb der zu gewinnenden Kohle wurden dann Abbauorte mit quadratischer bis rechteckiger Grundfläche aufgefahren, deren typische Abmaße 3 x 4, 4 x 4, 3 x 5 oder 4 x 5 Feldlängen in der Grundfläche betragen. In den vertikalen Ausmaßen waren sie oft erheblich höher, als die Streckenhöhe. Die Abbaukammern wurden mit Holz gestützt, bis zu der geplanten Größe ausgekohlt und dann durch Berauben zum Einsturz gebracht. Nach dem Zubruchgehen dieses Abbauortes wurde die nächste Kammer ausgekohlt. Durch diese Vorgehensweise konnten nur ca. 50 % des Braunkohlenflözes gewonnen werden. Die Auswirkungen an der Geländeoberfläche der planmäßig geworfenen Brüche wurden akzeptiert. Die Kohle wurde als zu geringwertig angesehen, um ein Versatzmaterial einzubringen. Vorrangig lagen die Abbaufelder unter landwirtschaftlichen Nutzflächen. Des Weiteren hätte ein Versatzmaterial nicht so gut verdichtet eingebracht werden können, um bei der geringen Überdeckung Auswirkungen auf die Tagesoberfläche zu vermeiden. (KLEIN 1915, OTT 1988)

Erst mit der Entwicklung der Baggertechnik am Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich der Tagebaubetrieb durch, der einen fast vollständigen Lagerstättenabbau ermöglichte.

Der Querschnitt der Tiefbaustrecken hing von dem gewählten Ausbau ab. Gebräuchlich waren hierbei paralleltrapezförmiger Holzausbau, Eisen und Mauerung (kreisrund, elliptisch oder rechteckig mit gewölbten Firsten). Bei Strecken in fester Kohle, die ohne Ausbau standen, wurden diese ebenfalls gewölbt. Die Wasserseige bildete eine in der Mitte oder am Stoß entlang laufende Vertiefung in der Sohle. (KLEIN 1915)

Für die paralleltrapezförmigen Strecken mit Holzausbau wurde in der Regel der „deutsche Türstock“ ausgeführt. Dieser kann durch seine spezielle Gestaltung der Kontaktstelle zwischen Stempel und Kappe neben vertikalen zusätzlich auch horizontale Belastungen aufnehmen (Abb. 1).

Für Fahr- und Bewettungsstrecken, die für eine längere Nutzung konzipiert wurden und bei denen die Geologie bzw. Geomechanik dies erforderte, wurden die Strecken mit einem Ausbau aus Ziegel-, seltener mit Natursteinmauerwerk ausgeführt (z. B. Veltheimstollen in Tollwitz). Da Mauerwerk im Gegensatz zu Holz keiner Fäulnis unterliegt, sind diese Strecken auch heute noch relativ standsicher.

Es kann davon ausgegangen werden, dass vorrangig Strecken und vor allem Streckenkreuze mit Holzausbau und Strecken in fester Kohle zum Verbruch neigen, da das verwendete Holz mit der Zeit verrottet, wobei es seine Festigkeit und damit seine Stützwirkung verliert. ECKART (1972) beziffert mit 10 Jahren den Zeitraum, nach dem die Festigkeitseigenschaften eines Holzbaus soweit herabgesetzt sind, dass Verbrüche möglich werden. Vollständig ausgemauerte Strecken werden demgegenüber noch sehr lange Zeit stabil sein und nicht zum Verbruch neigen.

Die geometrischen Abmessungen der Strecken wurden nach den lokalen Erfordernissen und den Eigenschaften des anstehenden Gebirges gewählt. Einfluss hatte hierbei:

- Anzahl der Gleise (häufig: 2 und 1-gleisig)
- Führung
- Wasserhaltung
- Bewetterung

KLEIN (1915) gibt für gebräuchliche Streckenprofile aus Holz (Paralleltrapez) die in Tab. 1 aufgeführten Parameter an.

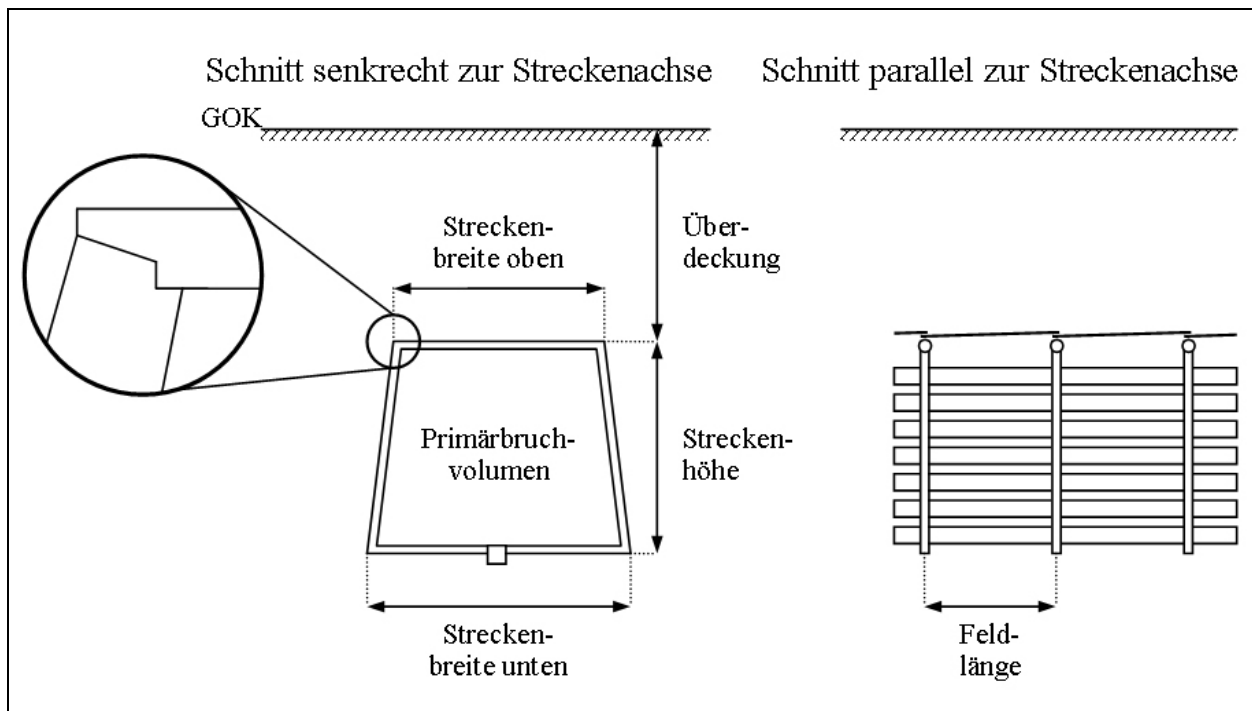


Abb. 1: Schematische Darstellung einer typischen Strecke mit Holzausbau (Paralleltrapez)

Tab.1 : Geometrische Parameter von Streckenprofilen aus Holz

Parameter		eingleisig [m]	zweigleisig [m]
Streckenbreite oben	$b_o$	1,5	2,3
Streckenbreite unten	$b_u$	1,9	2,7
Streckenhöhe	$h$	2,0	2,0
Feldlänge	$l$	1,0 bis 1,3	1,0 bis 1,3

## 2 Der Verbruchprozess

Als Verbruch wird das schrittweise Übertragen bzw. „Hocharbeiten“ eines Volumen- und damit gleichzeitig Massendefizites im Untergrund in Richtung der Tagesoberfläche bezeichnet (Abb. 2). Eingeleitet werden solche Hochbrüche durch Nachbrüche des Deckgebirges über vorhandenen Hohlräumen, denen Durchbiegungs- und Scherbeanspruchungen der Hohlraumfirse vorausgehen. Der ursprüngliche untertägige Hohlraum wird dabei teilweise (Teilverbruch) und später ggf. vollständig (Vollverbruch) durch die der Schwerkraft folgenden, nachbrechenden Massen verfüllt. Dieser Vorgang wird als Verbruchprozess bezeichnet. Das Hochbrechen des Volumendefizites findet in einem mehr oder weniger senkrechten, zylindrischen Bruchschlot statt. Der Nachfallprozess kann zeitweise unterbrochen werden, was auf die Ausbildung gewölbeförmiger Gleichgewichtszustände oder Silowirkungen der nachbrechenden Gesteinsmassen zurückzuführen ist. Ein Tagesbruch stellt das vorläufige Schlussbild eines Hochbruches dar, der die Geländeoberkante erreicht hat. Dieser wird sich, entsprechend dem natürlichen Böschungswinkel abböschern und so eine trichterförmige Vertiefung an der Tagesoberfläche bilden. MEIER (1988) stellt fest, dass Vegetationsdecken das Auftreten von Brüchen verzögern, aber nicht verhindern können.

Das bei einem solchen Verbruchprozess im Untergrund vorhandene Volumen des ursprünglichen Hohlraumes wird als Primärbruchvolumen bezeichnet und ist abhängig von folgenden Faktoren:

- *Größe und geometrische Form des ursprünglichen Hohlraums*
- *Lage des Durchbruches im ursprünglichen Hohlraum*
- *Fähigkeit der Verbruchmassen, den zur Verfügung stehenden Hohlraum auszufüllen*  
(wichtigste Einflussfaktoren: Böschungswinkel, Stückigkeit, Wasserdargebot)

Verbrüche können über bzw. in verschiedenen Hohlräumtypen auftreten. Abb. 3 gibt einen Überblick über die Einteilung. Mit dem Begriff „Erdfall“ wird ein über natürlichen Hohlräumen (z. B. Karst) gefallener Verbruch bezeichnet. Über oder in anthropogen hergestellten Hohlräumen gefallene Verbrüche werden in „Tagesbrüche“ und „Schachtverbrüche“ aufgliedert. Grund hierfür ist die starke mechanische Verschiedenheit: Schachtverbrüche sind durch ein plötzliches Abgehen der Schachtfüllung inklusive ggf. vorhandener Einbauten charakterisiert. Tagesbrüche zeichnen sich in der Regel durch keinen derart vorgezeichneten Bruchschlot aus. (MEIER 2002)

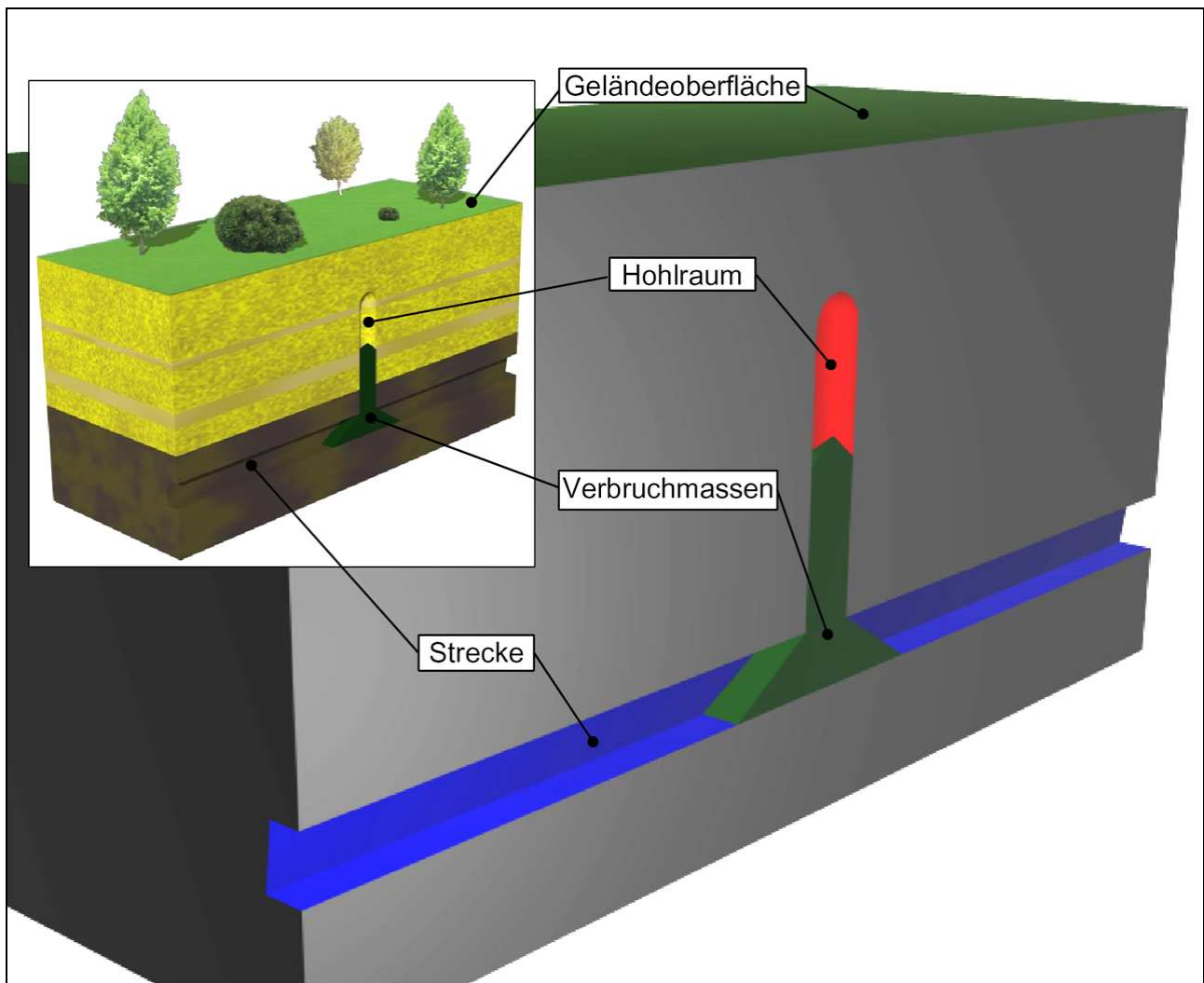


Abb. 2: Blockbild eines Hochbruches über einer Strecke

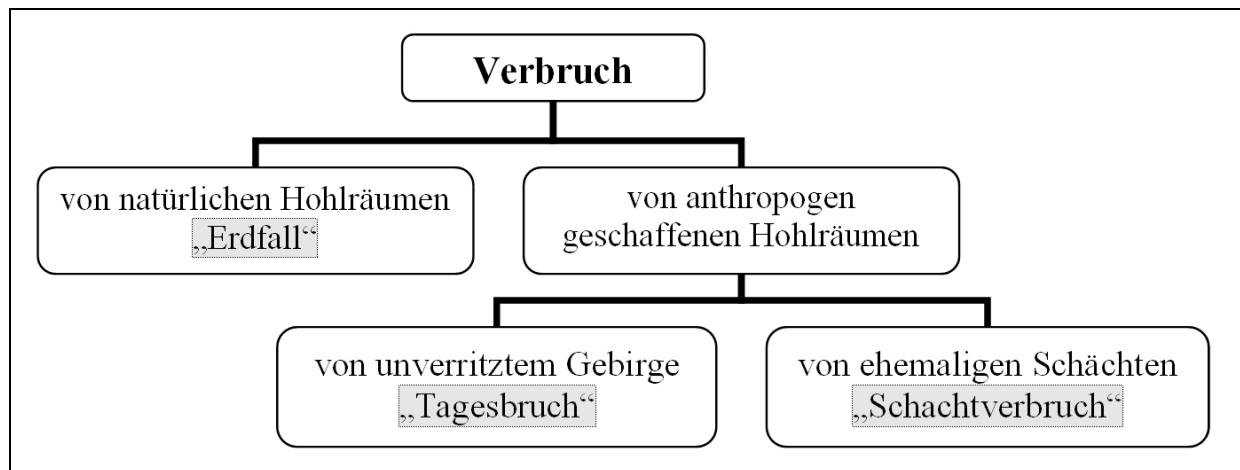


Abb. 3: Definition des „Verbruch“-Begriffs

### 3 Die statistische Analyse

Verbruchereignisse sind von vielen Faktoren abhängig. Einfluss haben neben Niederschlags- und Klimaereignissen, Geologie des Deckgebirges und Grundwasserständen sowie -entwicklungen noch weitere Größen und ihr Zusammenspiel. Da diese oft nicht oder nicht genau genug messbar sind, oder eine Messung – auch aus Gründen der zu großen Anzahl der Werte – zu aufwändig wäre, können Analogien zu dem so genannten „Butterfly-Effekt“ (Schmetterlings- oder auch Lorenz-Effekt) gezogen werden: Das System verhält sich scheinbar chaotisch. Bereits geringste Schwankungen oder Veränderungen der Ausgangssituation oder Parameter können zu einem völlig anderen Ergebnis führen. Die Funktionsprinzipien sind zwar bekannt, aber dennoch bleibt das Endresultat offen.

Statistische Untersuchungen haben das Ziel, die zugrunde liegenden Daten soweit zu verdichten, dass möglichst einfache aber aussagekräftige Angaben über Strukturen und Zusammenhänge für diese Datenmenge abgeleitet werden können. Mit ihrer Hilfe können Einflüsse des Schmetterlings-Effektes vermindert bzw. gefiltert werden.

In der Literatur haben unter anderem OTT (1988), MEIER (1988) und FENK (1979, 1994) bereits Daten zu Verbruchereignissen analysiert und Gesetzmäßigkeiten abgeleitet.

Für die Analyse standen 1100 Datensätze zu Verbruchereignissen im Großraum Halle für einen 20-jährigen Zeitraum von 1981 bis 2000 zur Verfügung. Diese Daten wurden aus einem Teil der Akten des Bergamtes Halle gewonnen. 788 Ereignisse fanden über ehemaligem Braunkohlentiefbau statt.

Diese 1100 Datensätze stellen mit höchster Wahrscheinlichkeit nicht alle Verbruchereignisse in diesem Zeitraum dar. Zum einen wurde ein gewisser Prozentsatz an Verbrüchen nicht oder erst lange Zeit nach dem Durchbruch durch die Tagesoberfläche entdeckt. Gründe hierfür sind die Lage an schwer zugänglichen Orten oder Nichterkennung durch fachfremde Personen. Da neben den oft unübersehbaren Tagesbrüchen z. B. auch Risse oder Einmuldungen zu den Bruchereignissen zählen, werden sicherlich Schäden, die ursächlich Verbrauchsvorgängen zuzuschreiben sind, anderen Schadensquellen zugeordnet und unerkant beseitigt.

Als günstigste Vorgehensweise bei der statistischen Analyse wird folgender Ablauf angesehen:

1. *Auswertung und Interpretation ausgewählter Parameter*
2. *Nachweis bzw. Widerlegung einer Korrelation mehrerer Parameter*
3. *Zeitreihenanalysen von einzelnen Parametern*
4. *Zeitreihenanalyse mehrerer Parameter*

Die Ergebnisse der statistischen Analyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Die meisten Tagesbrüche über historischen Braunkohlen-Gruben traten absolut gesehen auf landwirtschaftlich genutzter Fläche auf. Bezogen auf den Flächenanteil der jeweiligen Oberflächennutzung fielen jedoch die meisten Verbrüche in Verkehrsflächen. Tagesbrüche stellen demnach ein besonderes Problem für die öffentliche Sicherheit dar.*
- *Die häufigsten geometrischen Abmessungen der in der Regel rotationssymmetrischen Verbruchhohlformen an der Geländeoberkante waren ca. 2,15 m im Durchmesser und ca. 0,90 m in der Tiefe.*
- *Der Verbruchdurchmesser entsprach etwa der Breite des verbruchverursachenden Hohlraums.*
- *Zwischen den geometrischen Abmessungen des Verbruches an der Geländeoberkante und der Teufe des primären Hohlraums konnte keine Abhängigkeit nachgewiesen werden.*
- *Die bereits von MEIER (2001) beschriebene monatliche Verteilung der Verbruchereignisse mit den Maxima im Frühling und Herbst konnte bestätigt werden. Es wurde jedoch nachgewiesen, dass die Ausprägung dieser Verteilung zwischen den einzelnen Oberflächennutzungsarten unterschiedlich ist.*
- *Mit Hilfe der Analyse der Latenzzeiten der Verbruchereignisse konnten Anhaltswerte für die Anzahl der noch zu erwartenden Tagesbrüche und deren zeitliche Verteilung in dem Untersuchungsgebiet angegeben werden. Diese Abschätzung soll näher vorgestellt werden.*

Neben der „absoluten“ Darstellung der Verteilung der Zeitpunkte der Bruchereignisse, bei der den unterschiedlichen Abbaueiträumen der einzelnen Tagesbrüche keine Rechnung getragen wird, eliminiert die relative Darstellung der „Latenzzeiten“ der Ereignisse den Störfaktor dieser Zeitunterschiede. Die Latenzzeit wird als Summe der Standzeit des Hohlraumes nach der Auffahrung und der Verbruchzeit definiert. Nach FENK (1979) gibt die Verbruchzeit die Dauer zwischen dem Verbruch des bergmännischen Hohlraumes und der dadurch bedingten Entstehung eines Tagesbruches an.

In Abb. 4 wurde die Summenkurve der Zeitreihe über die Latenzzeit der Verbruchereignisse für drei Fälle aufgetragen: Zum Ersten seit dem Abbaubeginn, zum Zweiten seit dem Abbauende und zum Dritten seit der Abbauhalbzeit, welche den arithmetischen Mittelwert zwischen Abbauende und Abbaubeginn darstellt. Diese Unterscheidung wurde gewählt, da für die meisten Ereignisse kein exakter Auffahrungstermin bzw. Termin der letzten Instandsetzung vorliegt.

Aus dem Diagramm der Abb. 4 ist erkennbar, dass die Summenkurven der drei Zeitreihen nur wenig differieren. Im Allgemeinen unterscheiden diese sich um ca. 15 % bzw. 15 Jahre, verlaufen jedoch im Anfangs- und Endbereich nahezu kongruent. Die folgenden Betrachtungen können deshalb vereinheitlichend für die dritte Zeitreihe (seit Abbauhalbzeit) geführt werden.

In den ersten 30 Jahren nach dem Abbau entsteht nur 1 % aller bis heute gefallenen Verbrüche. Das erste Verbruchereignis innerhalb der zur Verfügung stehenden Daten tritt 24 Jahre nach dem Abbau ein. Nach ca. 130 Jahren sind bereits 90 % der vorliegenden Bruchereignisse gefallen. Es ist davon auszugehen, dass mit höchster Wahrscheinlichkeit die Bildung weiterer Tagesbrüche fortwährend stattfinden wird und somit das dargestellte Diagramm als Zwischenstand zu betrachten ist. Da im Untersuchungsgebiet kein Braunkohlentiefbau mehr stattfindet, werden vorwiegend „ältere“ Tagesbrüche zu dem Diagramm hinzukommen und damit die Kurve im rechten oberen Bereich verändern.

Um einen Trend der Latenzzeiten zu erhalten, wurde die Summenkurve der Latenzzeiten mittels verschiedener Verteilungskurven angenähert. Dabei wurden jedoch ausschließlich Verbrucherereignisse mit einem Alter kleiner gleich 130 Jahre betrachtet, um der bereits dargestellten Zwischenstands-Charakteristik Rechnung zu tragen. Die beste Näherung wurde von der akkumulierten Lognormalverteilung (Gleichung (1)) erzielt, dicht gefolgt von der akkumulierten Weibullverteilung (Gleichung (2)).

$$f(x) = \int \frac{1}{\frac{x+\omega}{\xi} \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{\left(\ln \frac{x+\omega}{\xi} - \mu\right)^2}{2\sigma^2}} \cdot \psi \, dx \quad (1)$$

$$f(x) = \left( 1 - e^{-\left(\frac{x+\omega}{\xi\beta}\right)^\alpha} \right) \cdot \psi \quad (2)$$

Die bestimmten Parameter und die Wertung (Summe der Abstandsquadrate) der Näherungskurven können der Tab. 2 entnommen werden. Aus ihnen kann die Latenzzeit der Ereignisse bei dem Maximum der Näherungskurve errechnet werden, welche ebenfalls in Tab. 2 angegeben wurde. Diese ergibt bei beiden Funktionen ca. 95 Jahre. Dieser Wert kann als „mittlere Latenzzeit“ für Tagesbrüche angesehen werden. Bei den vorliegenden Daten entspricht dieser Wert auch gleichzeitig der Zeit, nach der ca. 50 % der Verbrucherereignisse eingetreten waren. Vergleich man diesen Wert mit der von FENK (1979) angegebenen „durchschnittlichen Standzeit“ von 70,6 Jahren, ergibt sich eine mittlere „Haltbarkeitsdauer“ (Zeit bis zum Verbruch der Firste) für den ursprünglichen Hohlraum von ca. 24,5 Jahren.

Es fällt auf, dass beide Kurven nicht gegen die Anzahl der erfolgten Verbrucherereignisse konvergieren, sondern sich an einen größeren Wert annähern. Die akkumulierte Lognormalverteilung strebt gegen 149,6 %, welche diese nach ca. 335 Jahren zu 99 % erreicht. Bereits nach ca. 190 Jahren steigt die Weibullverteilung auf 99 % ihrer Konvergenzgrenze von 114,5 %. Dieses Verhalten kann als grobes Vorhersagewerkzeug für die noch zu erwartenden Ereignisse verwendet werden, wobei die Weibullverteilung eine mögliche Untergrenze und die Lognormalverteilung eine mögliche Obergrenze definieren. Eine Eingrenzung auf eine der beiden Funktionen kann aus heutiger Sicht noch nicht getroffen werden, da sich die Wertung nicht signifikant unterscheidet und beide auch in anderen Einsatzgebieten für zeitliche Verteilungsabschätzungen verwendet werden.

Exakt erreichen beide Verteilungen ihre Konvergenzgrenzen nur theoretisch nach unendlich langer Zeit, was die Überlegung bestätigt, dass auch nach mehreren hundert Jahren noch einzelne Tagesbrüche auftreten können.

Tab.2 : Zahlenwerte der Parameter und Kennwerte der Näherungskurven

Kennwert	akkumuliert Lognormal		akkumuliert Weibull	
	Parameter	$\mu$	3,6887	$\alpha$
	$\sigma$	0,4548	$\beta$	1,7343
	$\omega$	0,0000	$\omega$	24,0000
	$\xi$	0,3471	$\xi$	0,0195
	$\psi$	1,4963	$\psi$	1,1452
Wertung (Summe der Abstandsquadrate)	0,013		0,015	
Latenzzeit bei Kurvenmaximum	94 Jahre		96 Jahre	

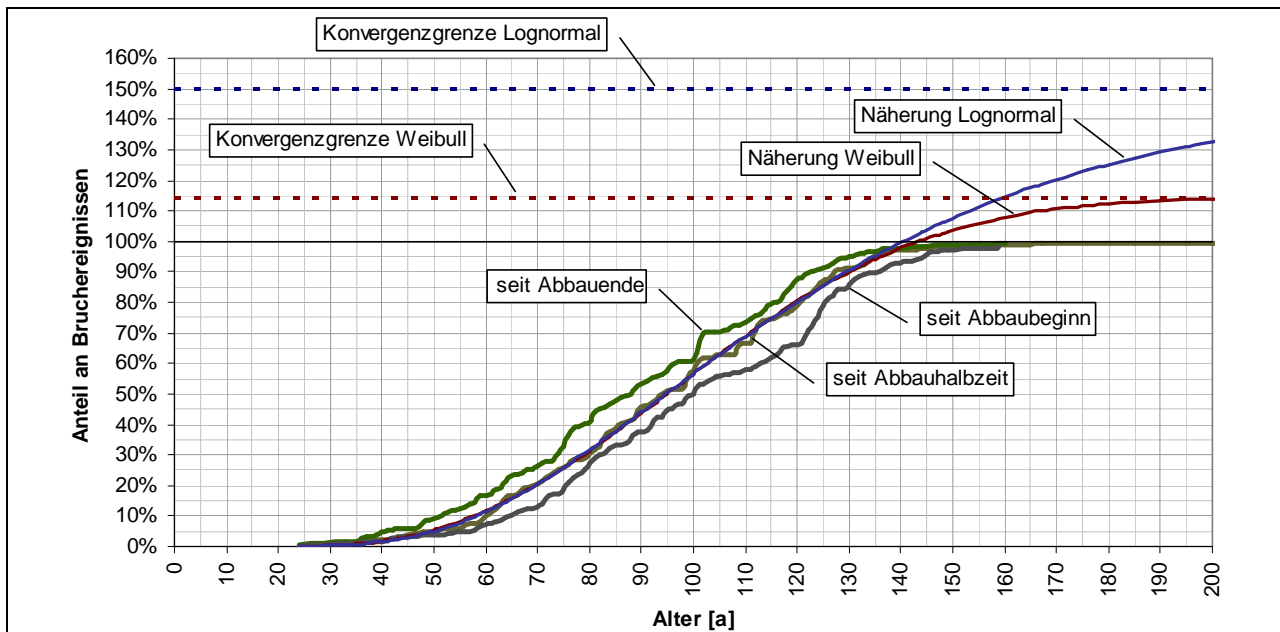


Abb. 4: Summenkurve der Zeitreihe über die Latenzzeit der Verbrauchereignisse

#### 4 Allgemeine Überlegungen zur numerischen Simulation von Tagesbrüchen

Mit den in den vergangenen Jahrzehnten entwickelten Computersystemen in Verbindung mit entsprechenden Simulationsprogrammen wurden die Voraussetzungen geschaffen, auch nahezu jedes mechanische Problem der Geotechnik, Fels- und Bodenmechanik näherungsweise zu lösen. Die Problemstellung der Simulation von Tagesbrüchen gehört ebenfalls zu diesen Fällen.

Die in der FEM, FDM und FKM am häufigsten gestellte Frage nach dem anzuwendenden Materialmodell und den zugehörigen Parametern muss natürlich auch für die Simulation eines Tagesbruches für jeden Fall neu beantwortet werden. Wobei erfahrungsgemäß bei dieser Problemstellung die Informationen zu den anstehenden Gesteinen mit wachsender Teufe immer ungenauer werden, da entsprechende Unterlagen fehlen und zusätzliche Aufschlüsse und Untersuchungen wirtschaftlich nicht vertretbar sind.

Zu diesem Problem kommt bei der Simulation von Tagesbrüchen hinzu, dass oft über die geometrischen Parameter der Hohlräume als auch der überlagernden Schichten und Wasserstände keine oder nur spärliche Informationen vorhanden sind. Es können hier zwar Anleihen aus geologischen Karten und statistischen Untersuchungen – wie z. B. unter Punkt 3 dieses Artikels – Verwendung finden, sollten dann aber auch als solche interpretiert werden.

Welche Gründe rechtfertigen unter diesen Gegebenheiten dennoch eine Simulation von Tagesbrüchen? Welche zusätzlichen Punkte müssen Beachtung finden?

Die Simulation eines Tagesbruches mit numerischen Programmen ist für sinnvoll einzuschätzen, falls die Rahmenbedingungen der bekannten analytischen Verfahren keine Anwendung erlauben oder eine Anwendung zu aufwändig bzw. kompliziert wäre. Ein Beispiel für diesen Fall sind zwei oder mehr sich im Raum scharende aber nicht treffende Gänge. Ein weiteres Beispiel sind sich im Grundriss überlappende oder sehr nahe Hohlräume in unterschiedlichen Teufenlagen.

Für den Fall einer Simulation sollten für die jeweiligen Parameter Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden (siehe MEIER 2003) und die Streubreiten der Parameter Beachtung finden. Bei der Modellierung sollte der Abschätzungscharakter gewahrt bleiben und unnötig komplizierte



Netze vermieden werden. Die Detailtreue sollte den zur Verfügung stehenden Informationen angepasst werden.

## 5 Numerische Simulation mit FLAC

Das von der Itasca Consultants GmbH vertriebene Programm FLAC („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) ist ein zweidimensionales Finite-Differenzen-Programm, das speziell für die Lösung ingenieurwissenschaftlicher Fragestellungen im Boden und Fels entwickelt wurde. Es arbeitet nach dem Kontinuumsmodell und eignet sich besonders für die Modellierung großer Deformationen.

Ein Grundzug des Kontinuumsmodells, auf dem das Programmsystem FLAC basiert, ist das Beibehalten der benachbarten und verbundenen Elemente während der gesamten Berechnung. Verbundene Elemente trennen sich nicht – es findet kein „Aufreißen“ des Materials statt. Treffen zwei nicht verbundene Elemente aufeinander, durchdringen sie sich, ohne Kräfte aufeinander auszuüben.

Während eines Hochbruches fallen jedoch mehr oder weniger große Materialbereiche aus der Firste oder den Stößen und bleiben im Bereich der Sohle des Hohlraumes liegen. Für die Simulation eines Hochbruches ist demnach das „Aufreißen“ des Gesteinsverbandes nötig.

Eine Möglichkeit der Simulation eines solchen Verhaltens im Programmsystem FLAC sind die so genannten INTERFACE-Elemente. Sie können zwei Ränder oder Teile von Rändern von Netzelementen (einzelne Zellen oder Zellverbände) miteinander verbinden und ihr Durchdringen verhindern. Nachteilig wirkt sich bei einer solchen Lösung aus, dass zum einen das gesamte Netz in einzelne Zellen zerlegt werden muss, was ein relativ aufwändiges Skript zur Folge hat. Zum anderen genügt es nicht, jede Zelle mit einem INTERFACE-Element zu umgeben. Es muss jede der Zellen mit allen anderen Zellen mit je einem Element versehen werden.

Mit Hilfe der Gleichung (3) ist für ein Netz mit  $m$  Zellen die Anzahl  $n$  der benötigten INTERFACE-Elemente eine Berechnung möglich.

$$n = \frac{m \cdot (m-1)}{2} \quad (3)$$

Ein alternativer Lösungsansatz für die Simulation von Materialausbrüchen aus der Firste des Hohlraumes ist die skriptgesteuerte Entfernung von Zellen der aktuellen Hohlraumfirste, die auf Grund eines im Skript zu definierenden Kriteriums „herabfallen“ würden. Gleichzeitig wird bei der Entfernung einer solchen Zelle eine Volumenbilanz geführt, um determinieren zu können, ob und wann der Hochbruch durch die Bruchmassen verfüllt ist.

Geometrisch wird ein Herausfallen möglich, wenn die unter der betrachteten Zelle befindliche Zelle das Materialgesetz „Null“ (entspricht Hohlraum) besitzt: Es werden demnach ausschließlich Nachbrüche aus der Hohlraumfirste betrachtet. Ein Herausfallen aus den Hohlraumwandungen wird nicht berücksichtigt, da dieser Effekt stark zurücktritt.

Geomechanisch wird die auf die betrachtete Zelle wirkende resultierende Kraft berechnet. Diese Resultierende  $F_R$  wird als „haltende Kraft“ definiert und besitzt ein positives Vorzeichen, falls sie entgegen der Schwerkraft in Richtung der positiven Ordinate zeigt. Sollte diese ein negatives Vorzeichen besitzen – also einen Wert kleiner Null annehmen – wird die betreffende Zelle aus dem Modell entfernt. Auf die Zelle wirkt, wie in Abb. 5 visualisiert, ihre Gewichtskraft  $F_G$ , die aus Zugfestigkeit resultierende Kraft  $F_Z$  und die Scherkräfte zu den in der gleichen Teufe befindlichen Zellen  $F_{\tau 1}$  und  $F_{\tau 2}$ .

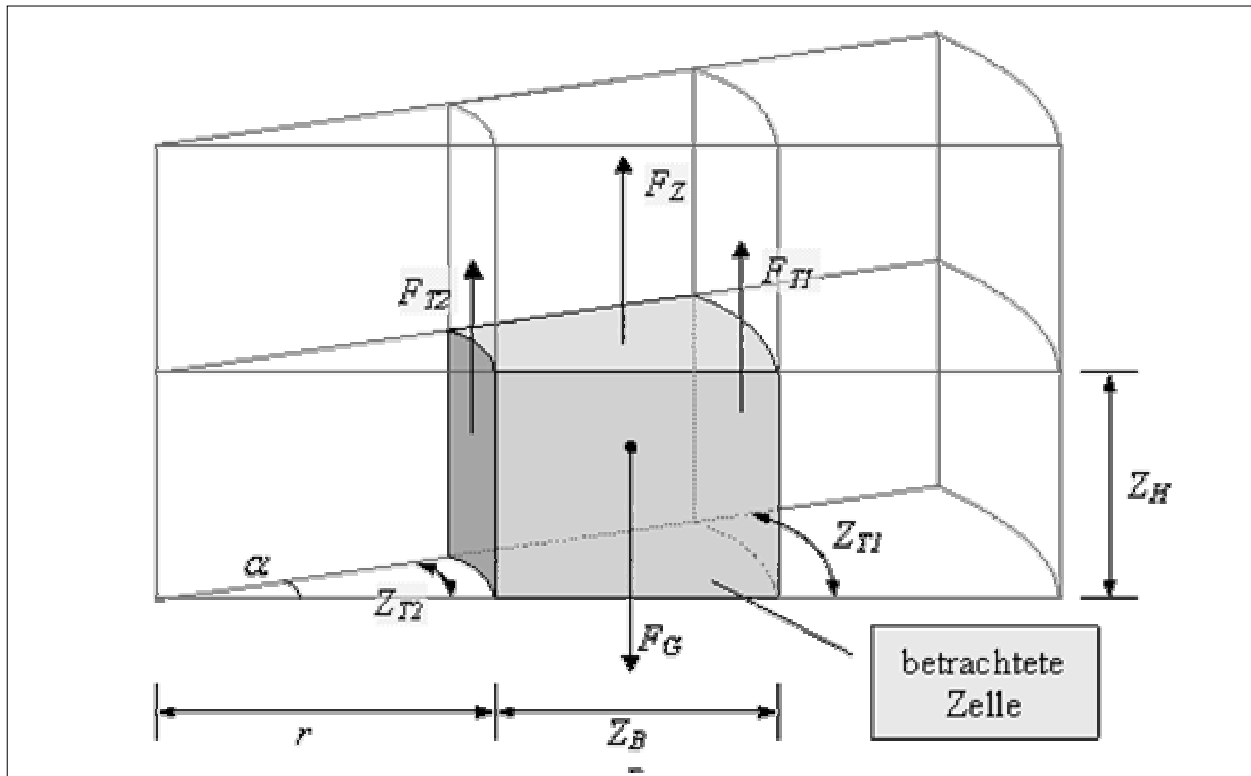


Abb. 5: Lage und Richtung der angreifenden Kräfte auf die betrachtete Zelle

Für den Fall, dass die Zelle wie in Abb. 5 auf gleicher Teufe zwischen zwei weiteren Zellen eingespannt ist und eine hangende Zelle besitzt, kann die Resultierende  $F_R$  nach Gleichung (4) berechnet werden.

$$F_R = F_Z + F_{\tau 1} + F_{\tau 2} - F_G \tag{4}$$

Die Kraft  $F_Z$ , wird über die Zugfestigkeit  $\sigma_{Zug}$  durch Multiplikation mit der Fläche der Zellenoberseite  $A_O$  berechnet (Gleichung (5)). Die Bestimmung von  $F_{\tau 1}$  und  $F_{\tau 2}$  kann nach dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium nach Gleichung (6) über die abgeminderte Kohäsion  $c'$ , den horizontalen Anteil der Spannung in der Zelle  $\sigma_{xx}$ , den wirksamen inneren Reibungswinkel  $\phi'$  und die Zellenhöhe  $Z_H$  bestimmt werden. Die Gewichtskraft  $F_G$  berechnet sich aus der Dichte  $\rho$  des Zellenmaterials, der Fallbeschleunigung  $g$  mit dem Wert von  $9,81 \text{ m/s}^2$  und dem Zellenvolumen  $V$  (Gleichung (7)).

$$F_Z = \sigma_{Zug} \cdot A_O \quad \text{mit} \quad A_O = \pi \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot (2 \cdot r \cdot Z_B + Z_B^2) \tag{5}$$

$$F_\tau = (c' + \sigma_{xx} \cdot \tan \phi') \cdot Z_H \cdot Z_T \tag{6}$$

$$F_G = \rho \cdot g \cdot V \quad \text{mit} \quad V = A_O \cdot Z_H \tag{7}$$

Bei der Wahl der konturnah wirksamen Parameter sollte der Vorhersagezeitraum Beachtung finden. Für die Abschätzung einer kurz- bzw. mittelfristigen Standsicherheit können höhere Parameterwerte angesetzt werden, als für eine langfristige (100 Jahre und mehr) Prognose. Durch die fortschreitende Verwitterung verschlechtern sich die Gesteins- und Ausbaueigenschaften zeit- und umgebungsabhängig.

Die Hochbruchsimulation wurde als abgeschlossen angesehen, wenn alle den Hohlraum direkt überdeckenden Elemente verbrochen sind (vollständiger Tagesbruch), wenn die Volumenbilanz einen vollständigen Selbstversatz anzeigt bzw. wenn nach einer festzulegenden Anzahl Berechnungsschritte („Steps“) kein Nachbruch erfolgt ist.

Es ist davon auszugehen, dass die so erreichten Stadien nicht die endgültige Bruchform darstellen. Durch geringfügige Veränderungen der Parameter, wie z. B. den Wassergehalt und damit der Kohäsion oder Veränderung des Spannungsfeldes, beispielsweise das Aufbringen großer Lasten oder größere Erdbewegungen, kann es zu einem weiteren, jedoch zeitlich weiter verzögerten, Hochbruch kommen. Insbesondere bei dem „Steckenbleiben“ eines Bruches – wie durch die Festlegung einer maximalen Anzahl von Berechnungsschritten ohne Nachbruch angenommen wird – kann es auch ohne die Änderung von Parametern zu weiteren Verbrucherscheinungen kommen.

Beispielhaft soll die Hochbruchsimulation einer einzelnen Strecke vorgestellt werden. Es wurde nach den Ergebnissen der statistischen Untersuchungen aus Punkt 3 eine Strecke in 12,0 m Teufe (Firste, einer Höhe von 2,0 m und einer Breite von ca. 2,0 m (trapezförmigen Querschnitt) angenommen. Auf die Modellierung des Ausbaues wurde verzichtet.

Im ersten Schritt wurde ausgehend von einem homogenen Lockergebirge mit den Materialparametern eines Sand-Ton-Gemisches eine Hochbruchsimulation durchgeführt. Erwartungsgemäß setzte sich bei diesen Gegebenheiten der Hochbruch bis zur Tagesoberfläche fort und bildete so einen Tagesbruch. In Abb. 6 ist ein Zwischenstand dieses Hochbruchprozesses abgebildet. Deutlich zu sehen ist die rotationssymmetrische ellipsoide Form des oberen Bereiches des Hochbruches. Weiterhin ist die Ausbildung eines temporären Gebirgstragringes zu beobachten. Dieser wird durch das Modell jedoch als zu groß wiedergegeben, da auf die Simulation der Verbruchmassen im Hohlraum verzichtet wurde. In der Natur werden diese Massen ebenfalls Spannungen aufnehmen und so den Hohlraum stabilisieren. Die durch das Modell ausgewiesenen Spannungen sind demnach ebenfalls als zu groß anzusehen. Aussagen über die Möglichkeit eines Tagesbruches werden so in Richtung der „sicheren“ Seite verschoben.

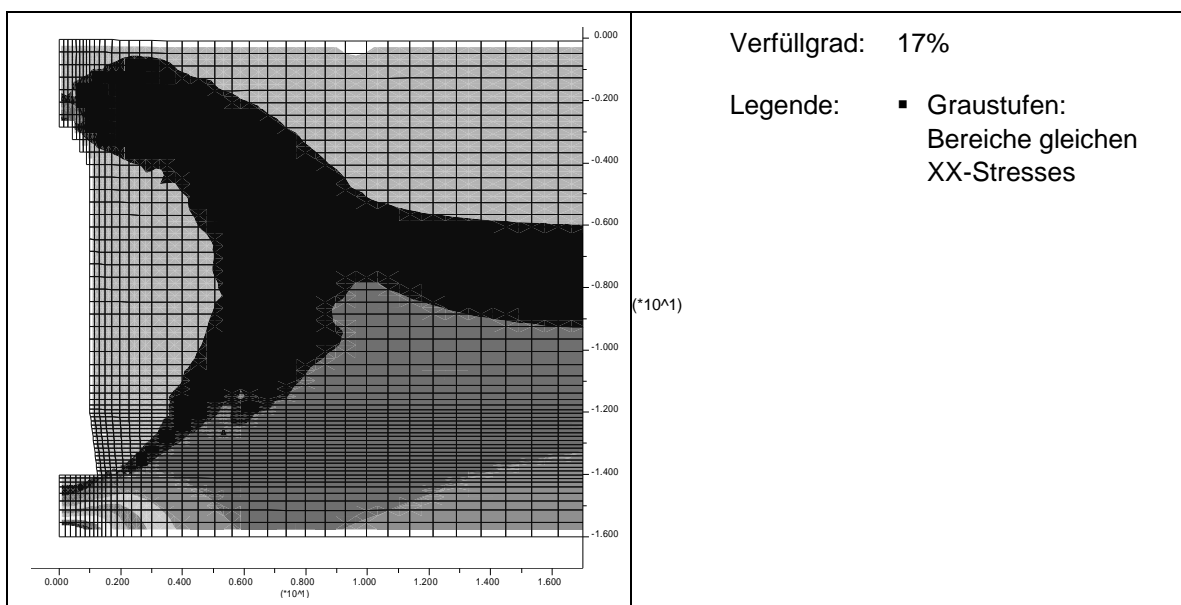


Abb. 6: Zwischenstand der Hochbruchsimulation bei homogenem Gebirge

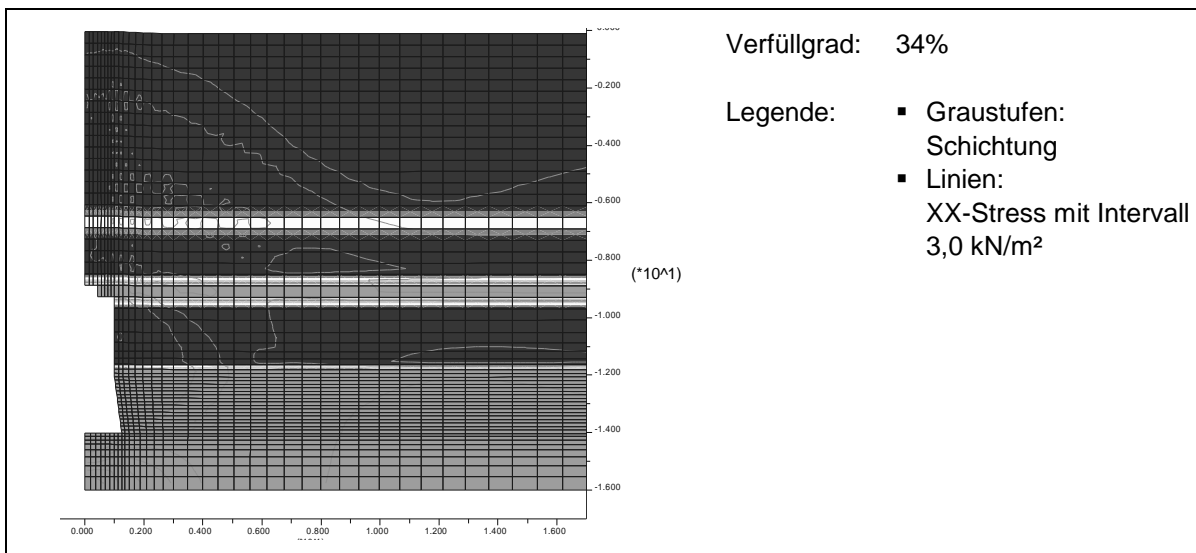


Abb. 7: Zwischenstand der Hochbruchsimulation bei geschichtetem Gebirge

Im zweiten Schritt wurde das homogene Gebirge durch eine horizontale Schichtung verschiedener Gesteine ersetzt. Die Strecke wurde in einem Braunkohlenflöz angenommen, welches von einer gering kohäsiven Schicht aus einem Sand-Ton-Gemisch überlagert wird. Oberhalb dieser Schicht wurde ein geringmächtiger Oberbegleiter, wiederum eine Schicht des Sand-Ton-Gemisches, eine geringmächtige Tonschicht modelliert. Bis zur Tagesoberfläche wurde wiederum das Sand-Ton-Gemisch vorgegeben.

Abb. 7 zeigt wiederum einen Zwischenstand der Hochbruchsimulation. In dem dargestellten Stadium befindet sich der höchste Punkt des Hochbruches in dem höher kohäsiven Oberbegleiter. Die – durch die höhere Kohäsion – flachere rotationsellipsoide Form der oberen Hochbruchfigur ist auch hier gut zu erkennen. Während der Simulation zeigen sich weiterhin deutlich die durch Spannungumlagerungen gekennzeichneten längeren Verweilzeiten des Hochbruches in Schichten mit höherer Kohäsion.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit bekannten analytischen Methoden ergab sehr gute Übereinstimmungen. Es standen hierzu die Verfahren nach ECKART (Hohlraum-Bruchmassen-Bilanzmodell, 1973), MEIER (Hohlraum-Bruchmassen-Bilanzmodell, 1978), Liszkowski (Bruchgewölbummodell) und PENZEL (Kräftegleichgewichtsmodell, 1980) zur Verfügung.

Aus den Untersuchungen mit FLAC können folgende Ergebnisse abgeleitet werden:

- Die Entwicklung von Tagesbrüchen wird grundsätzlich von allen im Modell Mohr-Coulomb integrierten Gesteinsparametern in unterschiedlicher Stärke beeinflusst. Das größte Gewicht hat der Parameter Kohäsion.
- In vorgegebenen Schwächezonen wie z. B. Streckenkreuzen finden Hochbrüche begünstigt statt.
- In Abbaugebieten mit vorwiegend schwachbindigen Lockergesteinen als Deckgebirge der Braunkohlen ist verstärkt mit Tagesbrüchen zu rechnen.
- Die Kontur des Verbruchhohlraums nähert sich im oberen Bereich einem rotations-symmetrischen Ellipsoid und im unteren Abschnitt einem Kreiszyylinder an.

- Die Hochbruchgeschwindigkeit ist von dem anstehenden Gestein abhängig und ändert sich so in geschichtetem Gebirge schichtweise. Der wichtigste Einflussfaktor auf die Hochbruchgeschwindigkeit ist die Kohäsion, wobei bei steigendem Wert die Geschwindigkeit abnimmt.
- Innerhalb einer homogenen Gesteinsschicht können die Nachbrüche aufgrund von zeitabhängigen Spannungsumlagerungen schubartig stattfinden. Dieser Effekt verstärkt sich bei steigender Kohäsion.
- Unter hochkohäsiven Schichten kann der Hochbruchprozess temporär oder permanent zum Stillstand kommen.
- Ab einer Mindestüberdeckung findet ein schlagartiger Durchbruch bis zur Tagesoberfläche statt.

## 6 Numerische Simulation mit PARTICLES

Um die Ergebnisse der mit dem Programm FLAC vorgenommenen Berechnungen zu verifizieren und um weitere Aussagen treffen zu können, wurden ergänzende Untersuchungen mit dem eigens entwickelten Programm „PARTICLES“ ausgeführt. Dieses wurde nach dem Konzept der Diskreten Elemente Methode (DEM) entworfen. Im Gegensatz zu dem Programm FLAC, welches die Finite Differenzen Methode (FDM) nach dem Kontinuumsmodell verfolgt.

Obwohl das Programm PARTICLES dreidimensional rechnet, wurde für alle Berechnungen die dritte Dimension außer Acht gelassen und nur der ebene, zweidimensionale Fall betrachtet. Dies geschah zum einen, um eine bessere Vergleichbarkeit zu den ebenfalls zweidimensionalen Berechnungen in FLAC zu erhalten und zum anderen, um Rechenzeit zu sparen.

Des Weiteren konnten keine Simulationen des gesamten Hochbruchmodells aus FLAC vorgenommen werden, da die Rechen- und Geschwindigkeitskapazitäten der zur Verfügung stehenden Hardware nicht ausreichten, um solche Partikelmengen in einer akzeptablen Zeitspanne durchzuführen. Es wurde stattdessen die Simulation einer einzelnen geringmächtigen Schicht des Modells vorgenommen.

In Übereinstimmung mit den Simulationen in FLAC und den Beobachtungen in-situ konnten verschiedene typische Erscheinungen nachvollzogen werden. Hierzu zählen unter anderem die in Abb. 8 dargestellten Beispiele für die Ausbildung einer temporären elliptischen Kontur bei bereits recht geringen Kohäsionswerten. Diese Form des Hohlraums konnte in Verbindung mit dem ebenfalls nachvollziehbaren schaligen Ablösen der Bruchkontur bei verschiedenen Hochbrüchen im sachsen-anhaltinischen Raum beobachtet werden. Außerdem konnte die bereits beobachtete Abnahme der Verbruchgeschwindigkeit mit steigender Kohäsion gut festgestellt werden.

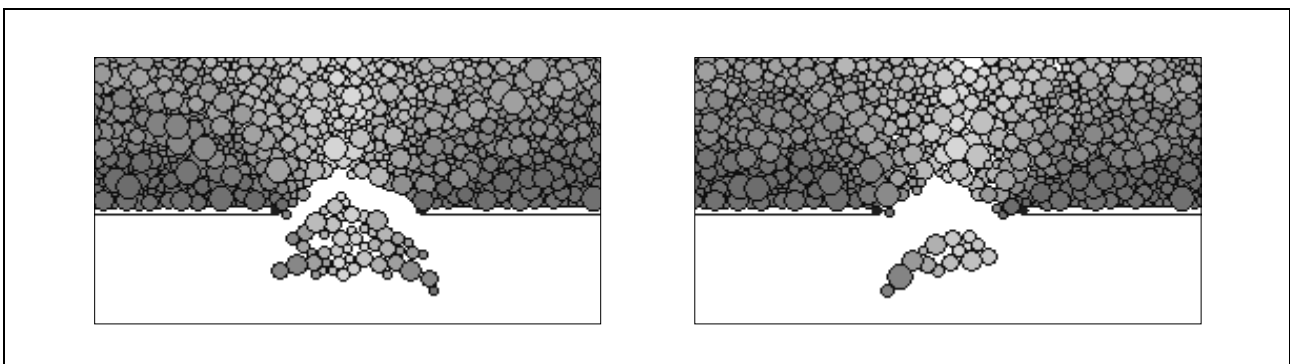


Abb. 8: Beispiele für die Ausbildung einer temporären elliptischen Kontur

## 7 Literatur

ECKART, D. (1972): Arten und Ursachen von Schäden an stillgelegten Bergwerksanlagen. - Neue Bergbautechnik, 2. Jahrgang, Heft 8, S. 619 - 625

ECKART, D. (1973): Ergebnisse von Untersuchungen über Schäden an stillgelegten Bergwerksanlagen. - Freiburger Forschungshefte A 526 (1973), VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

FENK, J. (1994): Bergschadenprobleme in Ostdeutschland. In: Das Markscheidewesen 101, Nr. 1, S. 18 bis 23

FENK, J. (1979): Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge. In: Dissertation, TU Bergakademie Freiberg

KLEIN, G. (1915): Handbuch für den Deutschen Braunkohlenbergbau. - Verlag von Willhelm Knapp, Halle (Saale), 2. Auflage

Meier, G. (1978): Zum Problem von Tagesbruchanalysen in Altbergbaugebieten aus der Sicht praktischer Bergsicherungsarbeiten. - Neue Bergbautechnik, 8. Jahrgang, Heft 11, November 1978, S. 639-643

MEIER, G. (2001): Altbergbau in Deutschland: Umfänge – Probleme – Bearbeitung. In: Tagungsband 1. Altbergbaukolloquium, Freiberg, S. 5-17

MEIER, G. (1988): Geotechnische Aufgaben bei Bergsicherungsarbeiten zur Erkundung und Sanierung von Altbergbau im Fels an typischen Beispielen des Thüringer Raumes und des Erzgebirges. In: Dissertation B, TU Bergakademie Freiberg

MEIER, G. (2002): Zum Erarbeitungsstand der Empfehlung „Geotechnisch-markscheiderische Untersuchung und Bewertung von Altbergbau“. - Tagungsband des 2. Altbergbaukolloquiums, Clausthal, S. 11 22

MEIER, J. (2003): Statistische Analyse von Tagesbrüchen über Abbaufeldern des Braunkohlentiefbaus und ein Versuch ihrer numerischen Simulation mit dem Programm FLAC. - Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg.

OTT, M.; GRUSCHWITZ, G.; FANTASNY, D. (1988): Spätauswirkungen ehemaliger Braunkohlentiefbaue im Bezirk Halle. In Zeitschr. f. angew. Geologie, Heft 34, S. 53 – 57

PENZEL, M. (1980): Bemerkungen zur Erdfallgenese in Auslaugungsgebieten aus geomechanischer Sicht. - Neue Bergbautechnik, 10. Jahrgang, Heft 1, Januar 1980, S. 15-19