

Numerische Abschätzung von Tagesbruchgefährdungen in Altbergbaugebieten*

Zusammenfassung

Im Rahmen von ingenieurgeologisch-bergschadenkundlichen Untersuchungen in Altbergbaugebieten ist die Abschätzung einer Tagesbruchgefährdung über tagesnahen Hohlräumen eine wichtige Zielstellung zur Beurteilung einer Gefahrenabwehr. Einerseits steht die Frage nach der Tragfähigkeit und Dauerstandsfestigkeit des Deckgebirges über Hohlraum in Locker- und Festgesteinen aus geomechanischer Sicht. Andererseits bedarf es der grundsätzlichen Bewertung der Hohlraum-Deckgebirgsverhältnisse für das mögliche Auftreten von Tagesbrüchen aus geometrisch-ingenieurgeologischer Sicht. Unter Berücksichtigung von ingenieurgeologischen Aspekten, theoretischen Zusammenhängen und anhand praxisorientierter Beispiele werden verschiedene numerische Modelle vorgestellt, die für eine Hohlraum-Bruchvolumen-Bilanz in Locker- und Festgesteinen anwendbar sind. Die dazu erforderlichen geometrischen und geotechnischen Parameter werden diskutiert und ihre Repräsentanz bewertet.

1 Problemstellung

Bei der geotechnisch-bergschadenkundlichen Bewertung der Geländeoberfläche über tagesnahen Hohlräumen des Altbergbaus ist die flächenbezogene Ausgliederung einer differenzierten Tagesbruchgefahr ein Schwerpunkt. Das Deckgebirge über einem Hohlraum kann verbrechen und es kommt so zu einem Tagesbruch. Der dabei ablaufende Verbruchprozess wird durch folgende Hauptfaktoren bestimmt:

- Hohlraumgeometrie und -tiefe
- geomechanische und struktureologische Gebirgseigenschaften (Fels) bzw. bodenmechanische Eigenschaften (Lockergestein) und wirkende Spannungen einschließlich Einfluss von verbliebenem Ausbau im Hohlraum
- Wasserverhältnisse und Verwitterungseinfluss
- statische u. dynamische Einwirkungen (Nutzungsverhältnisse an der Geländeoberfläche)

* Veröffentlicht in: Berichte 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie

Sonderband Geotechnik Karlsruhe 2001, S. 95-100

Die numerischen Abschätzungen der Tagesbruchgefährdung erfolgen derzeit durch folgende Modellansätze:

- geomechanische Modelle (z. B. Kräftegleichgewichts- und Bruchgewölbemodell)
- geometrisch-ingenieurgeologische Modelle (z. B. Hohlraum-Bruchvolumen-Bilanz-Modell nach MEIER [1])
- Komplexmodelle (z. B. Parametersimulation von Tagesbruchprognosen nach FENK [2])

Die von geomechanischen bzw. bodenmechanischen Kennwerten beeinflussten Modelle setzen eine hinreichende Parameterkenntnis zum Gebirge, Gestein und Hohlraum voraus und tragen häufig weniger objektspezifischen, sondern mehr allgemeingültigen Charakter, wodurch die Ergebnisse auch nur eine eingeschränkte Gültigkeit besitzen.

Anhand von Komplexauswertungen von zahlreichen Verbruchereignissen unter ingenieurgeologischen Aspekten konnte ein geometrisches Bruchmodell entwickelt werden, das auf einer praxisorientierten Hohlraum-Bruchvolumen-Bilanz in Locker- und Festgesteinen basiert (HBB-Modell) und für Tagesbruchprognosen geeignet ist. Die dabei gemachten Erfahrungen werden nachfolgend zusammengefasst.

Unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen kann dieses Modell auch bei der Auswertung von Erdfällen in Karstgebieten herangezogen werden.

2 Theoretische Grundlagen

Das HBB-Modell basiert auf der Erkenntnis, dass ein sich nach oben arbeitender Verbruch über einem Hohlraum bei fehlendem Dauerstandsverhalten des hangenden Gebirges aufgelockerte Bruchmassen hinterlässt. Durch die Volumenzunahme des Verbruches gegenüber dem unverritzten Gebirgsverband ist in Abhängigkeit von der Deckgebirgsmächtigkeit, der Geometrie des Hohlraumes, der Verbruchform und den ingenieurgeologischen Gebirgseigenschaften einschließlich der Wasserverhältnisse ein Tagesbruch an der Geländeoberfläche oder ein „Totlaufen“ des Verbruches zu erwarten. Nur die Hohlraumhöhe und die Deckgebirgsmächtigkeit als alleinige Kriterien sind dabei für die Beurteilung der Einwirkungen auf die Geländeoberfläche nicht ausreichend, sondern es nehmen auch weitere Parameter maßgeblichen Einfluss.

Bei der rechnerischen Abschätzung der Tagesbruchgefährdung an der Geländeoberfläche über Hohlraum wird die Grenzdeckgebirgsmächtigkeit H_{\max} ermittelt, bei der ein „Totlaufen“ des Verbruches eintritt und ein Tagesbruch theoretisch ausgeschlossen werden kann. An der Geländeoberfläche sind dann nur noch Senkungen möglich.

Es gilt folgendes Kriterium für die Locker- und Festgesteinsbereiche:

$$H_{Gebirge} \geq H_{max}$$

$H_{Gebirge}$ Deckgebirgsmächtigkeit über dem Hohlraum

H_{max} Grenzdeckgebirgsmächtigkeit

Bei Analysen im Fels bleibt die meist geringmächtige Verwitterungsdecke unberücksichtigt, wodurch die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen.

Es gilt hier für den Ausschluss eines Tagesbruches:

$$H_{Fels} \geq H_{max}$$

H_{Fels} Deckgebirgsmächtigkeit des Festgesteins

Die praxisbezogene Anwendung des HBB-Modells setzt eine zielorientierte geotechnische Erkundung und Vermessung des Hohlraumes und des Deckgebirges voraus. In vielen Fällen ist dies jedoch nur beschränkt möglich und es muss dadurch auf Analogieschlüsse zurückgegriffen werden. Die Rekonstruktion von bereits erfolgten Verbruchszenarien oder die Analyse von Teilverbrüchen (z. B. durch Bohrungen unter Einsatz von Foto- oder Fernsehsonden) lässt die objektspezifischen Aussagen wesentlich verbessern.

In der Tabelle 1 sind ausgewählte Berechnungsvarianten für verschiedene Verbruchformen zusammengestellt.

Folgende Kenngrößen sind zu ermitteln:

h Höhe des bergmännischen Hohlraumes [m]

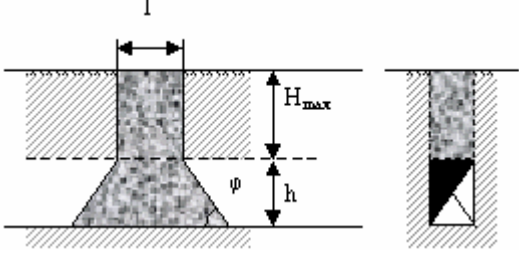
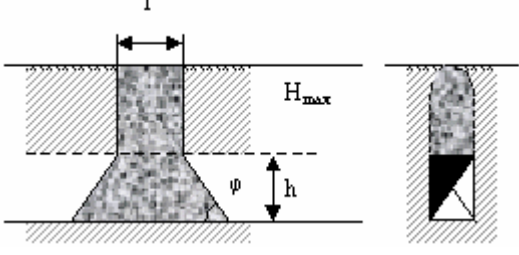
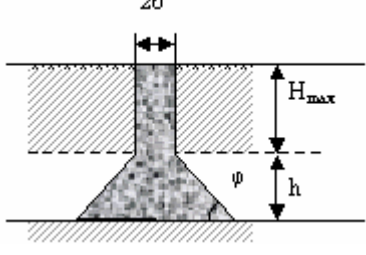
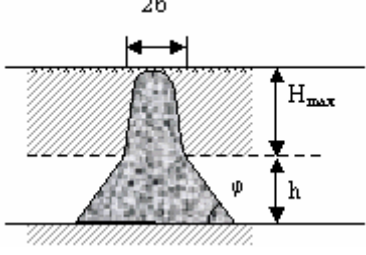
$l = 2b$ Länge der verbruchgefährdeten Strecke [m]

s Auflockerungsfaktor

φ Schüttungswinkel [°]

Die Analyse von zahlreichen Tagesbruchereignissen in situ ergab rotationselliptische bzw. kreiszylindrische Verbruchkörper im Locker- wie im Festgestein, wodurch die Länge der verbruchgefährdeten Strecke l etwa identisch ist mit der Abbau- bzw. Streckenbreite [1]. Bei der zeitlich unbestimmbaren Weiterentwicklung des Verbruches wird sich abschließend als Endform näherungsweise die Kontur des untertägigen Hohlraumes an der Geländeoberfläche durchpausen.

Tabelle 1: Ausgewählte Beispiele von Altbergbauumfängen im Erzgebirge

| Skizze & Formel | Charakteristik |
|---|--|
|  <p>(1) $H_{\max} = \frac{h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{l \cdot \tan \phi} \right)$</p> | <p>senkrechte Bruchflächen über seitlich begrenztem bergmännischen Hohlraum, z. B. Stollen, Strecken, Gangabbaue u. a.</p> |
|  <p>(2) $H_{\max} = \frac{1.274h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{l \cdot \tan \phi} \right)$</p> | <p>gewölbeartiger Verbruch (Verbruchform - stehende Halbellipse) über seitlich begrenztem bergmännischen Hohlraum, z. B. Stollen, Strecken, Gangabbaue u. a.</p> |
|  <p>(3) $H_{\max} = \frac{h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{b \cdot \tan \phi} + \frac{h^2}{3b^2 \tan^2 \phi} \right)$</p> | <p>schlotartiger Hochbruch mit senkrechten Bruchflächen über Flächenabbauen ohne seitliche Begrenzung für den Bruchmassenkegel (Verbruchform - Zylinder)</p> |
|  <p>(4) $H_{\max} = \frac{1.5h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{b \cdot \tan \phi} + \frac{h^2}{3b^2 \tan^2 \phi} \right)$</p> | <p>gewölbeartiger Hochbruch über Flächenabbauen, sonst wie vorher (Verbruchform - Rotationsellipsoid)</p> |

3 Parameter

3.1 Auflockerungsfaktor

Verbricht ein Hohlraum oder werden Gesteinsmassen aus dem Verband gelöst, so nehmen diese ein größeres Volumen ein. Dies trifft für Lockergesteine wie auch für Festgesteine zu.

Das Volumenverhältnis zwischen Gebirgsverband und lockerem Material wird als Auflockerungsfaktor oder auch als Schüttungszahl s bezeichnet.

$$s = \frac{V_{lock}}{V_{fest}}$$

V_{lock} Bruchkörpervolumen im gebrochenen Zustand

V_{fest} Bruchkörpervolumen vor dem Verbruch

Die Volumenveränderung der Erdstoffmassen wird in eine *vorübergehende* und *bleibende* Auflockerung unterteilt. Der *vorübergehende* Wert charakterisiert die Auflockerung unmittelbar nach dem Verbruch, bei der Gewinnung oder bei der Schüttung. Die *bleibende* Auflockerung ist das Verhältnis zwischen gewachsenem Erdstoff und eingebauten, verdichteten Massen. In Abhängigkeit vom Gestein kann es hier sogar zu einer Überverdichtung kommen, wo nach einem Einbau ein kleineres Volumen entsteht als vorher im gewachsenen Zustand vorhanden war (z. B. bei Löß).

Für die Bewertung der Verbruchprozesse von Hohlräumen ist ausschließlich die *vorübergehende* Auflockerung von Interesse.

In der Tabelle 2 sind einige ausgewählte charakteristische Werte für Locker- und Festgesteine zusammengestellt.

Die Tabelle 2 zeigt deutlich, dass der Auflockerungsfaktor erheblichen materialbedingten Schwankungen unterliegen kann. Eine detaillierte Kenntnis der ingenieurgeologischen Verhältnisse des Deckgebirges verbessert wesentlich die Wertauswahl. Als weitere Veränderungseinflüsse auf die jeweiligen Wertgrößen wirken vor allem das Eigengewicht der Verbruchmassen und die Wassersituation (z. B. Standwasser, Tropfwasser) insbesondere in Abhängigkeit von der Zeit. Auch hier sind die konkreten örtlichen Verhältnisse zu analysieren. Bei der rechnerischen Betrachtung sind abgewogene Kenngrößenbereiche empfehlenswert, da aus praktischer Sicht mit einer „Mischauflöckerung“ zu rechnen ist.

Tabelle 2: Ausgewählte Kenngrößen der vorübergehenden Auflockerung von Lockergestein und Fels

| Gestein | Auflockerungsfaktor s |
|------------------------|-----------------------|
| Löß | 1,2 |
| Ton | 1,2 - 1,5 |
| Sand | 1,2 - 1,4 |
| Braunkohle | 1,2 |
| Kalkstein | 1,6 - 1,9 |
| Sandstein | 1,6 - 2,0 |
| Schieferton | 1,4 - 1,5 |
| paläozoischer Schiefer | 1,7 |

3.2 Schüttungswinkel

Die Größe des Schüttungswinkels ist für die Ermittlung der Grenzdeckgebirgsmächtigkeit H_{\max} ein wichtiger Parameter. Ein Großteil des verbrechenden Gesteins vom Deckgebirge wird in den untertägigen Böschungen des Verbruches zu den angrenzenden Hohlräumen aufgenommen. Der sich einstellende Schüttungswinkel φ ist maßgeblich von der Art des Deckgebirges (Lockergestein, Fels), aber auch von den Wasserverhältnissen (z. B. Standwasser, fließendes Wasser) und dem Wasserchemismus abhängig. Die Wasserlöslichkeit des Gebirges ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Die sich ausbildenden Winkel von Verbruchböschungen befinden sich nur in einem labilen Gleichgewicht und können Veränderungen unterliegen. Als Ursachen sind hierfür der Einfluss des zunehmenden Eigengewichtes der Verbruchmassen, Materialumlagerungen in den Verbruchmassen, Materialveränderungen und Wassereinflüsse zu nennen, dabei sind sogar Fließprozesse nicht auszuschließen.

Wie bei den anderen Parametern ist auch beim Schüttungswinkel eine objektspezifische Erkundung und Bewertung angeraten. Einige ausgewählte Beispiele sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ausgewählte mittlere Böschungswinkel von Verbrüchen (Schüttungswinkel φ)

| Material | Schüttungswinkel φ in $^{\circ}$ |
|------------------------|--|
| Schotter | 45 |
| Kalkstein | 36 |
| paläozoischer Schiefer | 35 |
| Granitgrus | 35 |
| Löß | 36 |
| Sand, Ton | 30 |
| Braunkohle | 25 - 33 |

4 Rechenbeispiele

Zur Bewertung der Tagesbruchgefährdung ergeben sich folgende Rechenbeispiele (vgl. Tabelle 1):

Beispiel 1:

Gegeben: Tagesnaher Gangabbau im Kalkstein, dessen seitliche Begrenzungsflächen an die lettigen Salbänder des 0,9 m mächtigen Ganges gebunden sind.

Deckgebirgsmächtigkeit: 7,0 m, davon 1,5 m Lockergesteinsüberdeckung, daraus folgt $H_{\text{Fels}} = 5,5 \text{ m}$

Abbauhöhe: $h = 2,5 \text{ m}$

Länge des verbruchgefährdeten

Bereiches: $l = 2,0 \text{ m}$

Auflockerungsfaktor: $s = 1,8$

Schüttungswinkel: $\varphi = 36^{\circ}$

Lösung: Nach der Formel (1) der Tab. 1 ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$H_{\text{max}} = 8,5 \text{ m}$$

$$H_{\text{max}} = 8,5 \text{ m} > H_{\text{Fels}} = 5,5 \text{ m}$$

Die HB-Bilanz ist nicht ausgeglichen, mit einem Tagesbruch ist zu rechnen.

Beispiel 2:

Gegeben: Domartiger Teilverbruch in einem Kalksteinweitungsbaue mit seitlicher Begrenzung durch Pfeiler (Abb. 1).

Die untertägige Vermessung des Teilverbruches ergab folgende Parameter:

$$h = 3,0 \text{ m}$$

$$l = 4,0 \text{ m}$$

$$s = 1,85 \text{ (ermittelt anhand der Geometrie des Teilverbruches)}$$

$$\varphi = 36^\circ$$

$$H_{\text{Fels}} = 4,9 \text{ m}$$

Lösung: Nach der Formel (2) der Tab. 1 ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$H_{\text{max}} = 9,14 \text{ m}$$

$$H_{\text{max}} = 9,1 \text{ m} > H_{\text{Fels}} = 4,9 \text{ m}$$

Bei einer Fortentwicklung des Teilverbruches tritt ein Tagesbruch auf.

Abbildung

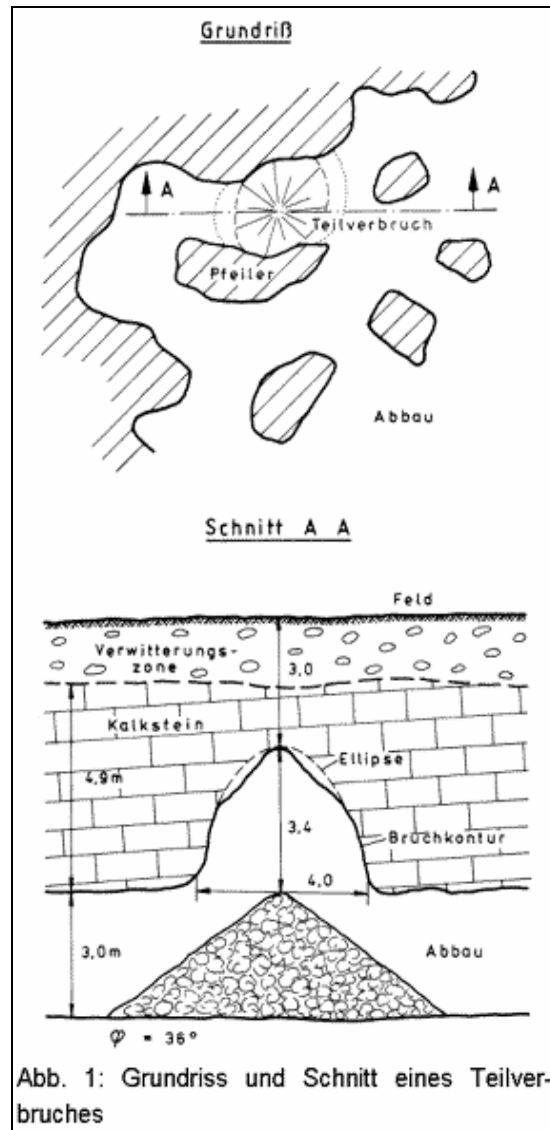


Abb. 1: Grundriß und Schnitt eines Teilverbruches

Beispiel 3:

Gegeben: In einem Kalksteinweitungsbau ist an einem Kreuzungsbereich von Störungen ein schlotartiger Hochbruch zu erwarten. Die Deckgebirgsmächtigkeit beträgt 20,0 m, wovon ca. 2,0 m auf die Lockergesteinsdecke entfallen:

$$h = 3,0 \text{ m}$$

$$s = 1,8$$

$$b = 2,0 \text{ m}$$

$$\varphi = 36^\circ$$

Lösung: Nach der Formel (3) der Tab. 1 ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$H_{\max} = 16,82 \text{ m}$$

$$H_{\max} = 16,8 \text{ m} < H_{\text{Fels}} = 18,0 \text{ m}$$

Nach der HB-Bilanz tritt kein Tagesbruch auf.

Beispiel 4:

Gegeben: In einem Kalksteinweitungsbau ist zwischen intakten Pfeilern ein gewölbeartiger Hochbruch zu erwarten. Das felsige Deckgebirge ist 20,0 m mächtig:

$$h = 4,0 \text{ m}$$

$$s = 1,8$$

$$b = 3,0 \text{ m (Pfeilerabstand 6,0 m)}$$

$$\varphi = 36^\circ$$

Lösung: Nach der Formel (4) der Tab. 1 ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$H_{\max} = 29,68 \text{ m}$$

$$H_{\max} = 29,7 \text{ m} > H_{\text{Fels}} = 20,0 \text{ m}$$

Nach der HB-Bilanz ist mit einem Tagesbruch zu rechnen.

Beispiel 5:

Gegeben: Im Randbereich eines Braunkohlentiefbaues verlaufen einzelne Förderstrecken, die zum Verbruch neigen:

$$h = 1,9 \text{ m (Streckenlänge)}$$

$$s = 1,3 \text{ (mittlerer Tabellenwert)}$$

$$l = 2,0 \text{ m (Streckenbreite)}$$

$$\varphi = 30^\circ$$

Lösung: Nach der Formel (2) der Tab. 1 ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$H_{\max} = 21,35 \text{ m}$$

$$H_{\max} = 21,4 \text{ m} > H_{\text{Fels}} = 19,0 \text{ m}$$

Die HB-Bilanz lässt bei einem vollständigen Verbruchereignis einen Tagesbruch erwarten.

5 Schlussfolgerungen

Die numerische Abschätzung einer Tagesbruchgefährdung in Altbergbaugebieten mittels der Hohlraum-Bruchvolumen-Bilanz basiert auf Verbruchmodellen, die in situ beobachtet wurden. Die dargestellten theoretischen Zusammenhänge erlauben, praxisorientierte Gefährdungsbewertungen durch die Eingrenzung einer Tagesbruchwahrscheinlichkeit durchzuführen. Die notwendigen geometrischen und ingenieurgeologischen Kenngrößen sind durch eine komplexe geotechnisch-bergschadenkundliche Erkundung und Bewertung zu ermitteln. Die Rechenansätze ermöglichen auch nach einem gegangenen Tagesbruch einzelne Parameter in ihrer Größe abzuschätzen. So können beispielsweise bei Kenntnis des geologischen Schichtenprofils karstspezifische Hohlraumprobleme bei Erdfällen einer rechnerischen Bewertung unterzogen werden, da phenomenologische Betrachtungen von Erdfällen und Tagesbrüchen in vielen Fällen eine genetisch ähnliche Bruchentwicklung im Gebirge zeigen. Die vorgestellte numerische Abschätzung einer Tagesbruchwahrscheinlichkeit grenzt nicht nur die Gefährdungspotentiale über unterirdischen Hohlräumen ein, sondern lässt auch Ansatzpunkte für Detailerkundungen gezielter festlegen.

Literatur

- [1] MEIER, G. (1991): Grundsätze von Bergsicherungsarbeiten im Gangbergbau. - WTI, Gesellschaft für Umwelt- und Wirtschaftsgeologie mbH Berlin i. G., 32, Reihe A, Heft 1
- [2] FENK, J. (1984): Berechnung von Tagesbrüchen. - Neue Bergbautechnik 14, 11, S. 414 - 416