

Erdfälle und Tagesbrüche - Möglichkeiten einer numerischen Modellierung Günter Meier¹, Jörg Meier²

Stichworte: Tagesbruch, Erdfall, Verbruchprozess, Verbruchmodellierung, Verbruchberechnung, Äquidistanz, Gesetzmässigkeit, Zufälligkeit, Karst, Altbergbau

Zusammenfassung

Die Genese von Erdfällen und Tagesbrüchen ist sehr ähnlich, da sie auf gleichen geomechanischen Gesetzmässigkeiten beruhen. Mehrere numerische Modelle sind für die Abschätzung von Tagesbrüchen bekannt. Sie sind auch für die numerischen Modellierungen von Erdfällen nutzbar. Einen erheblichen Einfluss auf die räumliche Anordnung und Verteilung von Erdfällen nimmt das strukturgeologische Inventar im Fels. Die Rupturen folgen Gesetzmässigkeiten, aber auch Zufälligkeiten. Für die Äquidistanz der einzelnen Hauptkluftrichtungen wird eine numerische Beziehung vorgestellt. Für die Zufälligkeiten bedarf es jedoch stets objektspezifischer ingenieurgeologischer Untersuchungen und Bewertungen. Die Gesetzmässigkeiten und Zufälligkeiten der Eigenschaftsverteilungen gilt es bei den objektspezifischen Betrachtungen zu filtern. Eine numerische Tagesbruch- und Erdfalleinschätzung kann nur unter diesen Aspekten erfolgreich weiterentwickelt werden.

Abstract

The genesis of sinkholes and caves to the surface is very similar because they base on the same geomechanical mechanism. Many numerical models for the estimation of caves to the surface are known. They are also useable for the numerical modelling of sinkholes. The structural fabric has a much wider influence on the areal arrangement and distribution of sinkholes. The ruptures follow rules and randomness. For the equidistance of the different main joint directions a numerical correlation is presented. Concerning the randomness always object specific analysis and estimations of structural geology are necessary. Performing object specific considerations, the rules and the randomness in distribution of properties are to filter out. Only under these aspects a numerical estimation of sinkholes and caves to the surface can be enhanced successfully.

1. Problemstellung

Bei der Nutzung der Tagesoberfläche in Karst- und Altbergbaugebieten stellt sich immer wieder die Frage nach den Gefahren und Risiken für die Tagesoberfläche, die sich insbesondere aus verbrechenden Hohlräumen im Untergrund ergeben. Eine Gefahr liegt dann vor, wenn in überschaubarer Zukunft mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein Ereignis zu erwarten ist und eine Bedrohung von Schutzgütern besteht. Als Risiko wird das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmass für ein zu erwartendes «unerwünschtes Ereignis» definiert (Autorenkollektiv 2004).

¹ Günter Meier - Ingenieurbüro Dr. G. Meier, Wegfarth/Freiberg

² Jörg Meier - Bauhaus-Universität, Weimar

Vortrag gehalten an der 17. Bodenseetagung zum Thema «Karst im Untertagebau», St. Gallen, Oktober 2006.

In Karstgebieten werden diese Einbrüche an der Geländeoberfläche als Erdfälle bezeichnet. Tagesbrüche entstehen durch den Verbruch von bergmännisch hergestellten Hohlräumen (Fig. 1).

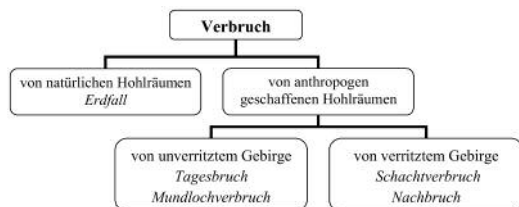


Fig. 1: Definition des Verbruch-Begriffes.

Über einem Hohlraum mit nicht dauerstand-sicheren Deckschichten kann es unter bestimmten Voraussetzungen zu einem Verbruch an der Tagesoberfläche kommen. Sowohl bei natürlichem als auch bei anthropogenem Ursprung der verbrechenden Hohlräume sind beide Einsturzbilder an der Tagesoberfläche sehr ähnlich, da der Verbruchmechanismus der Deckschichten gleichen fels- bzw. bodenmechanischen Gesetzen folgt.

Für die quantitative Modellierung von Tagesbrüchen existieren mehrere numerische Ansätze, um deren Verbruchparameter an der Tagesoberfläche zumindest abschätzen zu können. Da auch Erdfälle vergleichbare geotechnisch-markscheiderische Verbruchkennwerte wie Tagesbrüche an der Tagesoberfläche aufweisen, stellt sich die Frage nach den Möglichkeiten einer ebenfalls numerischen Modellierung von Erdfällen. Grundlage einer quantitativen Bewertung ist dabei stets die eindeutige Klärung der jeweiligen ingenieurgeologischen Randbedingungen zum Verbruchprozess und zur räumlichen Verteilung von potentiellen Verbruchstandorten, um eine numerische Betrachtung überhaupt sinnvoll ansetzen zu können.

2. Vergleich der ingenieur-geologischen Randbedingungen zu Verbruchprozessen und numerische Ansätze für Tagesbrüche und Erdfälle

2.1 Tagesbruch

Ein Tagesbruch stellt aus ingenieurgeologischer und gebirgsmechanischer Sicht die Endphase eines als Hochbruchprozess bezeichneten dynamischen, dreidimensionalen Verbruchvorganges mit Durchschlag zur Tagesoberfläche im Locker- oder Festgestein dar. Beim Verbrechen des Deckgebirges über einem Hohlraum bildet sich als Idealform in der aktiven Verbruchzone ein senkrecht stehendes, halbiertes Rotationsellipsoid aus. Unter steter Einwirkung der Schwerkraft arbeitet sich progressiv ein Volumen- und damit gleichzeitig Massendefizit senkrecht in Richtung Tagesoberfläche vor (Fig. 2).

Grundvoraussetzung für einen Tagesbruch ist die Existenz von bergmännisch angelegten Hohlräumen. Nicht jeder Bergbauhohlraum muss jedoch zwangsläufig zum Tagesbruch führen. Erst, wenn kein ausreichend standfestes Deckgebirge vorhanden ist, eine zu geringmächtige Überdeckung vorliegt oder ein stabilisierender Ausbau seine Funktion verliert, kommt es von unten nach oben zu einem Verbruchprozess, der bis zur Tagesoberfläche durchschlagen kann. Im Allgemeinen fallen Tagesbrüche punktuell und die Pingen (Einbruchtrichter an der Erdoberfläche) reihen sich oft perlschnurartig auf. Im Endstadium des Verbruchprozesses entspricht die Pingenlandschaft nahezu dem Konturverlauf des Grubenbaues. Als Beispiel sei hier eine verbrochene tagesnahe Strecke genannt, worüber die Tagesbrüche perlschnurartig aufgereiht sind.

Unter bestimmten geometrischen Randbedingungen und unter Einfluss der anstehenden Deckgebirgseigenschaften stellen sich verschiedene Verbruchbilder an der Tagesoberfläche ein, deren Formen sich in Abhängigkeit von der Zeit erheblich ändern können

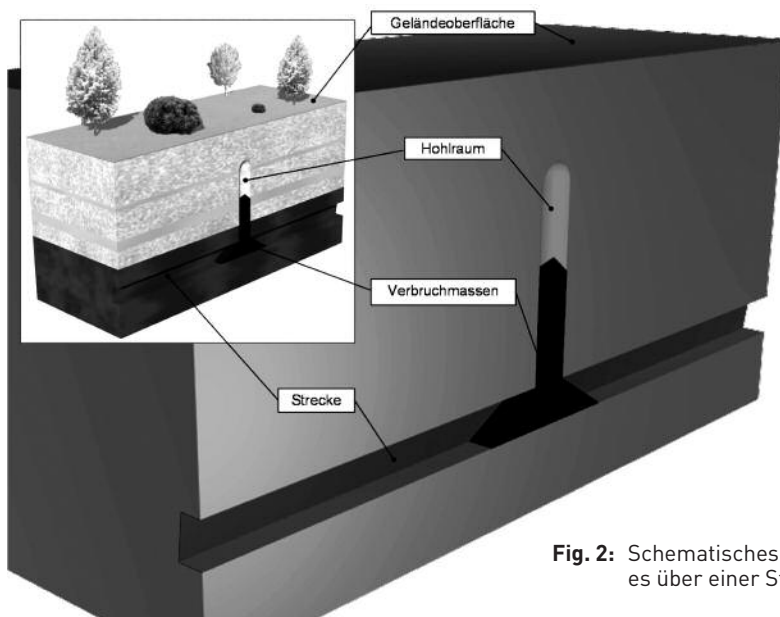


Fig. 2: Schematisches Blockbild eines Hochbruches über einer Strecke.

und verschiedene Stadien der Verbrucherentwicklung widerspiegeln. Ein Überhängen der Verbrucheränder ist im Jugendstadium oder bei stark kohäsiven oberen Deckschichten zu beobachten. Trichterartige Hohlformen bilden sich nach längerer Standzeit oder bei nicht kohäsiven Deckschichten. Bei einem Vergleich der Verbrüche und einer numerischen Betrachtung ist es deshalb notwendig, sich auf senkrechte Verbrucheränder zu beziehen. Geländebeobachtungen zeigen, dass sich der Verbruch in der Regel vertikal über dem Hohlraum einstellt. Störungszonen, steiles Schichteinfallen oder geneigte Hohlräume können den Verbruchschlot in seinem Verlauf jedoch modifizieren.

In vielen Fällen wurden im Bereich befestigter Oberflächen (z. B. Beton- oder Asphalt-schichten) Vorsenkungen in Form von Eindellungen und konzentrischen Rissbildungen vor dem eigentlichen Verbrucherereignis beobachtet.

Relativ umfangreiche Untersuchungen und numerische Ansätze zu den Verbruchmechanismen von Hohlräumen liegen aus dem Arbeitsgebiet des Altbergbaues vor. Als Tagesbruch wird hier das schrittweise «Hocharbei-

ten» eines Volumen- und damit gleichzeitig Massendefizites im Untergrund in Richtung der Tagesoberfläche im gewachsenen Deckgebirge definiert. Das Hochbrechen des Volumendefizites findet in einem mehr oder weniger senkrechten, zylindrischen Bruchschlot statt, der sich nach dem strukturgeologischen Inventar und insbesondere nach den tektonischen Elementen (z. B. Störungen) orientiert. Der Nachfallprozess kann zeitweise unterbrochen werden, was auf die Ausbildung gewölbeförmiger, labiler Gleichgewichtszustände im hangenden Gebirge zurückzuführen ist. Ein grundlegender Unterschied zwischen Locker- und Festgesteinsbereichen beim Verbruchablauf kann nicht festgestellt werden, zumal domartige Verbrüche im Festgesteinsbereich dort auftreten, wo eine hohe, lockergesteinsähnliche Verbandsauflösung vorliegt. Eine differenzierte, objektspezifische Betrachtung der Verbruchvorgänge im Locker- und Festgestein ist jedoch bei der Bewertung der konkreten Tagesbruchwahrscheinlichkeit unumgänglich, um realbezogene Ergebnisse zu erhalten.

In Fig. 3 sind verschiedene Modelle zur Tagesbruchabschätzung zusammengestellt.

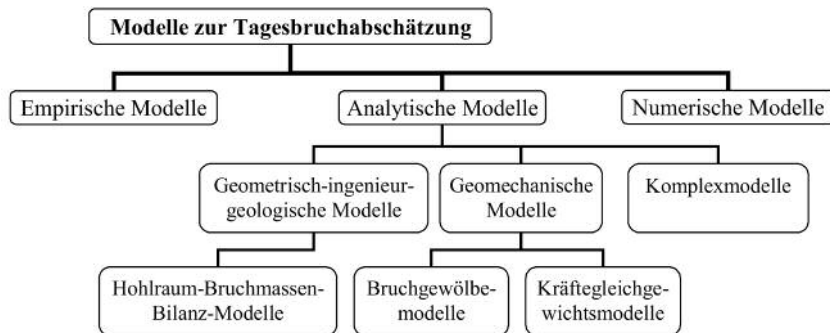


Fig. 3: Modelle zur Tagesbruchabschätzung.

Die *empirischen Modelle* basieren auf statistischen Auswertungen von Daten und den daraus abgeleiteten statistisch gesicherten Regeln und Formeln. Differenzierte ingenieurgeologische, hydrogeologische und geomechanische Einflussfaktoren werden in einem stark abstrahierten Rahmen zusammengefasst, so dass meist nur Aussagen zur Grössenordnung und stark regional oder begrenzt revierbezogen möglich sind. Beispiele hierfür sind Veröffentlichungen von Fenk (1979, 1981, 1984) und von Lerche & Lempp (2002).

Bei den *analytischen Modellen* werden geometrische, geomechanische und ingenieurgeologische Zusammenhänge und Erkenntnisse genutzt, um ein Regelwerk für den Verbruchverlauf aufstellen zu können. Grundsätzlich werden dazu geometrische Daten und Materialkennwerte sowie Kenntnisse zu den hydrogeologischen Verhältnissen benötigt. Diese Eingangsdaten beeinflussen die Genauigkeit der Modelle grundlegend.

Die primäre Hohlraumgeometrie und die Deckgebirgseigenschaften, insbesondere die Mächtigkeit, bestimmen massgeblich die Tiefe und den Durchmesser des Tagesbruches. Eckart (1972, 1973) gibt mit der nachfolgenden Gleichung eine Abschätzungsmöglichkeit für eine Hohlraum-Bruchmassen-Bilanz (HBB) an, die erforderliche Grenzdeckgebirgsmächtigkeit H_{\max} zu bestimmen. Sollte ein Hohlraum tiefer als H_{\max} liegen, kann davon ausgegangen werden, dass für die Tagesoberfläche kein Verbruchrisiko besteht.

Eine Ausbreitung der Verbruchmassen in seitlich verbleibende Hohlräume in Form von Schüttkegeln wird nicht berücksichtigt.

$$(1) \quad H_{\max} = \frac{1,27(1-f) \times h}{s-1} \quad (\text{in m})$$

Mit den Parametern:

- s Schüttungszahl (in Raummeter [m³ geschüttete Gesteinsmassen inkl. Zwischenräume] / Festmeter [m³ Gestein ohne Zwischenräume])
- h Höhe des bergmännischen Hohlraumes (in m)
- f Versatzeinbringung (Aus- bzw. Verfüllen des Hohlraums mit Versatzmaterial; $f = 1$ für 100%)

In Fig. 4 sind die numerischen Ansätze mit Hilfe der Hohlraum-Bruchmassen-Bilanz (HBB-Methode) nach G. Meier (1978a) zur Abschätzung von Tagesbruchwahrscheinlichkeiten zusammengestellt.

Über die Volumenbilanz wird die maximale Höhe des Bruchschlotes unter Berücksichtigung der sich ausbildenden Schüttkegel in dem offenen, seitlich vorhandenen Hohlraum errechnet. Durch den Vergleich mit der realen Überdeckung (H_{vorh}) kann so eine Aussage zu der grundsätzlichen Möglichkeit eines Tagesbruches getroffen werden. Dabei gilt folgende Forderung:

$$H_{\text{vorh}} > H_{\max}$$

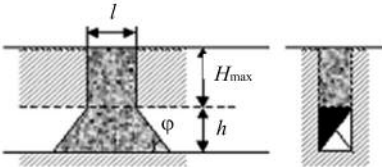
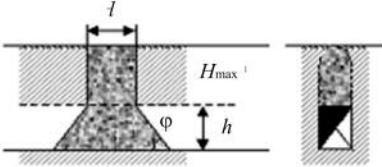
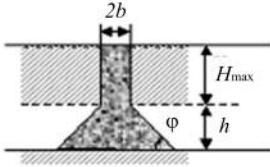
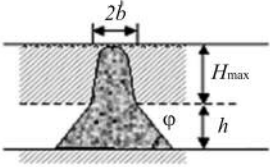
Charakteristik, Skizze und Formel	
<p>senkrechte Bruchflächen über seitlich begrenztem bergmännischen Hohlraum, z. B. Stollen, Strecken, Gangabbaue u. a.</p>  <p>(2)</p> $H_{\max} = \frac{h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{l \cdot \tan \phi} \right)$	
<p>gewölbartiger Verbruch (Verbruchform: stehende Halbellipse) über seitlich begrenztem bergmännischen Hohlraum, z. B. Stollen, Strecken, Gangabbaue u. a.</p>  <p>(3)</p> $H_{\max} = \frac{1,274h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{l \cdot \tan \phi} \right)$	
<p>schlotartiger Hochbruch mit senkrechten Bruchflächen über Flächenabbauen ohne seitliche Begrenzung für den Bruchmassenkegel (Verbruchform: Zylinder)</p>  <p>(4)</p> $H_{\max} = \frac{h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{b \cdot \tan \phi} + \frac{h^2}{3b^2 \tan^2 \phi} \right)$	
<p>gewölbartiger Hochbruch über Flächenabbauen, sonst wie vorher (Verbruchform: Rotationsellipsoid)</p>  <p>(5)</p> $H_{\max} = \frac{1,5h}{s-1} \left(1 + \frac{h}{b \cdot \tan \phi} + \frac{h^2}{3b^2 \tan^2 \phi} \right)$	

Fig. 4: Hohlraum-Bruchmassen-Bilanz-Modell nach G. Meier (1978a). Parameterbezeichnung: b = halbe Breite des Bruchschlotes, l = Breite des Bruchschlotes, h = Höhe des Hohlraumes, s = Auflockerungsfaktor (Schüttungszahl), ϕ = innerer Reibungswinkel der Bruchmassen.

Sollte diese Gleichung erfüllt sein, kann davon ausgegangen werden, dass kein Tagesbruch eintritt, da sich der Verbrauch «totläuft». Bei den geomechanischen Modellen gehen neben geometrischen Daten insbesondere geomechanische Parameter in die Berechnungen ein. Dabei werden das Bruchgewölbe-Modell nach Liszkowski (1973) und das Kräftegleichgewichtsmodell nach Penzel (1980) unterschieden. Letzteres lehnt sich an die Mohr'sche Bruchtheorie an.

Bei dem Komplexmodell nach Fenk (1979) werden die Deckgebirgsschichten über dem Hohlraum in «Bruchbereiche» unterteilt, welche nach ihrem Bruch- oder Fliessverhalten unterschieden werden. Über ein Formelsystem (mehr als 100 Gleichungen) sind Aussagen zu dem Durchmesser und Volumen der Tagesbrüche kurz nach ihrer Entstehung möglich. Es kann dabei auf das kritische Primärbruchvolumen geschlossen werden, ab dem Tagesbrüche zu erwarten sind. Dieses Komplexmodell wurde für den Braunkohlentiefbau entwickelt und setzt die Kenntnis von bodenphysikalischen Kennwerten (Rohwichte, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung, Auflockerungsfaktor) der einzelnen Deckschichten und der hydrogeologischen Verhältnisse voraus.

Für eine numerische Modellierung werden mit Hilfe von leistungsfähiger Rechentechnik verschiedene numerische Ansätze genutzt. Als Beispiele für solche numerischen Ansätze sind die Finite Elemente Methode (FEM), die Finite Körper Methode (FKM) und die Finite Differenzen Methode (FDM) zu nennen. Auch bei diesen viel versprechenden Verfahren wirkt sich nachteilig aus, dass oft die nötigen Parameter und die Geometrie des Bruchbereiches nicht oder nur ungenau zur Verfügung stehen. Die oft diffuse Kenntnis zu den Parametern in ihrer Grösse und räumlichen Verteilung nimmt grundlegenden Einfluss auf die quantitativen und qualitativen Ergebnisse bei der Berechnung und Bewertung von Tagesbrüchen.

Ein Vergleich der verschiedenen Modelle zur Tagesbruchabschätzung beispielsweise im

Braunkohlentiefbau ergibt sehr differenzierte Ergebnisse. Der Unterschied in den analytischen Verfahren tritt vor allem bei der hypothetischen Tiefe hervor, wo ein verbrechender Hohlraum zu keinem Tagesbruch mehr führt. Das Verfahren nach Penzel gibt die optimistischsten Werte an (geringste nötige Überdeckung). Es folgen die HBB nach Eckart und die HBB nach Meier. Für das Verfahren nach Liszkowski kann keine Grenzteufe angegeben werden, da dieses teufenunabhängig arbeitet. Die Hochbruchsimulation im Programm FLAC erreichte grösste Annäherung an die HBB nach Meier (2002).

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand kann deshalb bei einer numerischen Betrachtung von Tagesbrüchen im Fest- sowie im Lockergestein grundsätzlich nur von einer näherungsweise Abschätzung gesprochen werden.

2.2 Erdfall

Die Definition des Erdfalles ist in der ingenieurgeologischen Fachliteratur sehr allgemein gehalten und nicht immer widerspruchsfrei. Bereits Meyn (1850) versteht unter einem Erdfall einen plötzlichen, trichterartigen oder kesselförmigen, scharf begrenzten, kreisförmigen Einsturz an der Erdoberfläche durch unterirdische Auslaugung von Salz, Gips oder Kalkstein. Das Ingenieurgeologische Wörterbuch von 1964 definiert den Begriff Erdfall wie folgt: «Erdfall (auch: Einsturztrichter), katastrophentypischer Einbruch der Erdoberfläche über einer durch Auslaugung (Verkarstung) entstandenen Höhle; meist über schwerer löslichen Gesteinen, wie Gips, Kalkstein usw., vorkommend, aber auch über Steinsalz, hier abhängig vom Beanspruchungsgrad des Deckgebirges, s. a. Einsturz, Doline». Reuter & Kockert (1971) verweisen auf die unterschiedlich definierten Terminologien zu verschiedenen Formen der Verkarstung und insbesondere zum Erdfall. Eine Erklärung ist dazu die jeweilige phänomenologische oder genetische Betrachtungsweise. Aderhold (2005) und Prinz & Strauss

(2006) bezeichnen als Erdfall eine Einsturzdoline, die als Folge von Hohlräumbildungen im verkarstungsfähigen Untergrund zu Einbrüchen an der Erdoberfläche führt.

Nicht nur für die Verständigung in der Fachwelt, sondern insbesondere für eine ingenieurgeologische Analyse eines Erdfalles ist eine klare, genetisch bezogene Definition die Grundlage. Die verschiedenen Entwicklungs-

phasen eines Erdfalles sind dabei zu berücksichtigen, vergleichbar mit den verschiedenen Bruchphasen bei einem Tagesbruch.

Das Erdfallgeschehen innerhalb des Karstes (Auslaugung) ist eingebettet in die exogen-geodynamischen Abtragungs- und Lösungsprozesse der Erdkruste (Fig. 5).

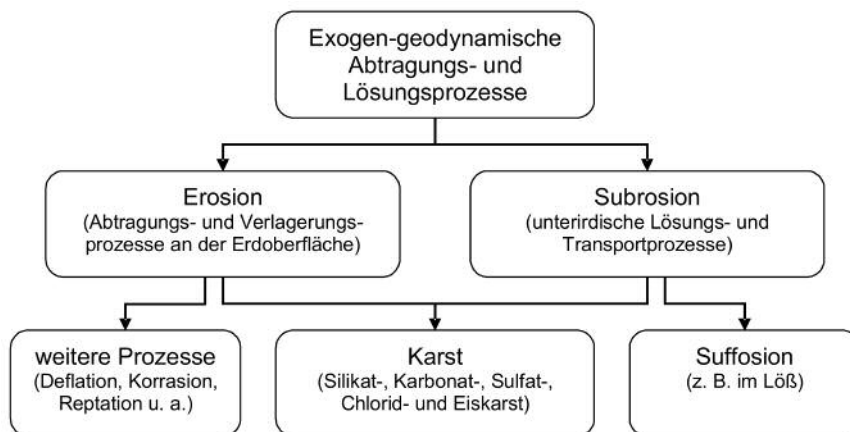


Fig. 5: Schema zu den exogen-geodynamischen Abtragungs- und Lösungsprozessen.

Grundvoraussetzungen für den Karst sind lösliche Minerale und Wasser mit seinen chemischen und physikalischen Randbedingungen in einem bestimmten klimatischen und biologischen Milieu. Nackter und bedeckter Karst haben einen wichtigen Einfluss auf die Erscheinungsbilder der Auslaugung an der Tagesoberfläche und damit auch auf den Erdfallprozess. Ebenfalls sind aktive, inaktive und abgeschlossene Karstprozesse zu unterscheiden (Reuter et al. 1986).

Unter den dargelegten ingenieurgeologischen Randbedingungen und unter dem Aspekt einer Vergleichbarkeit mit Tagesbrüchen sollte auch der Erdfall unter genetischen Aspekten definiert werden. Ein Erdfall stellt somit die Durchschlagsphase zur Tagesoberfläche eines dreidimensionalen dynamischen Hochbruchprozesses über einem natürlich entstandenen Hohlraum im Locker- oder Festgestein dar. Der Verbruch im Deckgebirge

nähert sich unter steter Einwirkung der Schwerkraft beim Verbrechen einem senkrecht stehenden, halbierten Rotationsellipsoid als Idealform.

Für die räumliche Anordnung und Verteilung der morphologischen Karstphänomene nimmt das struktureologische Inventar im Festgestein einen wichtigen Platz ein. An diese Rupturen unterschiedlicher Größenordnungen sind wiederum die Wasserwegigkeit und damit die Abtragungs- und Lösungsprozesse gebunden. Die Strukturelemente im Gebirge folgten einerseits gebirgsmechanischen Gesetzen, die bei der Entstehung der anstehenden Gebirgsschichten gewirkt haben, andererseits nahm auch das Chaosprinzip Einfluss auf die Verteilung und Anordnung der Rupturen. Gesetzmässigkeit und Zufälligkeit prägen somit grundsätzlich die ingenieurgeologischen Eigenschaften jedes Gebir-

ges. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass stets eine objektspezifische ingenieurgeologische Untersuchung und Bewertung notwendig ist, um die real existierenden Gebirgsbedingungen zu erfassen und Gesetzmässigkeiten und Zufälligkeiten zu filtern, um aufgabenbezogene, effiziente Schlussfolgerungen ableiten zu können.

Auch für Erdfälle gilt diese Gesetzmässigkeit und Zufälligkeit. Nach Meier (1978b) lässt sich die äquidistante Trennflächenverteilung der unterschiedlichen Grössenordnungen im Festgestein nach folgender Beziehung beschreiben:

$$(6) \quad a_n = a_0 \cdot 2^n$$

a_n mittlerer Kluftabstand für die beobachtete Rupturgrösse

a_0 beobachteter Trennflächenabstand einer Flächenschar der Rupturgrösse 0

n Grössenordnung der untersuchten Ruptur, wobei n mit der Rupturgrösse wächst und eine natürliche Zahl darstellt

Diese Beziehung besitzt in petrographisch und tektonisch einheitlichem Gebirge (Homogenbereich) ihre Gültigkeit. Ändern sich beispielsweise die Gesteinsverhältnisse oder die strukturen-geologische Situation, so ändert sich auch der kleinste beobachtete Trennflächenabstand. Die Veränderung dieser Eigenschaften ist sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu erwarten. Jede statistisch ausgegliederte Klufttrichtung weist einen eigenen kleinsten beobachteten Trennflächenabstand auf, was jeweils einer getrennten statistischen Betrachtung bedarf. In Fig. 6 ist die Abhängigkeit des mittleren Rupturabstandes einer Trennflächenschar (bc-Kluft) von der Rupturgrösse am Beispiel eines Talsperrenstandortes im Osterzgebirge grafisch dargestellt.

Die statistischen Verteilungsgesetze von Trennflächeneigenschaften spiegeln sich bereits im Kluftkörperbereich wider. Eine Analyse der Rangordnung von Rupturgrössen einer Trennflächenschar am Beispiel einer Pingenanordnung innerhalb einer Gangzone aus dem Bereich des Altbergbaus zeigt Fig. 7.

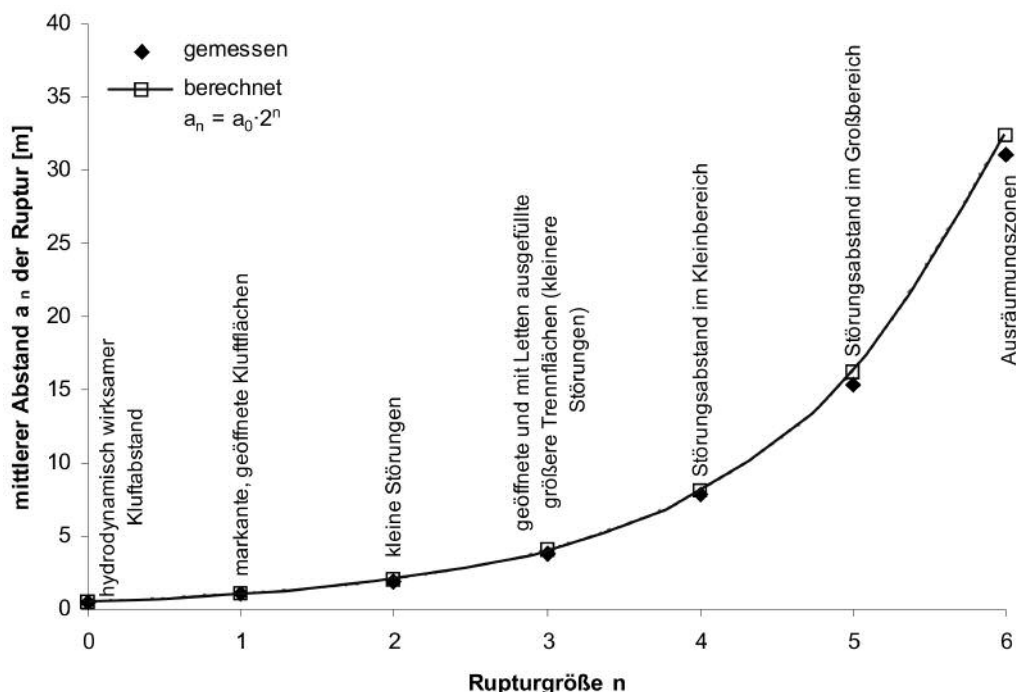


Fig. 6: Abhängigkeit des mittleren Rupturabstandes einer statistisch ermittelten Trennflächenschar (bc-Kluft) von der Rupturgrösse (modifiziert nach Meier 1978b).

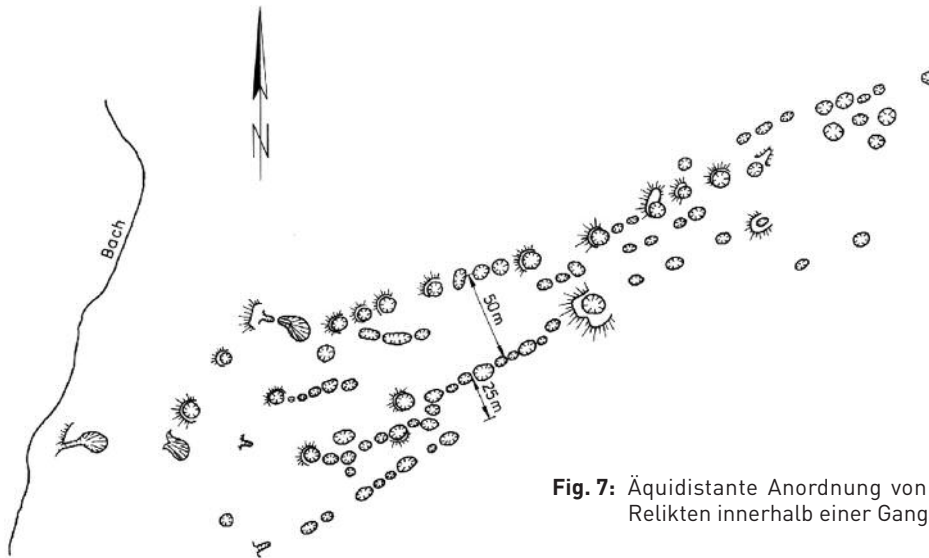


Fig. 7: Äquidistante Anordnung von Altbergbau-Relikten innerhalb einer Gangzone.

Die perlschnurartige Anordnung der Schachtpingen und Tagesbrüche widerspiegelt hier den jeweiligen Gangverlauf entsprechend der ausgebildeten Rupturgrösse. Die Abstände der einzelnen Gänge verhalten sich nach den oben aufgeführten numerischen Beziehungen der Äquidistanz. Für den Gangerzbergbau ergibt sich daraus auch der Zusammenhang, dass im Lagerstättenbe-

reich ein Hauptgang zu erwarten ist, der von abgestuften, kleineren Gängen begleitet wird. Der Einfluss der Zufälligkeiten bei der Genese der Lagerstätte modifiziert jedoch diese Gesetzmässigkeit. Ähnliche Verhältnisse können der Anordnung und Verteilung von Erdfällen zugeordnet werden. In Fig. 8 ist die äquidistante Anordnung von Erdfallereignissen schematisch dargestellt.

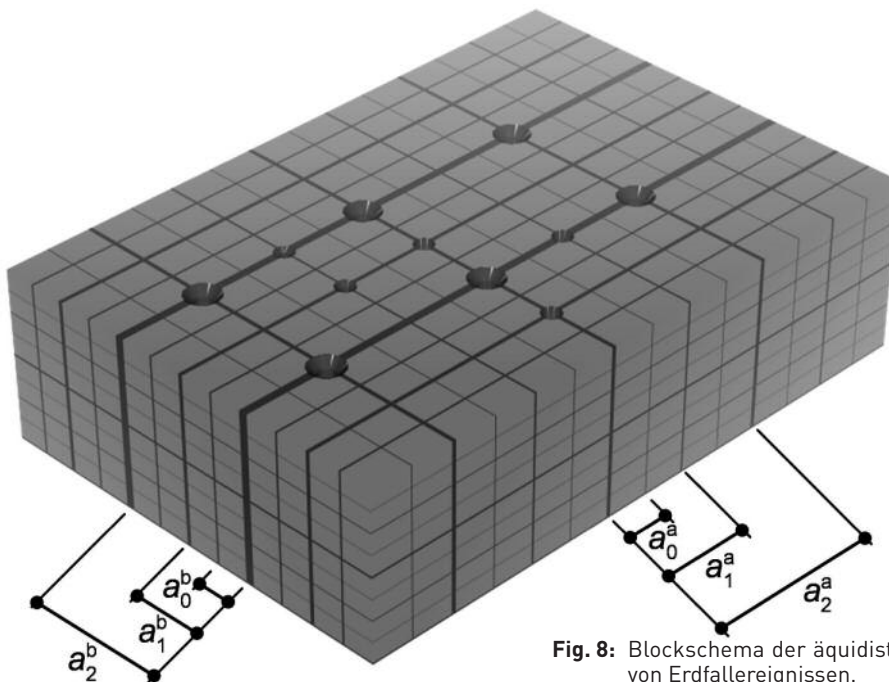


Fig. 8: Blockschema der äquidistanten Verteilung von Erdfallereignissen.

Ein vertikales Strukturelement mit hoher Rupturgrösse und grosser Wasserwegigkeit lässt im Kreuzungsbereich mit einer orthogonal stehenden Kluft mit ebenfalls höherer Rupturgrösse einen Erdfall erwarten. Beispiele von perlschnurartig aufgereihten Erdfällen im Gipskarst gibt es genügend. So sind in der Mansfelder Mulde 12 von 14 Schlottenbildungen an tektonische Störungszonen gebunden, die von der Tagesoberfläche bis in den Auslaugungshorizont nachweisbar und hydraulisch wirksam sind (Penzel 1980). Im aktiven Gipskarst ist dabei die temporäre Entwicklung des Bruchgeschehens noch zu berücksichtigen, wo sich die perlschnurartig aufgereihten Erdfälle durch die Lageveränderung der Auslaugungsfront zeitlich verschoben entwickeln. Dies beinhaltet die Chance, potentielle Verbruchbereiche bzw. Bereiche mit Hohlraumbildungen und damit Zonen mit erhöhten Erdfallrisiken auszugliedern und gezielte Erkundungen anzusetzen.

Die numerische Betrachtung von Erdfällen erfolgte in vielen Fällen aus theoretischer geomechanischer Betrachtungsweise und auch oft in Beziehung zu Tagesbrüchen (z. B. Aderhold 2005). Die wesentlichen dazu genutzten Modelle wurden bereits oben behandelt. Unzureichende Definitionen der ingenieurgeologischen Randbedingungen und die daraus genutzten Parameter zu den Modellansätzen sowie die Vermischung von phänomenologischen und genetischen Definitionen zu Erdfällen und anderen Schadensbildern stellten ebenfalls objektive Grenzen für eine erfolgreiche numerische Behandlung der Thematik dar.

3. Beispiel, Grenzen und Ausblick

Ausgehend von den genetisch bezogenen Definitionen von Tagesbruch und Erdfall lassen sich unter dem Aspekt der gesetzmässigen Verteilung von Struktur- und Materialkennwerten numerische Modellierungen bei hinreichender Kenntnis der ingenieurgeo-

logischen, hydrogeologischen und geometrischen Verhältnisse objektbezogen durchführen. Aufgrund der möglichen Überprägung durch die Zufälligkeit haben die numerischen Ergebnisse momentan nur den Charakter von Abschätzungen. Die Genauigkeit der numerischen Betrachtungen erhöht sich sprunghaft durch die Kenntnis von ingenieurgeologischen, hydrogeologischen und geometrischen repräsentativeren Parametern zum Objekt. Durch Rückwärtsrechnungen an vorhandenen Verbrüchen oder untertägigen Aufschlüssen können nicht unmittelbar messbare Parameter hinreichend genau eingegrenzt werden. Dies ist sowohl bei Tagesbrüchen als auch bei Erdfällen anwendbar. So können auch die verschiedenen Phasen bei der Verkarstung und damit die zeitlichen Aspekte berücksichtigt werden. Die praxisorientierte HBB-Methode nach Meier (1978a) lässt hierbei verschiedene Möglichkeiten offen. Auf Berechnungsbeispiele für Tagesbrüche wird hier verzichtet, da dazu bereits mehrere Veröffentlichungen vorliegen (z. B. Meier 2001; Meier & Meier 2006).

Als ein sehr beeindruckendes Beispiel für Verbrüche im bedeckten Karst können die Erdfälle bei Neckendorf auf und an der Bundesstrasse B 180 im Randbereich der Mansfelder Mulde aufgeführt werden (Herold et al. 2004). Am 31.10.1986 und 13.06.1987 ereigneten sich zuerst in einer Kleingartenanlage und später 35 m entfernt unmittelbar im Fahrbahnbereich der B 180 zwei grosse Erdfälle. Der Erdfalldurchmesser in der Kleingartenanlage betrug 10.5 m, die Tiefe 7.2 m. Der Erdfall im Strassenbereich wies einen anfänglichen Durchmesser von ca. 6 × 7 m auf, die Teufe wurde mit 30 bis 35 m angegeben. Nach der Verfüllung der Verbrüche mit Haldenmaterial des Kupferschieferbergbaues kam es in den Folgejahren wiederholt zu Nachbrüchen mit teilweisen Erweiterungen, insbesondere am Erdfall in der Kleingartenanlage. Der Erdfall im Bereich der B 180 wurde 1993 durch ein mit Geokunststoff bewehrtes Kiespaket auf

einer Länge von 60 m gesichert. Eine Bewegungssensorik an der Basis des Sicherungssystems wurde mit einer Warnanlage gekoppelt, die bei eintretenden Deformationen ein optisches Signal aktivieren und eine Strassenspernung auslösen sollte. 2001 kam es zu einem trichterartigen Nachbruch auf der Strasse mit einem Bruchdurchmesser von ca. 15 m (Fig. 9).

Die tektonischen Verhältnisse im Deckgebirge, die atektonische Überprägung der Deckschichten durch bereits erfolgte Karstpro-

zesse, der Zustand der auslaugbaren Schichten und der Einfluss des alten Kupferschieferbergbaues an der Basis der Zechsteinensedimente sind nicht hinreichend bekannt. Die numerische Abschätzung der maximalen Hohlraum-Bruchvolumen-Bilanzen ist in Fig. 10 dargestellt.

Die numerische Abschätzung macht deutlich, dass nur ein relativ kleiner Karsthohlraum verbrach und potentiell noch grosse Volumendefizite auftreten werden. Mit weiteren erheblichen Nachbrüchen muss des-



Fig. 9: Nachbruch des Erdfalles auf der B 180 im Oktober 2001 mit vollständiger Zerstörung der Fahrbahn (Foto: Dauterstedt).

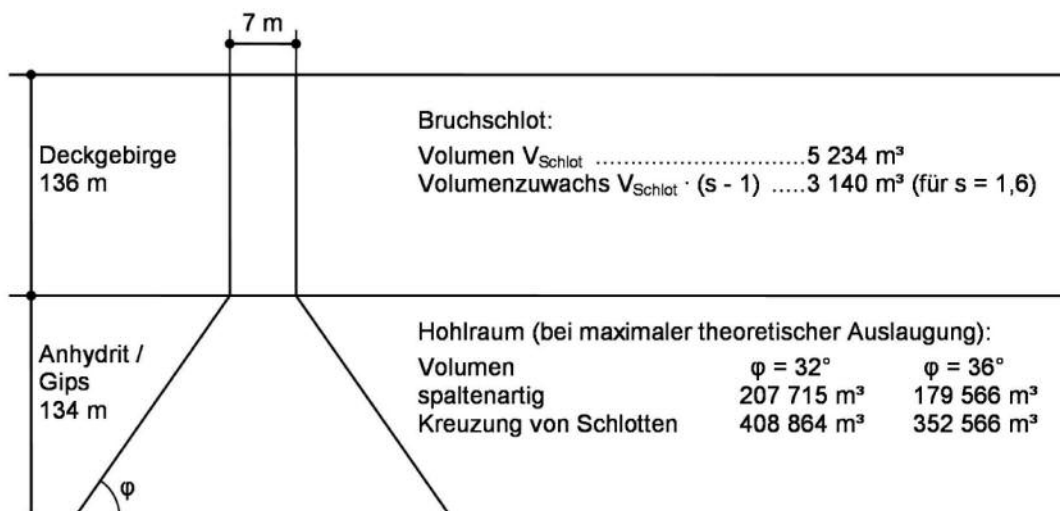


Fig. 10: Schematischer Schnitt durch den Erdfall auf der B 180 mit maximalen Hohlraum-Bruchvolumen-Bilanzen.

halb bei beiden Erdfällen in den nächsten Jahren gerechnet werden. Auch neue Erdfälle sind zu erwarten. Das Erdfallgebiet befindet sich in einer aktiven Karstzone mit summarisch mächtigen Sulfatablagerungen. Nicht geklärt ist der mögliche Einfluss von Steinsalz, da bekannt ist, dass der Salzspiegel in der Mansfelder Mulde bei etwa 150 m unter der Tagesoberfläche liegt, jedoch die Erdfälle sich in der Muldenrandlage befinden und somit nicht ausgeschlossen werden kann, dass dieses Gebiet im Bereich des Salzhanges liegt. Als Schlussfolgerung aus dieser Betrachtung kann deshalb für die B 180 aus sicherheitstechnischer und wirtschaftlicher Sicht nur eine Verlegung der Bundesstrasse in Frage kommen.

Die Analyse der numerischen Tagesbruch- und Erdfallabschätzungen zeigt deutlich, dass nur eine konsequent genetisch bezogene Definition der betrachteten Verbrucherscheinungen und aller Erscheinungsbilder der Karstprozesse die entscheidende Ausgangsbasis für eine praxisorientierte Betrachtung und für das Erkennen weiterer ingenieurgeologischer Gesetzmässigkeiten im Karst darstellt. Derzeit sind numerische Abschätzungen und Prognosen möglich, die auch für die Festlegung von Ansatzpunkten zur indirekten und direkten Erkundung nutzbar sind. Die Anwendungsgrenzen werden durch die verfügbare Repräsentanz der ingenieurgeologischen, hydrogeologischen, geomechanischen und geometrischen Parameter bestimmt. Eine numerische Vergleichbarkeit von Tagesbruch und Erdfall ist nur dann gegeben, wenn diese Kenndaten objektspezifisch vorliegen und die ingenieurgeologischen Gesetzmässigkeiten und Zufälligkeiten für den Betrachtungsbereich in die numerische Modellierung einfließen.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass bei beiden Erscheinungsbildern gleiche Stoffgesetze und Verbruchabläufe wirksam sind. Im konkreten Fall sind die gesetzmässigen und zufälligen Einflussgrößen auf die jeweiligen Erscheinungsbilder aus ingenieurgeologischer Sicht objektbezogen zu erkunden und zu bewerten.

Im Bereich des Karstes als eine tragende Säule der Ingenieurgeologie bedarf es einer Grundlagenforschung zu den verschiedenen Erscheinungsbildern. Einheitliche und fundierte Definitionen aus genetischer Sicht sind für einen wirkungsvollen Informationszuwachs unerlässlich. Nutzbare Ergebnisse lassen sich derzeit durch Rückrechnungen aus bereits gelaufenen Verbruchereignissen ableiten, wobei stets die jeweilige zeitliche Komponente der Dynamik von Verbrüchen zu berücksichtigen ist.

Literatur

- Aderhold, G. (2005): Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens - Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumassnahmen. - Geologische Abhandlungen Hessen, Bd. 115, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- Autorenkollektiv (2004): Empfehlung «Geotechnisch-markscheiderische Untersuchung und Bewertung von Altbergbau» des Arbeitskreises 4.6 der Fachsektion Ingenieurgeologie der DGGT e. V. - Tagungsband 4. Altbergbau-Kolloquium, 4.-6.11.2004, Leoben, Anhang S. 1-23, Verlag Glückauf, Essen.
- Eckart, D. (1972): Arten und Ursachen von Schäden an stillgelegten Bergwerksanlagen. - Neue Bergbautechnik 2. Jg., 8, 619-625.
- Eckart, D. (1973): Ergebnisse von Untersuchungen über Schäden an stillgelegten Bergwerksanlagen. - Freiburger Forschungsheft A 526, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Fenk, J. (1979): Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergestein. - Bergakademie Freiberg, Wissenschaftsbereich Markscheidewesen, unveröff. Dissertation.
- Fenk, J. (1981): Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergestein. - Freiburger Forschungsheft A 639, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig.
- Fenk, J. (1984): Berechnung von Tagesbrüchen. - Neue Bergbautechnik. 14. Jg., 11, 414-416 und 425.
- Herold, U.; Strobel, G.; Suderlau, G. (2004): Zu den Grosserdfällen von Neckendorf, südlich Lutherstadt Eisleben (Ldkrs. Mansfelder Land / Sachsen-Anhalt). - Tagungsband Subrosion und Baugrund in Thüringen. - Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Nr. 69, Jena, 67-78.
- Lerche, I.; Lempp, C. (2002): Methods for Estimating Associated Risks of Sinkhole Occurrences: A Demonstration Using Available Data from the Ruhr Valley Region of Germany. - Environmental Geosciences. 9(4), 173-183.
- Liszkowski, J. (1973): Bemerkungen über die Geomechanik von Erdfällen. - Proc. Congr. Ing.-Geol., Erdfälle und Bodensenkungen, Ing.-geol. Probleme löslicher Gesteine, IAEG, Hannover, T2 - F, 1-5.
- Meier, G. (1978a): Zum Problem von Tagesbruchanalysen in Altbergbaugebieten aus der Sicht praktischer Bergsicherungsarbeiten. - Neue Bergbautechnik, 8. Jg., 11, 639-643.
- Meier, G. (1978b): Zum Problem der hydrodynamisch wirksamen Trennflächen. - Freiburger Forsch.-Heft, R. A. 597, Leipzig, 57 S.
- Meier, G. (2001): Numerische Abschätzung von Tagesbruchgefährdungen in Altbergbaugebieten. - 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie in Karlsruhe, Sonderband Geotechnik, 11-22.
- Meier, J. (2002): Statistische Analyse von Tagesbrüchen über Abbaufeldern des Braunkohlen-Tiefbaus und ein Versuch ihrer numerischen Simulation mit dem Programm FLAC. - Unveröff. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- Meier, J.; Meier, G. (2006): Modifikation von Tagesbruchprognosen nach G. Meier. - Geotechnik Jg. 28, 2, 119-125.
- Meyn, L. (1850): Die Erdfälle. Ein Beitrag zu der Agenda geognostica für die norddeutsche Ebene. - ZDGG II. Bd., S. 311-338.
- Penzel, M. (1980): Bemerkungen zur Erdfallgenese in Auslaugungsgebieten aus geomechanischer Sicht. - Neue Bergbautechnik, 10. Jg., 1, 15-19.
- Prinz, H.; Strauss, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. - 4. Auflage, Elsevier GmbH, München.
- Reuter, F.; Kockert, W. (1971): Zu einigen Fragen des Karstproblems. - Zeitschr. F. angew. Geologie, 17 (8), 343-346.
- Reuter, F.; Molek, H.; Stoyan, D. (1986): Die zeitliche Einstufung geologischer Prozesse für ingenieurgeologische Aufgaben im Bergbau und Bauwesen unter besonderer Berücksichtigung des Karstes. - Z. geol. Wiss. Jg. 14, 2, 175-181.
- Thomas, A.; Reuter, F.; Bachmann, G. (1964): Ingenieurgeologisches Wörterbuch. - Zentrales Geologisches Institut, Berlin, Selbstverlag.