
Bruchmechanismen der Inkasion

Marco Filipponi

Im Rahmen meiner Diplomarbeit habe ich mich mit dem Verbruch in Höhlen, der Inkasion, befasst. In diesem Artikel versuche ich die wesentlichen Punkte zusammenzufassen.

Die **Inkasion** umfasst alle Begriffe, welche das natürliche Nachbrechen an Decken und Wänden, ausnahmsweise auch aus der Sohle, eines unterirdischen Hohlraumes bezeichnen. In der deutschsprachigen Höhlen- und Bergbauliteratur verwendet man für Inkasion auch die folgenden Synonyme: Deckenbruch, Blocksturz, Verbruch, Versturz, Einsturz, Höhlenverfall

In der **Gesteinsmechanik** werden im wesentlichen drei Versagensmechanismen des Gebirges unterschieden, die alleine oder gekoppelt vorkommen können:

- Das **Spannungsversagen**: Überlastung des Gebirges durch zu hohe Spannungen.
- Das **Kluftkörperversagen**: ein Problem, welches durch den Verschnitt mehrerer Trennflächen und der Hohlraumlaibung hervorgerufen wird.
- Das **Balken-Versagen**: Einzelne Gesteinspakete lösen sich durch das Eigengewicht vom Gebirgsverband und brechen in den Hohlraum ein.

Inkasion alleine trägt nicht zur Vergrößerung des unterirdischen Hohlraumvolumens bei: Ihre raumvergrößernde Wirkung erhält sie erst in Kombination mit einer anderen hohlraumschaffenden Kraft (Korrosion, Erosion). So werden Blöcke, die ins Wasser fallen, weggelöst oder erodiert (BÖGLI, 1978 S. 153).

Spannungsversagen

In einem Gebirge ohne ausgeprägte Durchtrennung (Trennflächengefüge) oder hohe Umgebungsdrücke kann es zu einer Überbeanspruchung des Gesteins kommen und damit zur Ablösung von Felsmaterial in den Hohlraum. Dieser Bruchmechanismus wird als Spannungsversagen bezeichnet. Das Spannungsversagen ist abhängig von:

- dem vorherrschenden primären Spannungszustand, d. h. die Spannungsverhältnisse in einem Gebirge verstanden vor der Hohlraumbildung
- der Hohlraumgeometrie
- der Gesteinsfestigkeit
- der Gebirgsfestigkeit
- der Zeit

Spannung versus Druck

Die Spannung und der Druck haben die selbe Masseinheit Pascal

$$1 \text{ Pascal (Pa)} = 1 \text{ N/m}^2 \\ = 10^{-5} \text{ bar.}$$

In der Gesteinsmechanik wird meist in Megapascal gerechnet:

$$1 \text{ MPa} = 1'000'000 \text{ Pa}$$

Der Druck ist definiert als Kraft (N) pro Flächeneinheit (m^2).

Die Spannung hat in der Gesteinsmechanik nichts mit der Spannung des elektrischen Stroms zu tun. Sondern es beschreibt die Kräfte die auf einen Körper wirken. Bei den Betrachtungen in diesem Artikel kann vereinfacht angenommen werden dass Druck gleich Spannung ist.

Primärspannungszustand

Unter dem Begriff "Primärspannungszustand" werden die Spannungsverhältnisse in einem Gebirge verstanden, das heisst in unserem Fall, bevor sich eine Karsthöhle gebildet hat. Dabei wird zwischen einer vertikalen und horizontalen Spannungskomponente unterschieden.

Die vertikale Spannungskomponente nimmt vorwiegend durch das Eigengewicht der Überlagerung mit zunehmender Tiefe zu. Dies entspricht einer Zunahme von etwa 0.027 MPa/m (Abb.1).

Die Horizontalspannungen in einem Gebirge sind meistens nicht in allen Richtungen gleich. Daher wird zwischen der maximalen und minimalen Horizontalspannung unterschieden. Die Orientierungen dieser Minima und Maxima müssen nicht den Hauptspannungsrichtungen im Gebirge entsprechen (mechanische Heterogenitäten). Die Grösse der Horizontalspannungen ist unter anderem abhängig von der Überlagerung und dem Elastizitätsmodul des Gesteins.

Bei Feldmessungen werden oft grosse Abweichungen von den Abschätzungen durch Faustformeln gemessen (Abb. 1). Diese Abweichungen werden durch tektonische Prozesse, Erosion oder Topographieeffekte verursacht. Auch können Spannungen im Gestein über geologische Zeiträume gespeichert werden und nicht mehr in einem Gleichgewicht mit den externen Kräften sein.

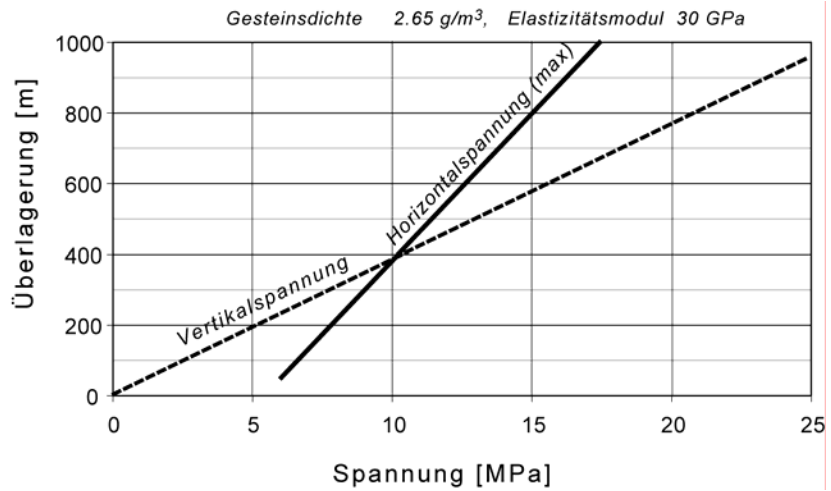


Abb. 1: Abschätzung der Primärspannungsverhältnisse nach SHEOREY (1994).

Spannungsverteilung um einen Hohlraum

Hohlräume im Gebirge, wie Tunnels oder eben Karsthohlräume, können selbst keine Spannung übertragen. Die Spannung, die das Hohlraumvolumen vor der Hohlraum-Entstehung (Primärspannungsverhältnisse) aufgenommen hat, wird auf das umliegende Gebirge verteilt (Abb. 2).

Die Spannungsverteilung um einen Hohlraum (Sekundärspannung) bildet einen konzentrischen Bereich, der im Untertagbau als "natürliche Gewölbebildung" bezeichnet wird. Die Form dieses natürlichen Gewölbes ist bei einem homogenen, isotropen Gebirge eine Ellipse.

Zur Abschätzung der Spannungsverteilung um einen Hohlraum können verschiedene analytische wie numerische Lösungen herangezogen werden, auf die in diesem Artikel nicht eingegangen werden kann.

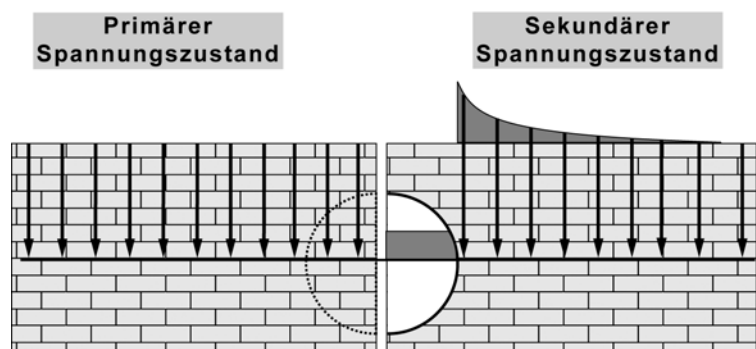


Abb. 2: Schematische Darstellung des Prinzips der Spannungsverteilung um einen Hohlraum. Jene Spannung die im primären Spannungszustand im Hohlraumbereich gewirkt hat, wird nach der Hohlraumbildung vom umgebenden Gebirge aufgenommen.

Mechanismus des Spannungsversagens

Überschreiten die Spannungsverhältnisse in einem Gebirge die Gesteinsfestigkeit, so entstehen Brüche. Die Brüche beginnen an Schwachstellen im Gestein zu wachsen. Die Wachstumsgeschwindigkeit eines Bruches ist unter anderem abhängig vom Verhältnis der Gesteinsfestigkeit σ_U zur grössten (Haupt)-Spannung σ_1 . HOEK & BROWN (1980) schlagen für den Tunnelbau die folgende Faustregel vor:

- $\sigma_U/\sigma_1 > 10$ stabiles Gebirge
- $\sigma_U/\sigma_1 \approx 5$ schwache Ablösung
- $\sigma_U/\sigma_1 < 3$ starker Bergschlag

Bei einer durchschnittlichen Gesteinsfestigkeit σ_U des Kalksteins von rund 100 MPa würde nach den obigen Faustregeln bei einer Sekundärspannung σ_1 von 20 MPa eine schwache Ablösung zu beobachten sein. Dies wäre z.B. der Fall in einem Höhlengang mit einem runden Querschnitt von 3 m Durchmesser in 400 m Tiefe.

In Gipshöhlen (Gesteinsfestigkeit von Gips beträgt nur 40 MPa) werden oft die für das Spannungsversagen typischen Abschaltungen beobachtet.

Wachstumsgeschwindigkeit eines Bruches

Die Gesteinsfestigkeit (Gesteinsfestigkeit von Kalkstein beträgt rund 100 MPa) wird im Labor durch einen Druckversuch bestimmt, der in der Regel wenige Minuten dauert. Die so gemessene Gesteinsfestigkeit ist also die Spannung, bei der sich Brüche innert Minuten durch den Prüfkörper fortgepflanzt haben. Diese Zeitabhängigkeit der Gesteinsfestigkeit (Abb 3.) bewirkt, dass ein Prüfkörper bei einer Versuchsdauer von 10 Jahren bereits bei der Hälfte seiner Festigkeit bei einem Standardtest bricht (THARP 1995).

10^{-6} Jahre = 1 Millionstel Jahr
 10^6 Jahre = 1 Million Jahre

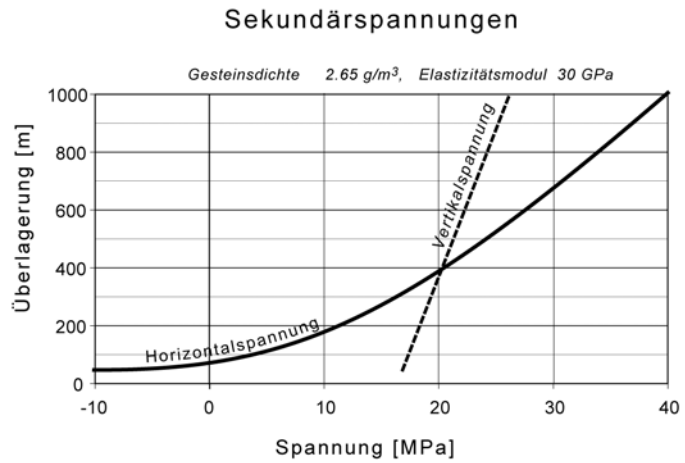


Abb. 3: Vertikale und horizontale und Sekundärspannungen in Abhängigkeit der Überlagerung um eine horizontal verlaufende Röhre mit einem Durchmesser von 3 m. Die positive Spannungen sind kompressiv, negative extensiv. Nach HOEK & BROWN (1980) und SHEOREY (1994)

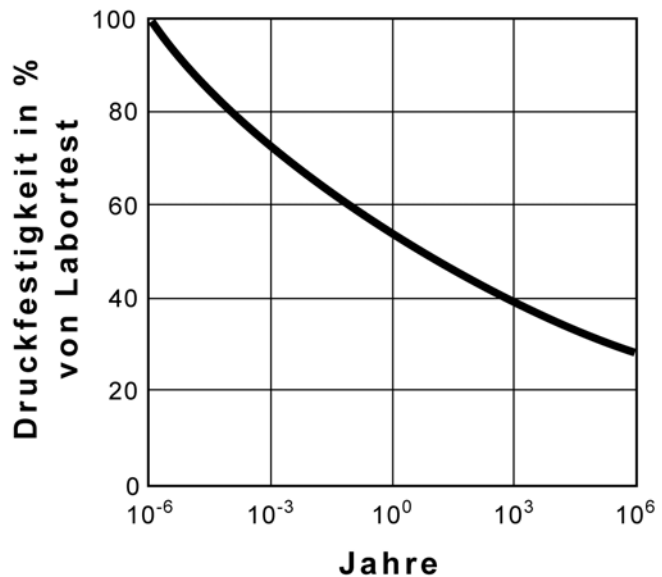


Abb. 3: Zeitabhängiges Verhalten der Druckfestigkeit einer Gesteinsprobe. (Nach THARP, 1995)

Einfluss der Trennflächen auf das Spannungsversagen

Trennflächen wirken auf zwei verschiedene Arten auf die Gebirgsfestigkeit und somit auf das Spannungsversagen:

- Trennflächen sind inkompetent in Bezug auf Spannungsübertragung. Dies führt dazu, dass auf Materialbrücken und die Trennflächenkörper mehr Spannung übertragen wird. Dies führt zu einer starken Abhängigkeit der Gebirgsfestigkeit von der Trennflächendichte (Kluftabstand). Zum Beispiel beträgt die Gebirgsfestigkeit bei einem mittleren Kluftabstand von 2 m rund 75 % der Gesteinsfestigkeit, hingegen beträgt die Gebirgsfestigkeit bei einem mittleren Kluftabstand von 20 cm nur noch rund 15 % (Abb. 4).
- Trennflächen tendieren dazu, sich weiter fortzupflanzen, wenn sie nicht an einer anderen Trennfläche enden.

Das heisst, bei einer Änderung der Spannungsverhältnisse im Gebirge wachsen sie oft weiter, weil es für das Weiterwachsen bedeutend weniger Energie braucht, als die Bildung eines neuen Bruchs in einer kompakten Felspartie. Dies kann bewirken, dass sich Brüche - nicht wie in der Theorie erwartet - in Richtung der minimalen Spannungsachse σ_3 ausbreiten.

Diese erhebliche Reduktion der Gebirgsfestigkeit durch das Trennflächengefüge ist schwer abzuschätzen und kann lokal sehr stark variieren.

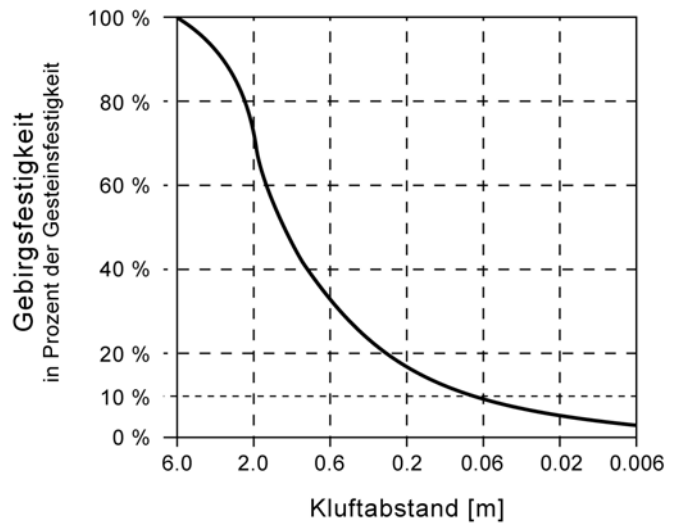


Abb. 4: Die Gebirgsfestigkeit wird mit abnehmendem Kluftabstand kleiner. (nach SPAUN & THURO, 1999)

Versagen im Balken-Modell

Beim oben besprochenen Spannungsversagen wurde das Gebirge als homogen und isotrop (*in allen Richtungen gleich*) betrachtet. Dem gegenüber behandelt die Modellvorstellung des Balkenversagens ein Gebirge mit einer ausgeprägten horizontalen Schichtlagerung. Dieser Versagungsmechanismus wurde bereits in den 60er-Jahren von DAVIS (1951) in die höhlenkundliche Literatur eingeführt. Davis geht von einem Höhlengang mit einem rechteckigen Querschnitt aus, der in einem gut gebankten, kompetenten Kalkstein liegt. Unter dem Einfluss des eigenen Gewichtes biegt sich die Kalkbank, welche die Höhlendecke bildet, und löst sich vom umliegenden Gebirge ab. Erstreckt sich die abgelöste Kalkbank über die ganze Hohlraumbreite, wird sie als Balken behandelt, endet sie frei (z. B. an einer Trennfläche oder freistehend in den Hohlraum hinein) wird sie als Konsole behandelt (Abb. 5).

Die Stabilität eines Balkens resp. einer Konsole hängt ab:

- von den mechanischen Eigenschaften des Gesteins,
- vom Verhältnis der Spannweite des Balkens (resp. Konsole) zur Mächtigkeit der Bankung,
- von den Spannungsverhältnissen um den Hohlraumrand,
- von der Zeit

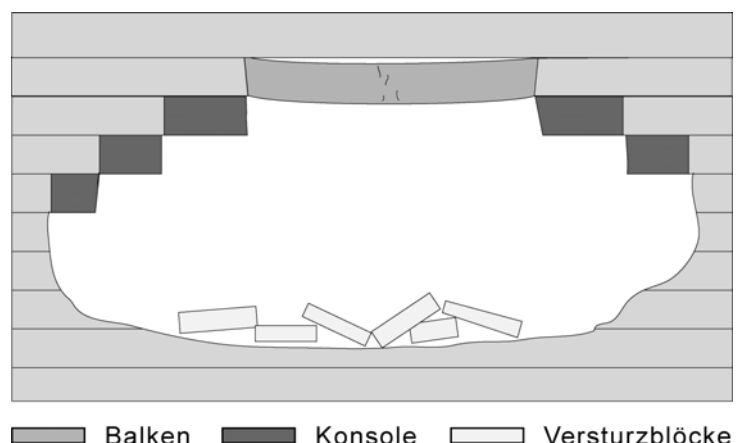


Abb.5: Schematische Darstellung des Balkenversagens.

Vorgang des Balken-Versagens

Der Vorgang des Balken-Versagens kann in vier Abschnitte unterteilt werden.

1. Eine Gesteinsbank löst sich vom umliegenden Gebirge ab:

Die Ablösung eines Balkens vom Gebirge geschieht weitgehend entlang von Schichtfugen, wobei es auch möglich ist, dass mehrere kleine Bankungen zusammen bleiben und eine grosse Bank bilden. Damit sich eine Bank lösen kann, müssen die Kornbindungen in der Schichtfuge überwunden werden, und die Bank leicht in den Hohlraum hinein biegen, wobei die Gewichtskraft die treibende Kraft ist. Dies geschieht einfacher je kleiner das Verhältnis der Mächtigkeit des Balkens zur Spannweite des Balkens ist. Die Gebirgsspannung um den Hohlraum wirkt insofern mit, dass sich bei kleinen horizontalen, kompressiven Spannungen am Hohlraumrand die Ablösung von Balken verstärkt.

2. In dem abgelösten Gesteinsbalken beginnen Brüche zu wachsen:

Die vom Gebirge abgelöste Gesteinsbank wird als Balken (resp. Konsole) betrachtet. Damit ein Balken stabil ist, muss die Biegefestigkeit des Gesteins (bei Kalkstein rund 10 MPa) grösser sein als die gravitative Kraft, die auf das Eigengewicht des Balkens (resp. Konsole) wirkt. Ein Kalkstein-Balken, der 1 m mächtig ist, bleibt bis zu einer Spannweite von rund 30 m stabil; ist der Balken aber nur 20 cm mächtig, beträgt die theoretische maximale Spannweite rund 13 m (Abb. 6).

Diese theoretische maximale Spannweite geht davon aus, dass der Balken auf seiner ganzen Länge perfekt ist. Das heisst, dass er überall gleich mächtig ist, keine Risse vorhanden sind, überall gleiche mineralische Zusammensetzung,

Ist das Verhältnis Spannweite zur Bankungsmächtigkeit zu gross, beginnen im Balken (respektive Konsole) Brüche zu wachsen. Die ersten Brüche treten auf der Oberseite nahe der Auflagepunkte auf, also vom Hohlraum her nicht sichtbar und auf der Unterseite in der Mitte des Balkens.

Kritische Spannweite in Abhängigkeit der Balkenmächtigkeit von Balken und Konsolen

$$\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3; \quad S = 10 \text{ MPa}$$

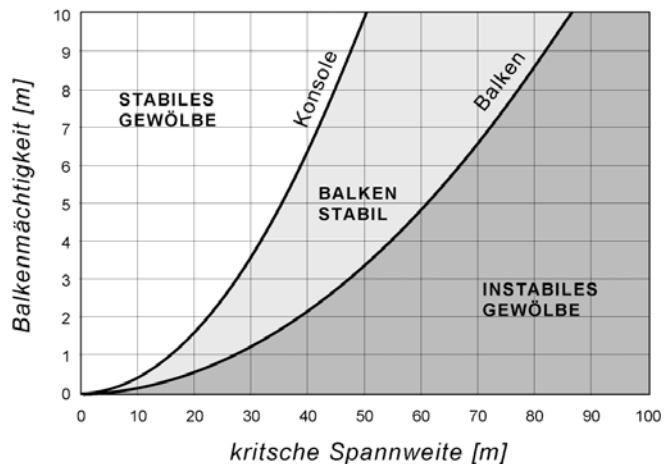


Abb. 6: Kritische Spannweite eines Hohlraums abhängig von der Balkenmächtigkeit.

(nach den Formeln von DAVIS (1951);

ρ = Gesteinsdichte, S = Biegefestigkeit)

3. Die Brüche wachsen durch den abgelösten Gesteinsbalken:

Erst wenn die Brüche durch den ganzen Balken (respektive Konsole) gewachsen sind, kann er in den Hohlraum stürzen. Wie schnell die Brüche durch den Balken wachsen, hängt, wie schon beim Spannungsversagen diskutiert, von der Gesteinsfestigkeit und der einwirkenden Kraft (beim Balken-Versagen das Eigengewicht) ab. Da das Verhältnis der Festigkeit zur einwirkenden Kraft in der Regel relativ gross ist, ist der Mechanismus des Balken-Versagens ein eher langsamer Prozess, der für einen Verbrauch mehrere tausend Jahre benötigen kann.

4. Der Niederbruch des Balken und die Bildung von Konsolen:

Sind die Brüche durch den ganzen Balken gewachsen stürzt dieser, oder nur Teile davon, in den Hohlraum und hinterlässt meistens eine Konsole, die als Auflager für die nächste Bankung dient, die sich vom umliegenden Gebirge löst (Punkt 1). Durch das immer neue Bilden von Konsolen wächst der Ausbruch treppenartig nach oben und verengt sich, bis eine Bankung einen stabilen Zustand erreicht (Punkt 2). Dadurch entsteht eine domartige Gewölbeform.

Eine andere typische Hohlraumform für das Balken-Versagen ist das Kastenprofil eines Rechteckganges. Hierbei brechen die einzelnen Balken in den Hohlraum, ohne Konsolen zu bilden.

Kluftkörperversagen

Die beiden zuvor betrachteten Versagensmechanismen nehmen ein Versagen im intakten Fels (Spannungsversagen) oder entlang von Schichtfugen (Balken-Versagen) an. Unter dem Kluftkörperversagen wird das Herausfallen oder Herausgleiten von Kluftkörpern in einen Hohlraum verstanden. Das Kluftkörperversagen geht von einem Gebirge aus, das aus einzelnen unverformbaren Kluftkörpern aufgebaut ist, die ineinander verkeilt sind, wobei die einzelnen Kluftkörper durch Klüfte begrenzt sind (Abb. 7).

Dieser Mechanismus ist stark abhängig von:

- der Durchtrennung des Gebirges
- dem Verhältnis zwischen Block- und Hohlraumgrösse
- der Hohlraumgeometrie
- der Orientierung der einzelnen Trennflächenscharen zueinander und zum Hohlraumrand
- der Verspannung der Blöcke untereinander durch den herrschenden Spannungszustand
- der Beschaffenheit der Trennflächen

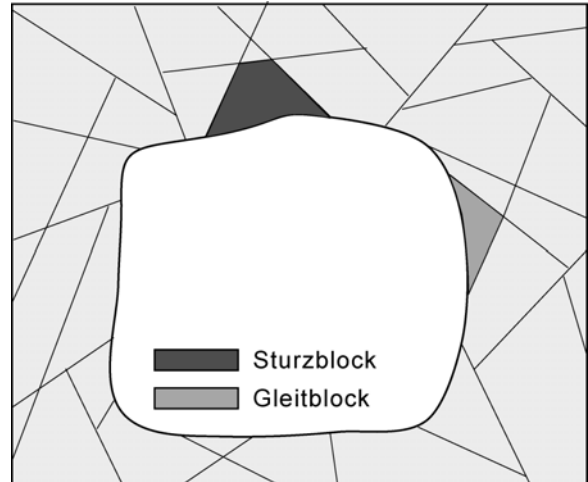


Abb. 7: Schema des Kluftkörperversagens.

Zeitabhängigkeit des Kluftkörperversagens

Die Modellvorstellung hinter dem Kluftkörperversagen geht von einem Gebirge mit „Blöcken“ aus, die an Trennflächen enden. In einem solchen Gebirge ist das Kluftkörperversagen nicht zeitabhängig: Ist ein Block unterschritten und es ist ihm geometrisch möglich aus dem Verband zu fallen/gleiten, wird er dies unmittelbar tun. Als einziger zeitlicher Faktor kann die Veränderung der Reibungseigenschaften der Trennflächen betrachtet werden (zum Beispiel durch Änderung des Kluftwasserhaushaltes, Verwitterung der Trennfläche, Spannungsverhältnisse um Hohlraumrand).

Ein natürliches Gebirge entspricht meist nur lokal dem Gebirgsmodell für das Kluftkörperversagen. Wenn Trennflächen in im kompakten Fels enden, hat es zwischen zwei benachbarten Trennflächen Materialbrücken. Diese müssen dann zu erst durchbrochen werden, bevor sich ein potentieller Kluftkörper sich in den Hohlraum bewegen kann. Dieses Durchbrechen der Materialbrücken ist meist zeitabhängig, da die Kraft des Bruchkörpers (Eigengewicht/Fläche der Materialbrücke) meist kleiner ist, als die kurzzeitige Bruchkraft des intakten Gesteins, weshalb auch hier das von THARP (1995) postulierte zeitliche Bruchverhalten zu trage kommt (vgl. Abb. 3).

Auslöser für Inkasionsprozesse

Unter Auslöser für Inkasionsprozesse werden Ereignisse verstanden, die zum Einsetzen eines Versagensmechanismus führen. In den folgenden Abschnitten werden einige Auslöser andiskutiert.

Gangerweiterung

Durch die laterale (*seitliche*) Erweiterung eines Höhlenganges wird die Spannweite grösser, was bei einer ausgeprägten Gebirgsdurchtrennung dazu führen kann, dass Blöcke im Sinne des Kluftkörperversagens in den Hohlraum stürzen. Andererseits kann die Spannweite so gross werden, dass das Balkenversagen einsetzt. Jede Vergrößerung des Hohlraumvolumens führt zu einer Veränderung der Spannungsverhältnisse am Hohlraumrand, was zu Spannungsversagen führen kann.

Ein Höhlengang in der phreatischen Zone einer Karsthöhle kann sich durch Korrosion (und Erosion) oder durch Versturzergebnisse an den Wänden lateral erweitern. Von einigen Autoren (zum Beispiel BADINO, 1995) wird postuliert, dass sich ein Höhlengang in der vadosen Zone durch Kondenswasser und Perkulationswasser wesentlich erweitern kann.

Wechsel in den hydrogeologischen Gegebenheiten

Das Sinken des Karstgrundwasserspiegels durch Fallen des Vorfluterniveaus bewirkt eine Änderung der karsthydrogeologischen Bedingungen: Phreatische Höhlenteile kommen in die Hochwasserzone oder in den vadosen Bereich zu liegen. Dies wird von verschiedenen Autoren als wichtiger Auslöser für Inkasionsprozesse bezeichnet (zum Beispiel BÖGLI, 1978 oder THARP, 1995).

Das Wasser in einem phreatischen Höhlengang übt einen Gegendruck auf die Hohlraumabgrenzung aus. Dieser so genannte hydrostatische Druck ist im Wesentlichen von der Wassersäule abhängig. Sinkt der Karstgrundwasserspiegel unterhalb eines Höhlengangs, fällt dieser trocken und der hydrostatische Druck fällt auf Null. Die Veränderung des Spannungszustandes kann Spannungsversagen oder Balkenversagen auslösen. Auch ist es möglich, dass Blöcke durch das Fehlen des Gegendruckes im Sinne des Kluftkörperversagens in den Hohlraum fallen.

Erweiterung von Trennflächen

Wasserwegsame Trennflächen können durch die darin zirkulierenden Wässer korrosiv erweitert werden. Die Erweiterung der Trennflächen kann eventuell noch bestehende Materialbrücken weg-lösen und dadurch Blöcke im Sinne des Kluftkörperversagens einstürzen lassen. Andererseits kann sich auf den Trennflächen eine tonige Schicht aus Lösungsrückstand ablagern, die den Reibungs-widerstand zwischen den Kluftkörpern reduzieren und dadurch ebenfalls zum Kluftkörperversagen führen kann.

Hochwasserereignisse

Hochwasserereignisse treten in aktiven Höhlen meist mehrmals Jährlich auf. In der vadosen Zone schwillt der Höhlenbach bei einem Hochwasserereignis an, erfüllt jedoch nur an wenigen Stellen den Höhlengang bis zur Decke mit Wasser. Das Wasser fließt meist relativ schnell und kann eine be-deutende Sedimentfracht mitführen. Dabei können in seltenen Fällen Blöcke aus dem der Gesteins-verband der Höhlenwand oder -Sohle gerissen werden (im weitesten Sinne Kluftkörperversagen). Ausserdem kann die mechanische Einwirkung auf den Hohlraumrand das Wachstum von Brüchen durch Spannungsversagen kurzzeitig beschleunigen.

In der Hochwasserzone werden die Höhlengänge bei einem Hochwasserereignis vollständig mit Wasser gefüllt, wodurch sich der Gegendruck auf den Hohlraumrand kurzzeitig verstärkt. Das Wechseln der Gegendruckverhältnisse kann das Bruchwachstum beim Spannungs- und Balken-Versagen beschleunigen.

Höhleneis

Höhleneisablagerungen kühlen den umliegenden Fels ab, was zur Bildung von Eislinsen in wasser-führenden Trennflächen führen kann und damit zur Ablösung von Kluftkörpern.

Erdbeben

Aus dem Untertagbau wurde die Erfahrung gemacht, dass unterirdische Bauten weniger empfindlich auf seismische Ereignisse sind als Bauten an der Erdoberfläche. Ein Beispiel war das grosse Erd-beben von 1986 in Mexico City, bei dem das U-Bahnnetz weitgehend unbeschädigt blieb und den Rettungskräften als Zufahrtswege diente (EM 1110-2-2901, 1997). Dennoch können Untertagbauten während eines Erdbebens Schäden erleiden.

Erdbeben können auf zwei Arten zu Inkasionsprozessen in einer Höhle beitragen: Einerseits durch Energiezufuhr, die das Bruchwachstums beim Spannungs- und Balkenversagen beschleunigen, andererseits durch Beschleunigung der Kluftkörper wonach die Haftreibung zwischen den Blöcken kleiner wird und es zu Kluftkörperversagen kommt.

Erbebenwellen bewegen sich im Untergrund als Kompressiv - oder Schwerwelle fort. Abgesehen von der Fortbewegungsart der Welle wirkt eine seismische Welle am Hohlraumrand kompressiv oder extensiv. Zugspannung kann auftreten, wenn die initiale Tangentialspannung klein ist. Die „Transitspannung“, als Effekt der seismischen Welle, kann in einer einfachen Betrachtung zu den

bereits vorherrschenden Spannungsverhältnissen um den Hohlraum addiert werden, da die Wellenlänge meist länger ist als die Hohlraumgrösse. Eine dynamische Verstärkung der Spannungen am Hohlraumrand kann auftreten, da die Resonanzfrequenz des Hohlraums viel höher ist als die typische Bandbreite der Frequenzen der seismischen Wellen. Die dynamische Verstärkung kann 10 bis 15% ausmachen (EM 1110-2-2901, 1997).

Überdeckung

Die Überdeckung eines Hohlraums kann auf zwei Arten auf die Stabilität eines Hohlraums wirken. Einerseits führt eine grosse Überlagerung zu hohen Primärspannungen (siehe Abschnitt Spannungsversagen), andererseits kann die Überdeckung zu gering für eine natürliche Gewölbebildung sein. Das letztere Ereignis ist verantwortlich für die Entstehung der Einsturzdolinen (Abb. 8).

Eine Zunahme der Überdeckung eines Hohlraums erfolgt beispielsweise durch die Überlagerung mit einem Gletscher. Die Abnahme der Überdeckung kann durch Oberflächenerosion geschehen oder durch das Aufwärtswachsen eines Hohlraums. HOEK (2000) schlägt aus Erfahrungen im Untertagebau vor, dass die minimale Überdeckung etwa 1.5mal die Spannweite des Hohlraums sein muss, damit dieser stabil ist.

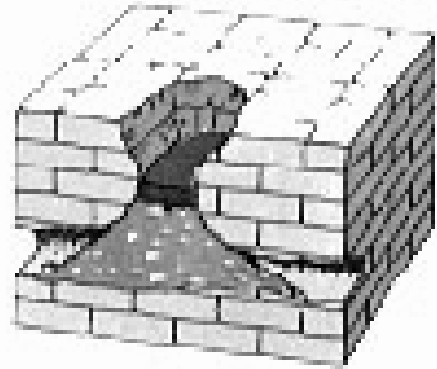


Abb. 8: Schematische Darstellung einer Einsturzdoline.

Schlussbetrachtung

Das Ziel dieses Artikels war es, dem interessierten Höhlenforscher einen Einblick in die drei wichtigsten Mechanismen zu geben, die sich hinter dem Begriff „Inkasion“ verstecken. Ich hoffe, gezeigt zu haben, dass ein Versturz in einer Höhle mit der Genese des Hohlraums in Bezug gebracht werden kann.

Literaturverzeichnis

- Bögli A. (1978) - **Karsthydrographie und physische Speläologie**. Springer Verlag, Berlin
- Davies W.E. (1951) - **Mechanics of cavern breakdown**. National Speleological Society Bulletin, v. 13, S. 36 - 43
- EM 1110-2-2901 (1997) - **Engineering and design: tunnels and shafts in rock**. Manual of the Department of U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC, www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-2901/toc.htm
- Goodman R. E., Shi G. H. (1985) - **Block theory and its application to rock engineering**. Prentice-Hall, London
- Hoek E. (2000) - **Rock Engineering**. On-line book, www.rocscience.com/hoek/Hoek.asp
- Hoek E., Brown E.T. (1980) - **Underground excavations in rock**. London: Institution of Mining and Metallurgy, London
- Sheory P.R. (1994) - **A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock**. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31(1), S. 23 - 34
- Spaun G., Thuro K. (1999) - **Geologische Gesichtspunkte bei der Klassifizierung des Gebirges**. In: Eichler K. et al. - Fels- und Tunnelbau, Verwitterung und Verbauung, Baustoffe und Umwelt, Vortrieb und Sicherung, Abdichtung und Ankerung, Bd. 592, Renningen-Malmsheim (Expert)
- Tharp T.M. (1995) - **Design against collapse of karst caverns**. in Beck B.F. et., Karstgeohazards, S. 397 - 406, Rotterdam, A.A. Balkema
- White E.L., White W.B. (2000) - **Breakdown morphology**. in Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers, S. 427 - 429, National Speleological Society, Inc, Alabama