

DRAFT

(Nicht abschliessend korrigiert, wird aus Zeitgründen trotzdem vorerst weitergegeben)

Über die unberechenbaren Ursachen von Kaverneneinbrüchen

1.11.2023 / wr

Inhalt

- Das Problem der Normen und der Forschung
- Probleme
- Problematische Schichten
 - Anhydrit
 - Dolomit
 - Mergel
 - Muschelkalk
- Die Entstehung eines Bruchs anhand zweier Beispiele
 - Beispiel 1
 - Beispiel 2, mit Anhydrit im Spiel
- Kaverneneinsturzscenario

Das Problem der Normen und der Forschung

Die Salinen AG existiert seit ca. 150 Jahren, verfügt über ein Monopol, hat jedoch wie aus den uns zugänglichen Informationen nie eine eigene Kavernen-Statik-Forschung betrieben. Weder theoretisch noch experimentell. Das kann als leichtfertig bis verantwortungslos taxiert werden, wenn ihre Arbeit nicht extern begleitet sowie überwacht worden war. Denn es ist in dieser Zeit von der Salinen AG als einzigem Kavernen-Erzeugenden Unternehmen dieser Art keine Initiative für Normen ausgegangen.

Probleme

1. Quasi senkrechte Brüche bei einer Belastung (andersartige Materialauffüllung oberhalb, Vertikallast oder Kraft) bei Material ohne freien Oberflächen (grenzend an anderes Material), hängt von der Elastizität des angrenzenden Materials ab.

2. Biegungsbelastung frei schwebender Decken mit unten hängendem nicht tragfähigem oder weniger tragfähigem Material, welche zu quasi senkrechten Brüchen führt.
3. Abbrüche und Loslösung von Salzdeckenstücken infolge Horizontalkraft (Bergdruck), verursacht durch den Druck des Juras gegen den Schwarzwald
4. Gesteigerte Instabilität nach passierten Abbrüchen von Teilen.
5. Unerwartete Einlagerungen von Schichten mit anderem Material, durch welches sich das die Sole in der Kaverne einen Weg nach außen bahnen kann.
6. Anfressen der Kaverne von außen durch unkontrollierte Laugungsprozesse.
7. Chemisch-physikalische Materialprobleme wie das **Anhydritproblem**.

<https://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-933146-34-2.volltext.frei.pdf>
https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/standards_fuer_nationalstrassen/astra_82007_berechnungundbemessungvontagbautunnels-berechnungsbe.pdf/download.pdf/astra_82007_berechnungundbemessungvontagbautunnels.pdf
https://sofistik-sonar.ams3.digitaloceanspaces.com/pub/infoline/SOFiSTiK-Seminar/2006/v07_mro.pdf
<https://www.drvollenweiderag.ch/pdf/59%20Ryser%20Astra%20Richtlinie%20Tagbautunnel.pdf>

Schichten und ihre Problematik

Anhydrit

Aus „Steine und Minerale“

<https://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=2&l=A&name=Anhydrit>

Anhydrit ist ein Mineral sedimentären Ursprungs, d.h. Anhydrit ist ein sog. Ablagerungsmineral, das sowohl primär, originär und sekundär aus anderen Mineralen entstehen kann.

Primär gebildeter Anhydrit entsteht durch die Verdunstung von Wasser, in dem sich natürlicherweise gelöste Salze befinden. Optimale Entstehungsbedingungen finden sich in vielen vom Meerwasser bzw. von der Frischwasserzufuhr abgeschiedenen Lagunen oder Seen. Für die Evaporation (= Verdunstung) des Wassers sind neben einer geringen Luftfeuchtigkeit auch Temperaturen jenseits der 30°C-Marke erforderlich, damit die Verdunstung von Flüssigkeiten in der trockenen Luft optimal vonstatten geht. Solche Bedingungen herrschen ebenfalls in hydrothermalen Gängen oder in der Umgebung von Vulkanen, wo Anhydrit das Produkt der sogenannten Resublimation (austretende Gase gehen sofort in den festen Aggregatzustand über; kristallisieren aus, ohne dass die gasförmigen Stoffe vorher flüssig sind) ist.

Sekundär gebildeter Anhydrit entsteht, wenn das wasserhaltige Pendant Gips (Formel: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) durch den Druck aufliegender Sedimente nach und nach entwässert wird. Der Vorgang der Dehydrierung kann durch die Zugabe von Wasser rückgängig gemacht

werden - einhergehend mit einer Volumenzunahme des einstigen wasserfreien Anhydrits um bis zu **60 %**. Durch dieses Größenwachstum ist Gips in der Lage, einst anhydrithaltige Gesteine förmlich zu zersprengen.

Vor allem, wenn Anhydrit auf geplantem Baugrund vorliegt, stellt dies ein **unberechenbares Risiko** dar, vor allem im **Tunnelbau** und damit bei den **Kavernen**. Ein Beispiel dafür sind die Tunnelröhren im Rahmen der Errichtung von Stuttgart 21. Der Untergrund im Baugebiet der Stadt Stuttgart ist großräumig von Anhydrit geprägt, von dem ein unkalkulierbares Risiko ausgeht. Bei Kontakt mit Wasser quillt Anhydrit auf und birgt das Potential der Zerstörung von Bauwerken in sich.

Aus „SteinRein“

<https://www.steinrein.com/ch/glossar/anhydrit/>

Das Kristallsystem kann sowohl sehr massige Aggregate, aber auch würfelige oder prismatische Kristalle entwickeln, die Spaltbarkeit ist anders als beim sehr ähnlich aussehenden Gips vollkommen bis sehr gut. Die Dichte von 3 g/cm³ entspricht relativ genau der Dichte von Zement.

In oberflächennahen Bereichen kommt es jedoch häufig zu Wassereinlagerung (Einlagerung von Kristallwasser) in das eigentlich mit 2 g/l schwer wasserlösliche Mineral – damit findet man dort meist Gipsgesteine. Beim Prozess der Wassereinlagerung und der Umwandlung zu Gipsgestein kommt es zu massiver Ausdehnung (bis zu 50 % Volumenzunahme), was nicht nur zu Problemen im Tunnel- und Stollenbau sondern oft auch zu Gebäudeschäden durch Hebungen im Bodenbereich führen kann.

Aus Wikipedia, mit Orten an welchen es schief lief

<https://de.wikipedia.org/wiki/Anhydrit>

Steht Anhydrit unter permanenter Feuchtigkeitseinwirkung, so nimmt er Wasser auf, und wandelt sich in Gips um. Durch diese Einlagerung von Kristallwasser kann das Volumen um mehr als 50 % zunehmen. Diese auch als Aufquellen bezeichnete Volumenzunahme eines Anhydritkörpers im Untergrund kann sich bis an die Erdoberfläche durchpausen und dort unter Umständen Schäden an Gebäuden hervorrufen, wie im Fall der Hebungsrisse in Staufeu im Breisgau.

Im Bergbau können aufquellende Anhydritschichten die Stollen verengen (Zwerglöcher, Quellungshöhlen) und das Nebengestein sprengen. Gleiches gilt für den Tunnelbau, wie zum Beispiel beim Adlertunnel (CH), Engelbergtunnel, Weinsberger Tunnel oder auch bei den Tunneln von Stuttgart 21, welche zum Teil durch Anhydritschichten verlaufen.

Berechnungen zur Illustration der Ausdehnung von Anhydrit

Hat man dann einen Würfel von einem Kubikmeter (Seitenlänge 1 m), so hat dieser nach der Ausdehnung ein Volumen von 1.5 bis 1.6 Kubikmeter und einer Seitenlänge von ca.

1.14 bis 1.17 m. Bei einer Kavernendeckenbreite von 100 m sind das dann ca. 114 bis 117 m. Bei einer Schichtdicke von 10 m sind es 11.4 11.7 m. Da die Decke horizontal nicht ausweichen kann verbiegt sie sich vertikal oder bricht ein. Auch ergeben sich vorher an den Orten der Ausbrüche lokale Spannungsspitzen nach oben und unten. Jene nach oben verändern die Spannung in der tragenden Kalkschicht. Zum vorhergehenden Gegendruck gleich dem Druck der Materialsäule von oben kommt noch der durch die Spannungsspitzen erzeugte Druck hinzu, während dieser satt nebenan fehlt. Das kann im Kalk zu vermutlich schon zu Abscherungen führen. Damit bricht die Kalkdecke ein. Eine andere Erklärung des Kalkschichteinbruchs ist die zu große Spannweite infolge einer zu großen Kaverne, weil am Rande durch die Wirkung des Anhydrits das tragenden Salzfundament wegbrechen kann und sich so die Kaverne seitwärts ausdehnt. Ohne Anhydrit wäre es vermutlich nicht so schlimm abgelaufen.

Unklar ist mir noch, wie viel Volumenanteile Wasser ein Volumenanteil Anhydrit absorbiert. Die Recherchezeit dazu hat bisher gefehlt. Wenn das Volumen des aufnehmenden Anhydrits um mehr zunehmen würde als das Volumen des aufgenommenen Wassers, so würde das verbleibende Wasser und das Anhydrit die Kalkschicht verdrängen müssen. Im anderen Falle würde anderes Material in die Kaverne einbrechen. Wäre das aufgenommene Volumen Wasser exakt gleich dem fehlenden Volumen Wasser, so würde das Wasser aus der Kaverne weg wandern und es würden deshalb Druckunterschiede entstehen. In jedem Falle würde es also zu neuen Spannungsspitzen kommen.

Dolomit

Das Mineral Dolomit (Formel: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) wird nach der Systematik der Mineralien den Carbonaten zugeordnet.

Dolomit besteht bis zu 21,7% aus Calcium und zu 13,3% aus Magnesium.

Primär entstandener Dolomit ist ein Ausfällungsprodukt magnesium- und calciumreichen Meerwassers. Die entsprechenden Voraussetzungen sind jedoch selten, insofern hypersaline Wasserbedingungen, hohe Verdunstungsraten und anaerobe Mikroorganismen vorhanden sein müssen. Alternativ wird primärer Dolomit in kalkreichen Gängen hydrothermal gebildet.

Sekundärer Dolomit entsteht durch die nachträgliche Zufuhr von Magnesium-Ionen in kalkhaltigen Mineralen oder Gesteinen.

Dolomit hat eine nur sehr schwache Löslichkeit, keine große Härte (Mohssche Härte beträgt 3,5 bis 4) und eine geringe Dichte ($2,9 \text{ g/cm}^3$).

Dolomitsteine sind im Vergleich zum chemisch verwandten Kalkstein bei ähnlicher Struktur und Textur etwas härter und sehr viel spröder.

[https://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=2&l=D&name=Dolomit%20\(Mineral\)](https://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=2&l=D&name=Dolomit%20(Mineral))

Mergel

Mergel ist wie man in unserer Gegend aus Erfahrung weiß gut wasserdurchlässig und sehr weich.

Mergel enthält sowohl Kalk als auch silikatische Bestandteile meist kleiner Korngröße (Ton und/oder Schluff). Gröberes Material (Sand und Kies) kann vorhanden sein. Bei höheren Kalkgehalten spricht man von Kalkmergel, bei hohem Tongehalt von Tonmergel.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Keuper>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Mergel>

Muschelkalk

Die Eigenschaften von Muschelkalkstein entsprechen denen anderer Kalksteine, zu denen sie ja gehören. Dazu zählen:

die meist helle Farbe (überwiegend Weiß bis Ocker, durch Eisen- und Mangan-Anteile aber auch andersfarbig möglich)

die relativ geringe Härte (Mohs-Härte von 3) und

die sehr hohe Säure-Empfindlichkeit (zum Auflösen reicht oft schon leicht saures Wasser, beim Kontakt kommt es zu massiver Gasentwicklung)

Durch den relativ langsamen Entstehungsprozess über die Entwicklung von Kalkschlämmen bis hin zur langsamen Verfestigung der Ablagerungen und dem Auskristallisieren von Calcit in den vorhandenen Hohlräumen kann sich die Gesteinsstruktur am Ende optisch deutlich von der Struktur der Ausgangs-Ablagerungen unterscheiden. Im Zuge der Verfestigung kommt es auch zu Veränderungen im Mineralbestand, der ursprünglich vorhandene Aragonit wird während der Gesteinsbildung zum größten Teil in Calcit umgewandelt.

Muschelkalk: <https://www.steinrein.com/ch/glossar/muschelkalk/>

Die Entstehung eines Bruchs anhand zweier Beispiele

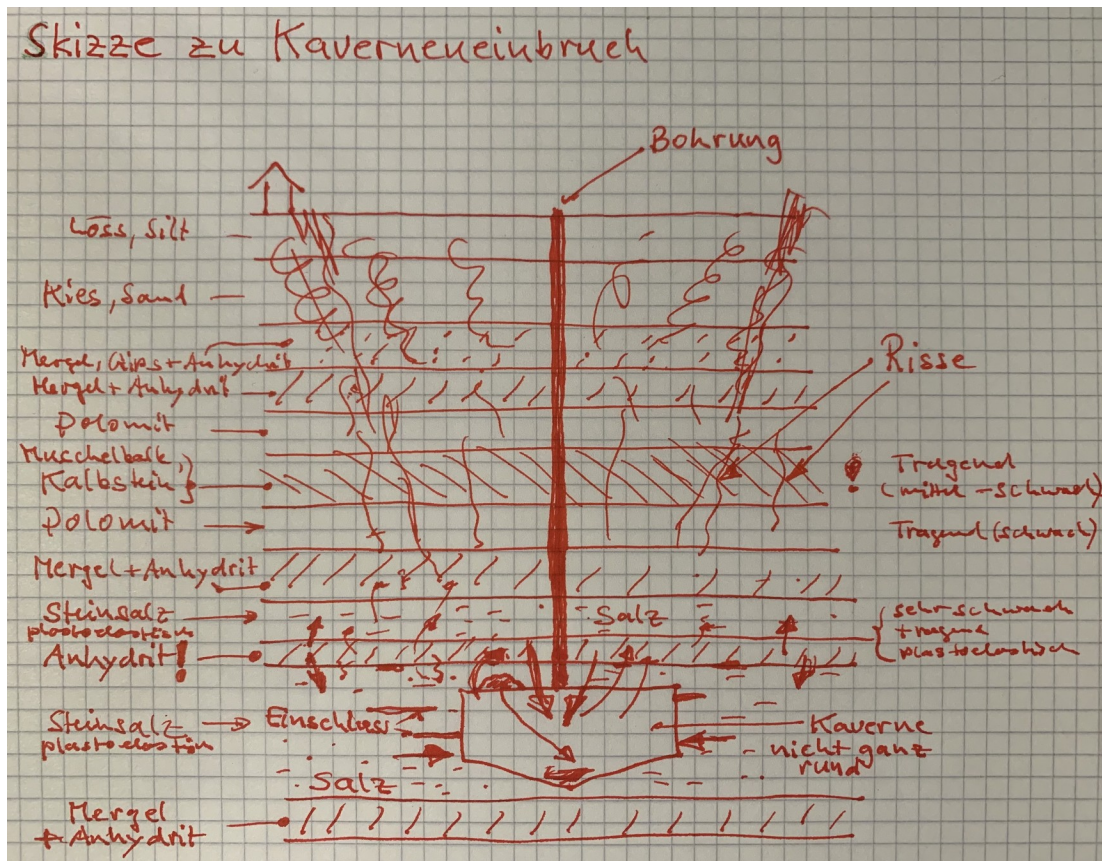
Beispiel 1

Die Kavernendecke ist zu weit gespannt für das Gewicht der darauf liegenden Schichten. So kommt es zum Einbruch, vermutlich einem Kaminbruch verbunden mit Rutschungen im losen Material ohne feste Verbundenheit wie in den oben liegenden Schichten.

Beispiel 2, mit Anhydrit im Spiel

Teile der Kavernendecke brechen aus, vielleicht wegen Einschlüssen oder wegen dem horizontalen Bergdruck infolge der Jurafaltung. Wenn dann Wasser in die Anhydritschicht dringt, so dehnt sich diese aus, was zusammen mit dem Bergdruck den Druck in der Kaverne vergrößert. So wird das Wasser in die durch die Ausdehnung des Anhydrits (um bis zu 60%) entstandenen feinen Risse und Verwerfungen im Salz sowie im Anhydrit nach

außen gequetscht, was zu einer Verkleinerung der Kaverne und weiteren Abbrüchen führt. Anhydrit stellt ein unberechenbares Risiko im Tunnelbau dar. Schließlich wird durch den erweiterten Druck auch die oben liegende Salzschieht und beschädigt und auch die darauf liegende Mergel-Anhydritschicht, welche wiederum Wasser aufnimmt und sich damit ausdehnt, womit das Dolomit und die Muschelkalkschicht infolge der Kräfte von unten entgegengesetzten und vermutlich noch größeren Spannung ausgesetzt wird, bis sie bricht, wodurch sich senkrechte Risse und Verwerfungen bilden, was zu einem Einsturz führt. Denn der Rest oben ist kaum tragend.



Beschreibung eines möglichen Ablaufs eines Kavernen-Zusammenbruchs

Durch irgend ein Versehen der Natur löst sich ein Salzkumpfen von der Kavernendecke und fällt auf deren Boden: eine Erschütterung, ein langsamer Materialfluss, einen Einschluss welcher Wasser gezogen hatte, durch Eindringen von Wasser dem Rohr entlang, es existiert eine Anhydritader, welche bis in die Kaverne hinein reicht, die aufquillt – oder das Grundwasser hatte einen Weg gefunden einzudringen, weil nicht immer alles Material homogen war, was man ja erwarten muss. Und als Folge kommt die Anhydritschicht mit dem Salzwasser in Berührung. Nun beginnt diese Schicht lokal aufzuquellen und damit aufzublähen, zu verdicken, mehr Platz einzunehmen, wodurch weiteres anschließendes Salz sich von der Decke löst und herunterfällt. Womit sich die freigelegte Anhydritfläche vergrößert und weitere Bereiche dort an Volumen zunehmen und der Prozess sich iteriert. Schließlich existiert dort eine Zone, welche mehr Raum einnehmen will, wodurch die Anhydritschicht sich zu verbiegen beginnt, da sie seitlich nicht weichen kann und auch nach oben nicht. Oder doch? Nach unten wird das Wasser noch

mehr gepresst, falls vorher von aussen Wasser zur Anhydritschicht geflossen ist, der Druck steigt und somit auch nach oben. Nach unten kann das Material auch nicht weiter weichen. So wird das Wasser in feine Haarrisse gepresst, welche sich dadurch vergrößern – und so geht dieser Prozess weiter: Nur nach oben kann der Druck dem Material Platz schaffen, da dort „nur“ eine ca. 200 m bis 230 m dicke Materialschicht lastet. Damit wechseln stark durch die Ausdehnung des Anhydrits verstärkte Kräfte von unten in gewissen Zonen mit den schon vorher vorhandenen Auflagekräften gegen die Last von oben in Nachbarzonen. Die Anhydritschicht erodiert und es entstehen infolge des nicht mehr gleichmäßigen Drucks mit Druckspitzen oben Brüche im Material, wie man sie von Pressversuchen mit Kalksteinen kennt. Das Abbrechen und Hinunterfallen von Anhydrit verringert den Druck nicht. Die Brüche formen sich in Richtung des Pressdruckes aus. Damit lässt sich das Durchbrechen der Kalkschicht erklären: So bekommt schließlich auch die Kalkstein- und Dolomitdecke Risse, die tragende Schicht also. Durch diese Risse kann Wasser in die Grundwasserzone entweichen, wo dann der Druck abfällt. Dadurch wird die Kaverne kleiner. Der Prozess beschleunigt sich mit zunehmender durch Abbrüche für den Kontakt mit Wasser freigelegter Anhydritfläche. Und schließlich bricht das Ganze entlang den Bruchlinien durch den Dolomit und weiter durch den Kalkstein etc. ein. Denn die Mergel-, Kies-, Sand- und Lössschichten sind nicht so fest gefügt, dass diese infolge große Gewalt brechen müssten. Es könnte da auch das Eigengewicht ausreichen. So hat man einen gemischten Einbruch, in festeren Zonen eher kaminartig, in weicheren, fließenden Zonen eher kegelartig. Wenn die tragende Fläche oben schon vorher so groß gewesen war, dass dadurch die Grenzen der Tragfähigkeit überschritten worden sind, so geht die Sache umso schneller. Besonders dann noch, wenn seitlich an den Grenzen von Decke und Wänden Wasser in Haarrisse der Wände eindringt und in den Ecken Teile der tragenden Wand ausbrechen, so dass die auf dem Wasser schwebende Deckfläche noch größer wird, sodass die nun weiter gespannte Decke an Tragfähigkeit verliert. Das Schlimme an dieser Sache ist, dass dieser Prozess vorhersehbar ist und auch von einem Wandern der Kaverne verursacht werden kann, wenn unten Salz infolge Übersättigung auskristallisiert und unten infolge Untersättigung gelöst werden kann. Es könnte auch sein, dass der Druck der aufgequollenen Anhydritschicht an oberen Deckenrändern die seitlichen Wände zum Einsturz bringt und so die frei gespannte Decke der Kaverne vergrößert, so lange, bis die Tragkraft dieser nicht mehr ausreicht das große Gewicht der oben darauf ruhenden Materialsäule zu tragen. **Dabei ist zu beachten, dass der tragende Umfang der Kaverne mit dem Radius linear zunimmt, der zu tragende Volumeninhalt aber mit dem frei schwebenden Flächeninhalt, das heisst quadratisch mit dem Radius.** Das ist extrem gefährlich, denn irgendwann muss die Sache dann unter der nun herrschenden Überspannung einbrechen, da dieser Prozess ja erst beendet ist, wenn ihm kein Wasser mehr nachgeliefert wird!

Der unten zitierte Text aus den „MITTEILUNGEN der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Heft 154, Seite 3“ zeigt, dass zur Beurteilung der Anhydritschicht und zum Problem, ob die Volumenbilanz bei einem Teil Anhydrit und einem Teil Wasser bei der Wasseraufnahme des Anhydrits negativ, ausgeglichen oder positiv ist, im Moment keine eindeutige Position existiert. Man weiß eben zu wenig über die Anhydritschicht. Es wäre auch möglich, dass es jemand weiß, jedoch bedeckt hält, weil das Resultat unangenehm ist. Oberhalb des Salzes liegt eine quellfähige Schicht, darüber eine Wasser führende, hier darüber Lettenkohle hier, darüber wieder eine quellfähige Schicht und darüber eine Wasser führende. Durch das Salzfließen bei der Kavernenbildung kann es zu Harrison kommen, welche Wasser zur Anhydritschicht vordringen oder in sie eindringen lassen. Das darauf folgende auf Aufquellen des Anhydrits kann die

Ursache des späteren senkrechten Bruchs in den darüberliegenden Schichten sein, was man als Ursache des Kavernen Einbruchsverstehen kann. Wichtig ist aber zu bedenken, dass das Anhydrit beim Aufquellen in der Regel stationär an seinem Lageort bleibt, das Wasser aber zu ihm hinzu transportiert wird. Daher ist dort wo das Aufquellen stattfinden zu wenig Platz und es entsteht ein gewaltiger Druck. Die Anhydritschicht geht ja neben der Kaverne weiter und quillt auch in den Randzonen und vermutlich noch weiter nebenan auf. Dabei schliessen sich wohl die Wassertransporthaarrisse, so dass die Lauge voererst nicht entweichen kann, bis ein Bruch entsteht. Dies ist auch für die Zukunft brandgefährlich, denn es könnte sich anderswo wiederholen, zumal die Karstschicht wohl in ihren Höhlen tief unter der Erde nicht Luft, sondern Wasser enthält.

Zitat aus *MITTEILUNGEN der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Heft 154, Seite 3:*

"Durch die Hydratation von Anhydrit entsteht Gips. Gips hat ein um rund 61% grösseres Volumen als der ursprüngliche Anhydrit, jedoch ein um rund 10% kleineres Volumen als beide Reaktanten zusammen (Anhydrit und Wasser). Die Stöchiometrie der Reaktion und die molaren Volumen der beteiligten Stoffe erlauben keine quantitative Aussage über die hydratationsbedingte Volumenänderung einer Gesteinsprobe, weil diese nicht nur von der Menge des umgewandelten Anhydrits, sondern auch von den Veränderungen des Porenvolumens und somit von der Form, der Grösse, der Richtung und der Verteilung der Gipskristalle abhängt. Je nach Porengeometrie, Chemismus des Porenwassers, Porenwasserdruck und Druck in der festen Phase können die Gipskristalle die Poren verstopfen oder das Gesteinsgefüge sprengen. Im ersten Fall würde das Porenvolumen abnehmen, im zweiten Fall zunehmen.

Zu einer weiteren Komplexitätssteigerung führt die Tatsache, dass die Anhydritumwandlung über die Lösungsphase erfolgt. Anhydrit löst sich in Porenwasser auf - Gips fällt aus der Lösung aus, wobei die Kalzium- und Sulfationen mit dem Porenwasser zirkulieren. Anhydritlösung und Gipsausfällung werden also durch Transportprozesse überlagert. Es ist unbekannt, ob und in welchem Masse diese Transportprozesse für das makroskopisch beobachtete Verhalten von Bedeutung sind. Neben der Reaktionskinetik dürfte dabei auch die Filtergeschwindigkeit des Porenwassers, welche von der Durchlässigkeit des Gebirges und den hydraulischen Randbedingungen abhängt, entscheidend sein. Theoretisch ist es denkbar, dass der Kalzium- und Sulfatgehalt durch die Transportprozesse in einem Bereich abnimmt (Abtransport der Lösungsprodukte) während in einem anderen zunimmt. Im ersten Bereich hätte man Auslaugung des Gesteins, im zweiten Bereich Gipsbildung – selbst wenn dieser Bereich im natürlichen Zustand sulfatfrei wäre. Das in den Entwässerungsleitungen mit dem Bergwasser anfallende Sulfat, welches auch ein Lösungsprodukt ist, verdeutlicht, wie unsicher Massenbilanzen sind."

Kaverneneinsturzscenario in Schritten

Möglicher Algorithmus oder Modell zu einem Kavernen-Einbruch, erklärt mit einem Szenario, das auch etwas abweichend ausgeprägt sein könnte.

1. Während dem Sohlen oder der Entstehung einer Kaverne, beobachtet man an der Oberfläche die Bildung einer schwachen Mulde. Unten entsteht ein Hohlraum, der zur Folge hat, dass die oben liegenden Schichten sich leicht nach unten biegen.
2. Eine Biegelinie an der Kavernendecke kann man in erster Näherung als einen Kreisbogen verstehen. Durch das Biegen und Salzfließen bilden sich in der untersten Salzschiebt feinste Risse in Richtung Kreiszentrum einer solchen Biegelinie. Denn Salz besteht aus Kristallen und Kristalle lassen sich kaum verformen. Sie sind miteinander verwachsen oder liegen auch nur lose aufeinander, so dass es an den schwachen Stellen reißen kann. So entstehen ganz feine Risse wie beim Durchbiegen eines uralten Radiergummis.
3. Eine Kaverne entsteht, indem man horizontale Scheiben heraus löst, von unten nach oben. Während dem Laugen liegt immer ein Gas, Stickstoff, zwischen der Lauge und der Decke, außer wenn es darum geht, die Decke weiter oben neu zu bilden. Dabei wird kontrolliert, dass der Kavernenradius nicht so groß wird. Wie genau das am besten gesteuert wird, weiß derjenige, der diese Operation ausführt. Während ihrer Entstehung wird die Kaverne durch verschiedene Messungen überwacht. Wenn Wasser vorhanden ist, kann dieses in die feinen Risse eindringen und infolge Kapillarität auch nach oben wandern.
4. Wenn eine Kaverne fertig erstellt ist und kein Salz mehr abgelöst werden soll, wird sie mit gesättigter Sohle gefüllt und dicht verschlossen. Weil sich die oben sich befinden Schichten weiterhin nach unten neigen und nun in der Kaverne einen Druck erzeugen, stellt sich schließlich darin der dort normale Bergdruck ein. Dann sollte nichts mehr passieren. So kann man meinen.
5. Kapillarität und Bergdruck aber sorgen nun dafür, dass Wasser in die feinen Risse im Salz oben eindringt und diese Risse manchmal erweitert. Erschütterungen und Erdbeben tragen das ihre dazu bei. Bis schließlich Wasser zur Anhydritschicht dringt und diese aufzuquellen beginnt. Ebenso quillt diese Schicht auf, wenn Wasser von außen zu ihr gelangt. Die Schicht oberhalb ist ja potentiell quellenreich. weiter oberhalb liegt dort die karstige Muschelkalkschicht mit Wasser in den Karsthöhlen.
6. Beim Aufquellen kann die Anhydritschicht nur nach unten ausweichen, da sich dort ausser Salz nichts Festes, sondern Salzwasser befindet. Weil sie sich in alle Richtungen ausdehnt, muss sie sich also verbiegen. Daher stürzt weiteres Salz in die Kaverne runter, bis die Anhydritschicht die Decke bildet. Wegen dem Verbiegen wird vermutlich auch viel Anhydrit hinunter stürzen. Bis zum Deckenrand. Wegen der Volumenbilanz wird der Druck in der Kaverne nicht groß ändern. Sie ist nun aber etwas nach oben gewandert.
7. Nun zeigt das Anhydrit seine Angriffsflächen an den Deckenrändern. Beim Aufquellen sprengt es einen Teil der Wand weg und vergrößert so die Deckenfäche. Und dies überall. dieser Prozess etabliert sich nun. Die Deckenfläche wird immer größer.
8. Der Umfang der Decke vergrößert sich nach den Gesetzen der Geometrie proportional zur Vergrößerung des Kavernenradius. Damit auch der Auflagebereich,

wo die Decke in der Wand verschwindet und wo sie auf das Salz gestützt ist. Auf der Decke aber ruht eine gewaltige Materialsäule. Das Gewicht dieser Säule nimmt proportional zur Deckenfläche zu, welche wiederum proportional zum Quadrat des Radius zunimmt. D.h. ist der Radius doppelt so groß, so ist das getragene Gewicht auf der Decke vier mal so groß. Irgendwann ist nun dieses Gewicht zu groß für die tragende Kalk- und Dolomitschicht, wenn der Prozess so weiter läuft. Dann stürzt die Sache ein.

9. Wie der Einsturz der Decke mit der verkarsteten Kalkschicht sein wird, hängt auch von der Verteilung der Karsthöhlen ab. Diese Verteilung ist wohl bei jeder Kaverne anders. Eigenartig: Anhydritschicht ist bisher in der Diskussion nicht aufgetaucht.