

Ingenieurgeologische Ergebnisse bei der Standsicherheitsanalyse der „Kalkberghöhle“ in Bad Segeberg*

Zusammenfassung

Die nördlichste Sulfatkarsthöhle Deutschlands befindet sich im „Kalkberg“ von Bad Segeberg. Ein Teil des Höhlensystems ist für Besucher zugänglich. Im Rahmen von ingenieurgeologischen Untersuchungen stand die Aufgabe, eine Bewertung der Standsicherheit des Besucherbereiches durchzuführen. Grundlage dazu waren vermessungstechnische Aufnahmen, strukturgeologische Datenerfassungen und geotechnische Schadensdokumentationen im Über- und Untertagebereich. Im Ergebnis der komplexen Untersuchungen wurden die Auslaugungs- und Schadensformen klassifiziert und Gefährdungsbereiche ausgegliedert. Auf notwendige partielle Sanierungsmaßnahmen wurde zur Gewährleistung der Hohlraumsicherheit verwiesen. Für den Besucherweg wurden grundsätzlich standsichere Bereiche ausgewählt. Die aktiven Karstprozesse zeigen sich insbesondere in den Randbedingungen durch Erdfälle, Rissbildungen und Vergipsungen.

Abstract

Germany's most distant northern sulphate karst cave is situated in the „Kalkberg“ of Bad Segeberg. This hill is located in the top of a salt stock. Due to an intensive salt leaching, the overlying rock collapsed and today a part of these faulted blocks forms the hill with a height of about 60 m. The solid bedrock is anhydrite of Zechstein Subdivision. Because of the atectonic deformations, the layers of the rock group are in a very steep and disturbed stratification. The cave has formed after the last glacial epoch in the Holocene. An active leaching process does not take place any longer. A part of the cave system is open to visitors. Within the scope of engineering-geologic investigations, the task was to carry out a valuation of the stability in the visitor area. The basis for this were mensuration-technical surveys, structural-geological data coverage and geotechnical documentation of damages of the surface and underground area. As a result of the complex investigation, the sorts of leaching and damages were classified and endangering zones were worked out.

* Veröffentlicht in: Bericht 14. Tagung f. Ing.-Geol., 26.-29. März 2003, Kiel, S.353-358

Considering safety, not only the cave but also urban utilisation of the terrain surface was taken into account. The types of the sulphate karst are present in a pure form. The boundary areas of the cave system were graded as a special critical risk zone. Collapses are still taking place in the shape of larger sink holes and fissure sinking. Gypseous forms in anhydrite are continually reducing the stability of the cave. Fundamentally stabile zones have been chosen for the visitors' path through the karst cave. Concerning the guarantee of the cave stability, it has been referred to the necessary partial stabilizing measures and periodic controls.

1 Problemstellung

Die nördlichste Besucherhöhle Deutschlands befindet sich im „Kalkberg“ unweit des Zentrums der Stadt Bad Segeberg. Abweichend vom Namen des Berges steht Anhydrit- bzw. Gipsstein des Zechsteins auf dem Süfeld-Segeberger Salzstock an. Dieses Sulfatgestein wurde zu Bauzwecken über Jahrhunderte im Steinbruchbetrieb abgebaut. Das Restloch wurde nach der Stilllegung als Freilichtbühne hergerichtet. Unmittelbar darunter ist das Kalkberg-Höhlensystem ausgebildet. Ein Teil der zugänglichen Karsthohlräume ist als Besucherbereich für Jedermann erschlossen und vorgerichtet. Des Weiteren ist die Höhle als bedeutendes Fledermausquartier und Lebensraum des Höhlenkäfers unter Schutz gestellt. In der Vergangenheit wurden verschiedene Gutachten zur Standsicherheit der Höhle und deren Einfluss auf die Geländeoberfläche erarbeitet, deren Ausgangssituationen, Zielstellungen und Informationsgehalte recht unterschiedlich waren.

Es bestand deshalb insbesondere aus Sicherheitsaspekten die Forderung nach einem komplexen ingenieurgeologischen Standsicherheitsgutachten, das den vorliegenden Erkenntnisstand zusammenfasst und nach dem aktuellen Wissensstand eine fachspezifische, einheitliche Komplexbewertung vornimmt. Für die ingenieurgeologische Bewertung stellt hierbei eine hinreichend genaue Vermessung die Basis dar. Eine geologische Kartierung, strukturgeologische Aufnahmen, Erfassung der Auslaugungsstrukturen und geotechnischbergschadenkundliche Dokumentationen der zu untersuchenden Hohlräume bilden dann die Grundlage der Komplexbewertung bezüglich der Standsicherheit mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu notwendigen Sicherungsmaßnahmen auch unter Beachtung des Denkmalcharakters und des Naturschutzes. Im Vordergrund stehen die Sicherheit der Besucher und der dauerhafte Erhalt des Höhlensystems sowie die Eingrenzung eines vertretbaren Restrisikos von möglichen Verbruchereignissen auf die Geländeoberfläche im urbanen Bereich.

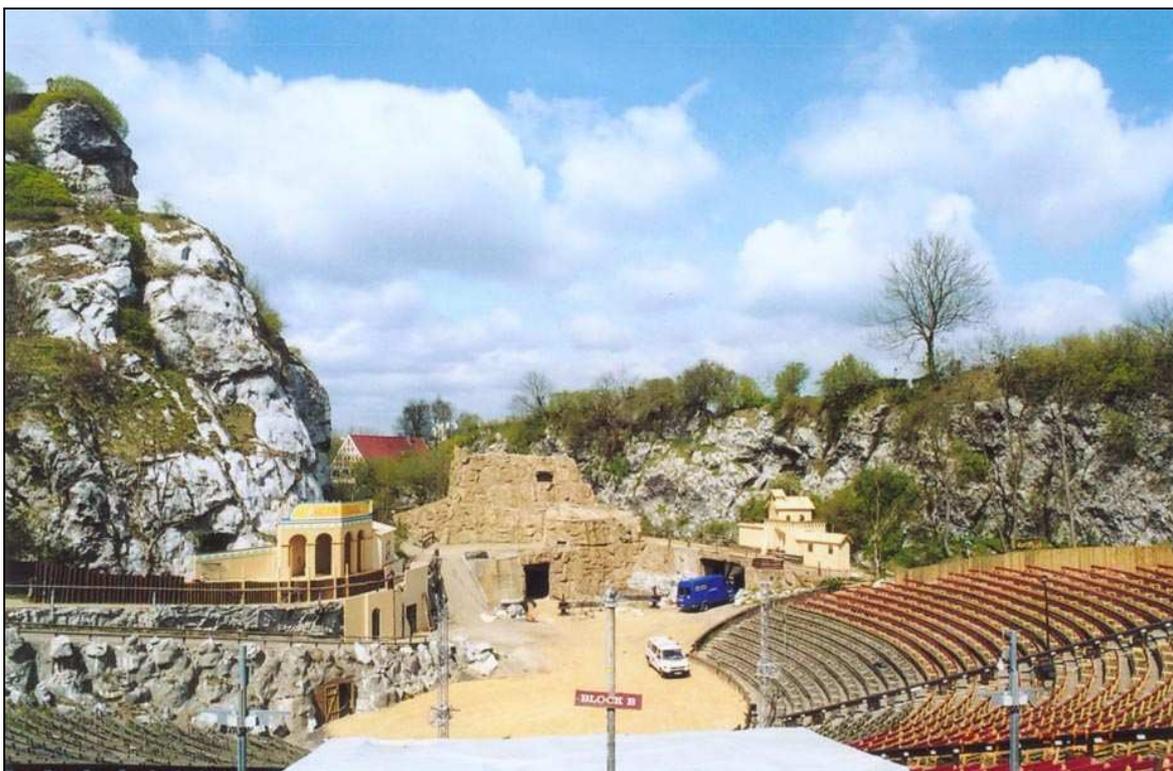


Fig. 1: Unter dem Randbereich des Freilichttheaters mit „Kalkberg“ erstreckt sich ringartig die „Kalkberghöhle“

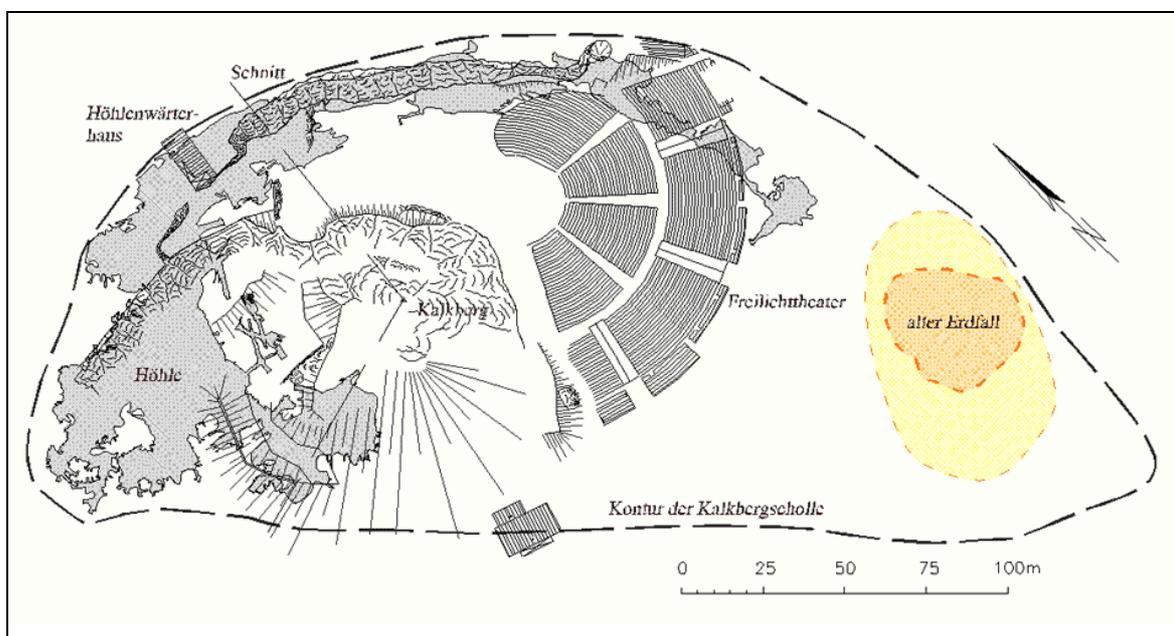


Fig. 2: Lageplan der „Kalkberghöhle“

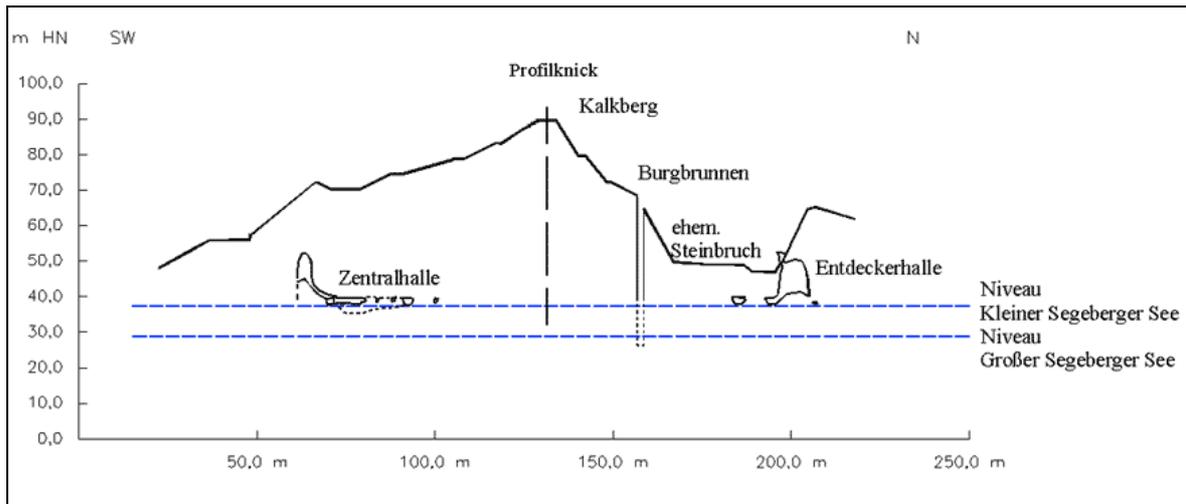


Fig. 3: Schnitt durch den „Kalkberg“ und die Höhle

2 Historische Aspekte zur Gelände- und Höhlennutzung

Im Mittelalter trug der „Kalkberg“ eine Burg, die durch den Steinbruchbetrieb um etwa 20 m abgetragen wurde. Als einziges Zeugnis dieser Zeit ist der angeschnittene Brunnen erhalten, dessen Sohlenhöhe 26,37 m HN beträgt. Der Steinbruch zur Gewinnung von hydraulisch abbindendem Bindemittel aus dem anstehenden Anhydrit und Gips reicht bis ins Mittelalter zurück. Der Betrieb wurde 1931 eingestellt. Die Höhle wurde 1912 durch spielende Kinder entdeckt und 1913 für Besucher erschlossen. Unter Naturschutz wurde der „Kalkberg“ mit seiner Höhle 1942 gesellt. Bereits 1934 wurde begonnen, das Restloch des Steinbruches zu einer Naturbühne vorzurichten, die 1937 eröffnet wurde.

3 Ingenieurgeologische und hydrogeologische Situation

Die regionalgeologische und salztektonische Situation im Raum Bad Segeberg wird vor allem von GRIPP (1964), ROSS (1990, 1993, 1999) und TEICHMÜLLER (1948) grundsätzlich behandelt. Neben großräumigen Schollenstrukturen treten vor allem rheinisch (N-S) streichende Salinarzüge von mehr als 100 km Länge und 6 bis 7 km Breite in Schleswig-Holstein auf. Für die detaillierte Struktur des Salzstockes von Sülfeld–Segeberg gibt es unterschiedliche Angaben. ROSS (1993) verweist auf wechselnde Richtungen im Streichen und auf eine Zerlegung in große Schollen durch herzyne Querstrukturen. Eine stratigraphische Feingliederung des Anhydrits in der „Kalkberghöhle“ fehlt. Nach ROSS (1999) ist das steilstehende Schichtpaket dem Hauptanhydrit des Oberen Zechsteins Zechstein III (Leine-Serie) zuzuordnen. Die Mächtigkeit beträgt nach TEICHMÜLLER (1948) etwa 75 m und im Hangenden folgen gut geschichtete karbonatreiche Gipse und bituminöse plattige Kalke (Rauhwacke), die den Übergang zur jüngeren Steinsalzserie bilden.

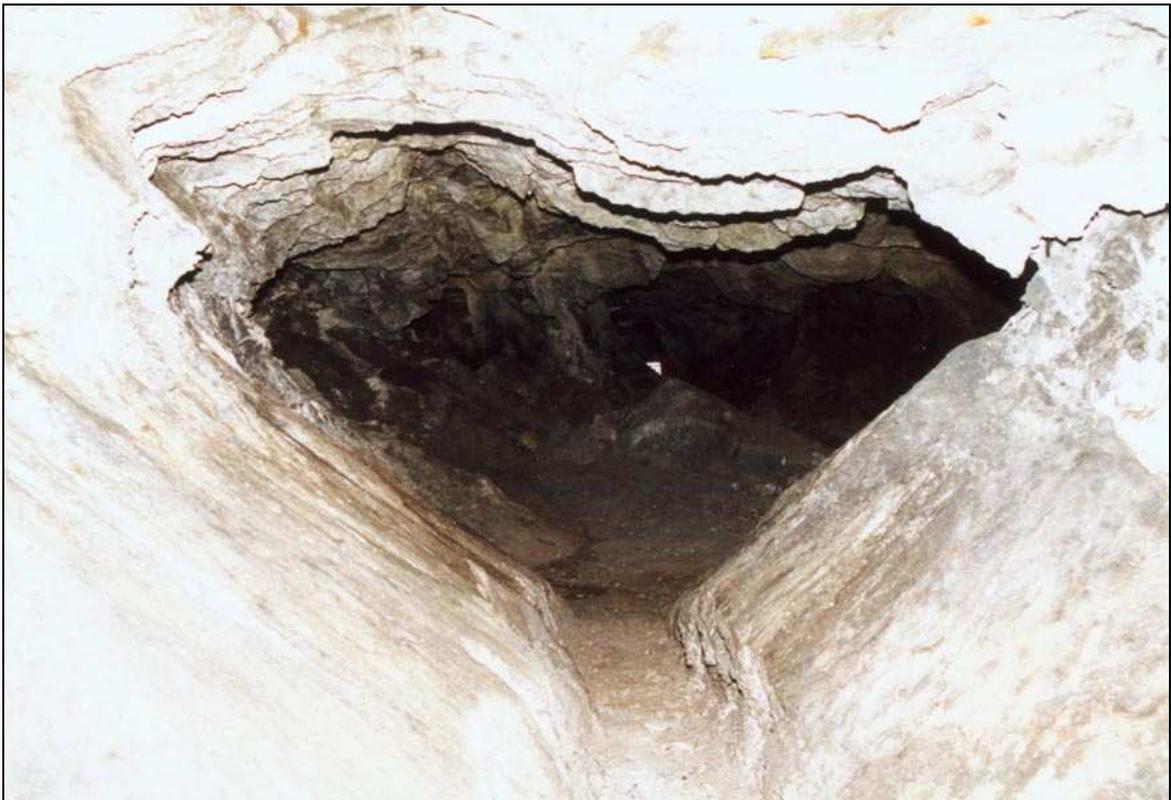


Fig. 4: Typische Karststruktur mit Laugfacetten



Fig. 5: Vereinigte Laugfacetten zweier paralleler Lauggänge

Die zyklische Salinarabfolge des Perms hat sich durch die seit dem Keuper einsetzende Diapirbildung bis zur Geländeoberfläche durchgedrückt. Insbesondere die Steinsalzlager im Top wurden dabei gleichzeitig großflächig abgelaugt und es bildete sich ein Salzspiegel bzw. Salzhang aus. Eiszeitliche Überformungen, zahlreiche Auslaugungsstrukturen der unterschiedlichsten Art und pleistozäne Bildungen prägen die heutige Segeberger Karstlandschaft. Grundsätzlich kann hier von einem bedeckten Karst gesprochen werden. Eine Ausnahme bildet der Segeberger „Kalkberg“, wo keine pleistozänen Ablagerungen die auslaugbaren Gesteine und die sich bereits eingestellten Karsthohlformen überdecken. Nach ROSS (1999) betragen die rezenten Hebungen des Salzstockes abzüglich der flächigen Salzablaugung im Bereich des „Kalkberges“ etwa 1,2 mm/Jahr, woraus sich ein Hebungsbetrag seit der letzten Vereisung von etwa 12 m ableiten lässt.

Aus ingenieurgeologischer Sicht muss eingeschätzt werden, dass vor allem der Salzkarst, aber auch der Sulfatkarst unter den gegebenen klimatischen Bedingungen weiterhin aktiv sein können. Die unmittelbaren nacheiszeitlichen Karstaktivitäten werden jedoch durch das derzeitige begrenzte Wasserdargebot nicht erreicht. Ebenfalls ist die Umwandlung von Anhydrit in Gips aktiv. Durch die Wasseraufnahme nimmt das Volumen um das 1,2 fache und die Längen um das 1,55 fache zu. Die MOHSSche Härte des Anhydrits von 2 bis 4 nimmt dabei auf 1,5 bis 2 des Gipses ab. Neben der Reduzierung der Gesteinshärte ist aber auch ein Auflösen des Gesteinsgefüges und damit ein Zerfallen in kleinere Gesteinsbruchstücke zu beobachten. Der Anhydrit besitzt im Allgemeinen eine große Standfestigkeit und eine hohe Zugfestigkeit. Der physikalischen Verwitterung bietet er wenige Angriffspunkte, wovon die steilen Felsklippen zeugen (HOYNINGEN-HUENE 1957).

Für den Sulfatkarst in der Laughöhle des „Kalkberges“ war und ist vor allem das obere Grundwasserstockwerk von maßgeblicher Bedeutung. Nach den vorliegenden Messungen ergeben sich folgende Höhen (HN) für den Wasserspiegel der Seen, der Höhle und aus einer Bohrung:

- Großer Segeberger See: 28,9 m
- Kleiner Segeberger See: 37,3 m
- „Sandschacht“ in der Höhle: min. 32,0 m, max. 33,2 m
- Bohrung im Stadion: 32,7 m

Zum Vergleich:

- Mittleres Höhlenniveau (Sohle) 37,5 m

Ein Bohrbrunnen zur Sohlegewinnung im Bereich des „Kalkberges“ weist einen Salzspiegel in einem Höhenniveau von -70,0 m HN auf (Tiefe: 130,0 m unter der Geländeoberfläche).

Aus den verschiedenen Höhenverhältnissen der Wasser- und Salzspiegel ergibt sich, dass das Grundwasserstockwerk des Sulfatkarstes im „Kalkberg“ ca. 4,3 bis 5,5 m unter dem mittleren Höhenniveau liegt. Im Kleinen Segeberger See steht der Wasserspiegel im Mittel 4,9 m höher als im Höhlenbereich. Im Großen Segeberger See liegt der Wasserspiegel dagegen 3,7 m tiefer als im Höhenniveau. Der Salzspiegel ist unter der Höhlensohle in etwa 107,5 m Tiefe zu erwarten.

Die Unterschiede zwischen den Wasserständen in den Seen und im Höhenniveau verweisen auf getrennte Wasserhorizonte, was vor allem die Eigenständigkeit der Karstwässer im Bereich der „Kalkberg“-Scholle unterstreicht.

4 Strukturgeologische Verhältnisse

Durch die Halokinese wurden die Deckschichten über dem Salz stark gehoben und an den Flanken des Salzstockes aufgerichtet. Die Auslaugungsprozesse schufen große Hohlräume im Top des Salzstockes und es kam durch die erheblichen Massendefizite zum großräumigen, calderaartigen Verbruch der Deckgebirgsschichten, die in Form von unterschiedlich großen Schollen auf dem Salzstock verstürzten und eine unregelmäßige Karstlandschaft formten.

Der „Kalkberg“ ist somit das Relikt einer großen schräggestellten Anhydritscholle und deren beanspruchte Randbereiche aus dem verbrochenen Gewölbe des Salzstockes. Das Schollenpaket ist in nordöstliche Richtung verkippt. Es befindet sich im zentralen Bereich des Salzstockes, flankiert von den Kleinen und Großen Segeberger Seen sowie von zahlreichen vermoorten abflusslosen Senken, die in ihrer Genese ebenfalls dem calderaartigen Verbruchsszenario der Topzone des abgelaugten Salzstockscheitels oder Erdfällen zuzuordnen sind. Die Schollenachse des „Kalkberges“ besitzt ein herzynes Streichen (NW-SE). An der Geländeoberfläche beträgt ihre Länge etwa 350 m (NW-SE) und ihre Breite 150 m (NE-SW). Die südwestliche Begrenzung ist relativ geradlinig auf ca. 350 m und lokal auch sehr steil abfallend. Der nordöstliche Rand ist ellipsenförmig gebogen und als fast gleichförmiger Hang ausgebildet.

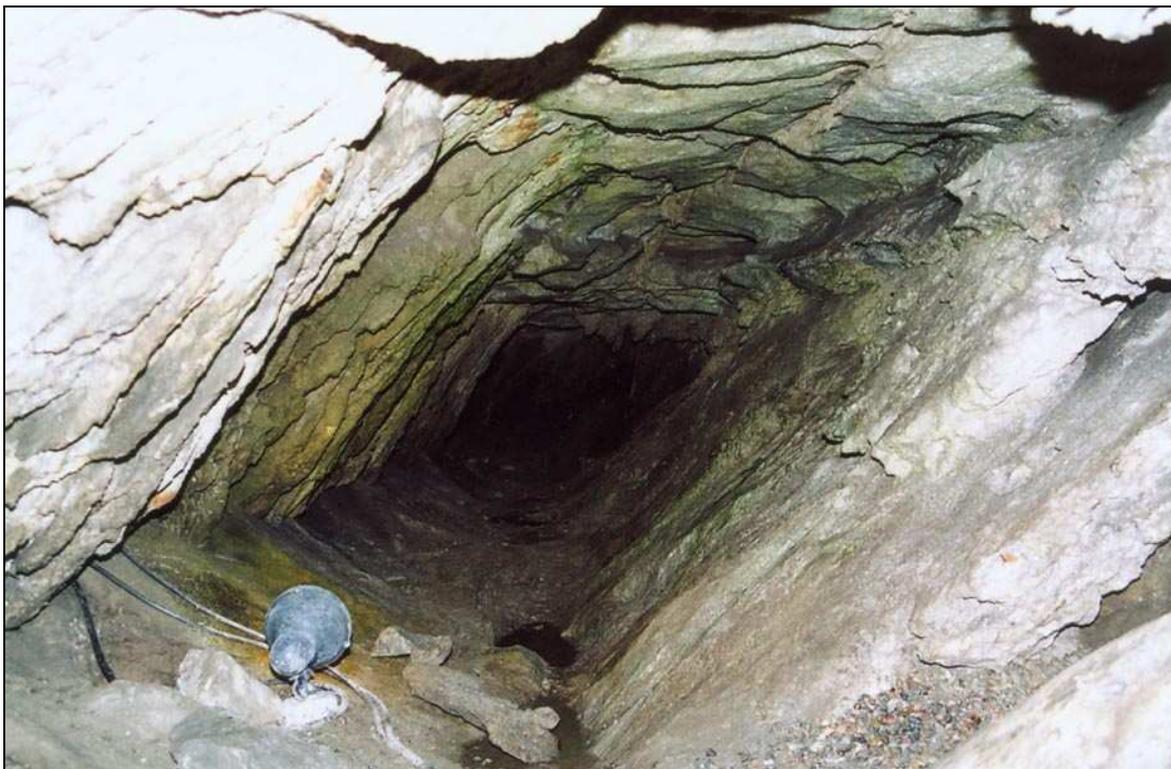


Fig. 6: Durch die steil stehende Schichtung überprägter Lauggang



Fig. 7: „Traktorspuren“ an der Firste des Laugganges

Das Bruchschollengebirge unterteilt sich im Höhlenbereich in zwei unterschiedliche strukturgeologische Zonen. Im nördlichen Abschnitt tritt deutlich die Schichtung hervor. Dabei ist ein Schwenken der Streichrichtung von NW-SE im östlichen Teil auf nahezu E-W im W-Bereich erkennbar. Die Schichten fallen mit 80 bis 100g nach Norden ein. Eine Störungszone mit Harnischen im Streichen der Schichten führt zu einer intensiven Auflockerung des Gebirgsverbandes, wodurch sich bereits mehrere Hochbrüche ausgebildet haben. Sehr markant ausgeprägt sind die rechtwinklig zum Schichteinfallen verlaufenden Klüfte. Sie weisen ein NE-SW-Streichen im östlichen Teil, bis N-S-Streichen im westlichen Teil und ein Einfallen von 65 bis 80g nach W auf. Dabei deutet sich ebenso eine radiale Verteilung bzw. Anordnung um den „Kalkberg“ an. Untergeordnet lassen sich flach nach E einfallende Klüfte (30g) mit einem N S Streichen beobachten.

Im westlichen Abschnitt stellen sich die strukturgeologischen Verhältnisse komplizierter dar. Teilschollenbewegungen am NW-Rand des „Kalkberges“ verändern teils grundlegend die strukturgeologische Situation, plastische Verformungen sind nicht auszuschließen. Die Klüfte zeigen eine breite Streuung. Die Schichtung streicht NW-SE, wobei das Einfallen steil (85 bis 90g) nach SW gerichtet ist. Eine N-S verlaufende Kluftschar fällt hier mit ca. 30g nach W ein.

Die Schichtung und die flach einfallenden Klüfte im nördlichen und westlichen Bereich weisen ein ähnliches Streichen auf, jedoch mit entgegengesetzter Einfallrichtung, was den bruchschollenartigen Gebirgsaufbau untersetzt.

Durch die atektonischen Schollenbildungen und die Auslaugungsvorgänge haben sich Trennflächen zu Spalten mit Breiten von 5 cm bis über 1 m ausgebildet, die teilweise mit Sand, Kies und Lehm ausgefüllt sind. Sie setzen sich über dem Höhlenniveau bis zur Festgesteinsoberfläche sowie unter die Höhlensohle fort. In den Randbereichen der Höhle fungieren diese Spalten oft als Begrenzung oder Auslöser von Verbruchprozessen.

5 Auslaugungsstrukturen

Die Sulfatkarsthöhle im „Kalkberg“ überrascht mit einer Vielzahl von Auslaugungsformen und vor allem auch durch die Formenreinheit der Laugstrukturen. Die Höhle hat sich unabhängig von dem steilen und teils gestörten Schichteinfallen des Anhydrits kranzförmig um die Kalkbergscholle etwa horizontal ausgebildet. Die mittlere Höhe der Hohlräume beträgt 2,23 m. Der kompakte Kernbereich des Berges unterlag nur geringfügig der Auslaugung, wodurch beim Steinbruchbetrieb, der sich auf diese Zone konzentrierte, auch keine größeren Hohlräume angetroffen wurden.



Fig. 8: Laugstrukturen an der Firste des Laugganges

Die Verkarstung ist primär an das vorhandene Trennflächeninventar gebunden. Nur auf diesen Unstetigkeitsflächen konnte Wasser zirkulieren und die Lösungsprozesse in einem eng begrenzten Höhenniveau bewirken. Eine überschlägige Betrachtung zum Alter der Höhle ergab unter Zugrundelegung eines gleich bleibenden Hebungsbeitrages des Salzstockes von ca. 1,2 mm im Jahr ein Entstehungszeitraum von vor 8.000 bis 6.000 Jahren. Diese Zeitepoche entspricht der ersten Phase des Klimaoptimums im Holozän. Die Bildungsprozesse der Laughöhle sind somit bereits über einen längeren Zeitraum abgeschlossen, so dass sich die Höhle heute in einem fossilen Stadium befindet. In der Laughöhle bewegt sich das niederschlagsbeeinflusste und Sickerwasser nur sehr begrenzt. Es ist vor allem in Form von Tropfwasser anzutreffen, das im gesamten Höhlenbereich auftritt. Für einen aktiven Sulfatkarst sind die anfallenden Wassermengen unbedeutend. Ausreichend sind sie jedoch für den Vergipsungsprozess. Ob derzeit ein aktiver Sulfatkarst unterhalb der Höhlensohle im Grundwasserniveau stattfindet, ist unbekannt.

Besonders klar sind die verschiedenen Formen einer Laughöhle an zahlreichen Stellen ausgebildet. Die Laugfacetten neigen sich im Anhydrit mit 40g und bilden einen markanten bzw. bei größeren Breiten einen trapezförmigen Querschnitt. Durch das steilstehende Schichtpaket sind an den Laugdecken sogenannte „Traktorspuren“ vorhanden, die an vertikale Klüfte gebunden sind. Ihre Längserstreckung ist bis zu 25 m

verfolgt. Die typische Form entsteht durch die unterschiedlich tief ausgelaugten Schichtglieder beiderseits der Kluft an der Laugdecke. Die „Spuren“ schwanken in der Breite zwischen 0,3 und 1,0 m und der schichtbedingte Abstand variiert von 0,15 bis 0,5 m. Ebenfalls durch die steile Schichtstellung mit der unterschiedlichen Löslichkeit der einzelnen Schichten sind zapfenähnliche oder gardinenartige Laugrückstände in der Höhlenfirne zu beobachten. Die Verkarstungsprozesse sind in den äußeren Randbereichen der Höhle besonders intensiv ausgebildet, was sich auch in der Vergipsung sowie in zahlreichen Hoch- und Verbrüchen zeigt, die zu Erdfällen führen können. Grundsätzlich lassen sich hierbei Spaltenerdfälle und Erdfälle über größeren Hohlräumen unterscheiden. Im Höhlenbereich sind die verschiedenen Entwicklungsphasen der Verbruchszenarien im Rahmen der ingenieurgeologischen Dokumentation direkt erfassbar. Historische Aufzeichnungen zum Erdfallgeschehen fehlen oder sind sehr unvollständig. In den letzten 20 Jahren ist ein Erdfall mit einem Durchmesser von ca. 6 m und einer Tiefe von 8 m gebrochen. Zwei kleinere Spaltenerdfälle erreichten Durchmesser von 2 m und Tiefen von 4 m bzw. 1,8 m.



Fig. 9: Das kompakte Gestein löst sich durch die Vergipsung auf

6 Standsicherheitsbetrachtungen und Schlussfolgerungen

Die ingenieurgeologische Detailanalyse konzentrierte sich auf den unmittelbaren Besucherbereich der Höhle und dessen Randzonen. Durch die stark frequentierte Nutzung der Geländeoberfläche und ihre Bebauung über der Höhle wurde auch dieser Bereich einer Gefährdungsanalyse unterzogen. Anhand der Kartierungsergebnisse wurden für die unter- und übertägigen Bewertungsbereiche Gefährdungsstufen vergeben und Gefährdungszonen ausgegrenzt. In den Zonen I und II ist baldiger Handlungsbedarf erforderlich. Kurzfristige periodische Kontrollen sind der Zone III zuzuordnen. In der Zone IV ist die Dauerstandssicherheit des Hohlraumes gegeben und periodische Kontrollen werden in größeren Intervallen empfohlen (MEIER 1991).

Für die Gefährdungsbewertung der Hohlräume wurde grundsätzlich davon ausgegangen, dass vor allem Bewegungen in den Höhlenteilen zu erwarten sind, wo derzeit bereits labile oder geschwächte Zonen vorliegen. Diese Zonen wurden durch die ingenieurgeologische Dokumentation erfasst und wenn erforderlich einer Sicherung oder Sanierung zugeordnet. Der Verlauf des untertägigen Besucherweges wurde grundsätzlich so gewählt, dass kritische Gebirgsbereiche gemieden werden. Die Vergipsung des Anhydrits wirkt festigkeitsmindernd als ein aktiver, steter Prozess auf die Standsicherheit der Hohlräume. Hier können nur periodische Kontrollen das Sicherheitsrisiko auf ein Mindestmaß reduzieren. Eine unmittelbare Bebauung der beeinflussten Geländeoberfläche sollte vermieden werden.

Die aufgeführten Einflussgrößen einschließlich der Komponente „Besucherobjekt“ und die urbane Oberflächennutzung wirken als „Verschleißfaktoren“ auf das Höhlensystem. Grundsätzlich lassen sich die meisten Wirkungsfaktoren zum „ewigen“ Erhalt der Höhle nicht abstellen. Sondern nur durch „Kontrolle und Wartung“ sowie partielle Sanierung bleibt das Objekt langfristig erhalten, was letztlich eine weitere Nutzung als Besucherhöhle ermöglicht, jedoch auch notwendig macht. Diese Verfahrensweise liegt im Interesse der sicheren Geländenutzung, aber sie dient auch dem Erhalt des Naturdenkmals und bedeutenden Fledermausquartiers von Schleswig-Holstein.

Literatur

- GRIPP, K.(1964): Erdgeschichte von Schleswig-Holstein. - Karl Wachholtz Verlag
Neumünster
- HOYNINGEN-HUENE, V. E. (1957): Ingenieurgeologische Bedeutung von Auslaugungs-
schäden. - Z. f. angew. Geol. 10, S. 474-476
- MEIER, G. (1991): Grundsätze von Bergsicherungsarbeiten im Gangbergbau. - Wiss.-
Techn. Info.-Dienst 32, Reihe A, H. 1, Gesellsch. f. Umwelt- u. Wirtschaftsgeologie
Berlin i. G.
- ROSS, P.-H. (1990): Die Tektonik der Segeberger Höhle. - Mitt. Verb. Dt. Höhlen und
Karstforsch. 36, 2 S. 29-32
- ROSS, P.-H. (1993): Die Segeberger Karstlandschaft. - Geologisches Landesamt
Schleswig-Holstein Kiel 2, S. 29-32
- ROSS, P.-H. (1999): Naturwissenschaftliche Bedeutung des Kalkberges von Bad Sege-
berg, Besucherverkehr und damit verbundene Sicherheitsfragen. - Heimatkundliches
Jahrbuch für den Kreis Segeberg 45, 1, S. 121-130
- TEICHMÜLLER, R. (1948): Das Oberflächenbild des Salzdomes von Segeberg in
Holstein. - Zeitschr. D. Deutsch. Geol. Gesellsch. 98, S. 7-29