# Die Saison 2011/2012 in der Höhlen AG Tübingen

**Matthias Martin und Katharina Gerling** **Seite 29 bis 42, 16 Abbildungen**

Die zurückliegende Saison war in der Höhlen-AG Tübingen wieder sehr ereignisreich. Es wurden viele Touren und Jugend-forscht-Arbeiten durchgeführt. Von einer Ausfahrt nach Frankreich und zwei erfolgreichen Schüler-Forschungsarbeiten soll im folgenden Artikel berichtet werden:

- $CO_2$-Messungen in der Falkensteiner Höhle
- Mikrobiologische Untersuchungen in der Falkensteiner Höhle
- Fototour im Departement Doubs

Die beiden Jugend-forscht-Arbeiten, die den Kapiteln eins und zwei zu Grunde liegen, können auf der Homepage der Höhlen-AG als pdf-Dateien abgerufen werden. Bei den $CO_2$-Messungen (Jufo-Arbeit: „Die Atmung der Falkensteiner Höhle“) waren neben Matthias Martin auch Hermann Wiedemann und Christoph Bulian aktiv. Bei den mikrobiologischen Untersuchungen (Jufo-Arbeit: „Die Höhle lebt!“) arbeitete Katharina Gerling zusammen mit Katharina Wolf.

**1. $CO_2$-Messungen in der Falkensteiner Höhle**

Matthias Martin, Christoph Bulian und Hermann Wiedemann bauten in den vergangenen Jahren mehrere Datenlogger für den Einsatz in Höhlen. Einer dieser Datenlogger ist seit November 2010 in der Falkensteiner Höhle im Bereich Regentörle stationiert und misst seitdem den $CO_2$-Gehalt der Höhlenatmosphäre. Durch die Auswertung der Loggerdaten konnten einige bekannte Effekte der Bewetterung sowie neue Aspekte im Zusammenhang mit dem Verschluss des Siphons gefunden werden.

### Ergebnisse

Die Messergebnisse liegen bisher für drei Jahreszeiten vor. Die Zusammenhänge lassen sich folgendermaßen graphisch darstellen:

### Warme Jahreszeit

- Die Kohlendioxid-Werte sind über längere Phasen hinweg mit ca.1,8 % konstant hoch. Teilweise gibt es Dips. Besonders auffällig sind die $CO_2$-Werte um die Tage 28.07., 09.08., 28.08., 07.09., 15.09. und

Abb. 1: $CO_2$-Gehalt der Höhlenatmosphäre, Niederschläge und Temperaturen aus Metzingen vom 25.07.11 bis zum 18.09.11

Abb. 2: $CO_2$-Gehalt der Höhlenatmosphäre, Niederschläge und Temperaturen aus Metzingen vom 19.09.11 bis 15.10.11

19.09.2011. Die Höhlentemperatur schwankt mit einer geringen Abweichung von maximal 0,36°C um einen Mittelwert von 9,2°C.

- In den Sommermonaten traten einige mehrtägige Regenperioden auf.
- Die Temperaturen der Wetterstation Metzingen liegen, mit wenigen Ausnahmen mit sehr kurzer Dauer, immer über der Höhlentemperatur. Es können mehrere Wärme- und Kältezeiträume erkannt werden. Beispiele:
  Kälteperiode 07.08.–11.08.: $T_{max}$ unter 20°C, $T_{min}$. in der Nähe von $T_{Höhle}$.
  Wärmeperiode: 11.08.–27.08.: $T_{max}$ über 20°C, $T_{min}$. deutlich über $T_{Höhle}$.

**Übergangsjahreszeit**

- In der Übergangszeit verändert sich der $CO_2$-Wert auffällig. Im September erkennt man noch den für die Sommermessung typischen hohen $CO_2$-Grundwert. Am 07.10. sinkt dieser auf ca. 0,2 % ab, steigt am 09.10. wieder an, um am 13.10. wieder auf 0,2 % zu sinken.
- Die Höhlentemperatur bleibt konstant bei etwa 9,2°C.
- Die Außentemperatur sinkt in der Nacht vom 06.10. zum 07.10 auf unter 9°C ab und schwankt mit sehr geringer Amplitude bis zum 10.10. um diesen Wert. Vom 10.10. bis 14.10. bleiben die Temperaturen wieder dauerhaft über der Höhlentemperatur von 9°C.
- September und Oktober sind sehr trockene Monate. Es gibt lediglich eine kurze Regenperiode vom 06.10. bis zum 13.10., nennenswerte Niederschläge fallen jedoch nur am 06.10. und 09.10.
- Ab dem 14.10. schwanken die $CO_2$-Werte periodisch. Die Periode beträgt in etwa einen Tag, die Amplitude schwankt zwischen 0,5 und 1 %. Vom 19.10.

Abb. 3: $CO_2$-Gehalt der Höhlenatmosphäre, Niederschläge und Temperaturen aus Metzingen vom 15.10.11 bis 05.11.11

Abb. 4: $CO_2$-Gehalt der Höhlenatmosphäre, Niederschläge und Temperaturen aus Metzingen vom 26.11.11 bis 18.12.11.

bis 24.10. sind diese periodischen Schwankungen nicht oder nur sehr schwach erkennbar, ab dem 24.10. bis in den November hinein treten sie wieder deutlich auf.

- Die Höhleninnentemperatur bleibt konstant bei ca. 9°C.
- Die Außentemperaturen schwanken mit täglicher Periode. Die Höchsttemperaturen liegen über der Höhlentemperatur von 9°C, die Tiefsttemperaturen darunter. Im Zeitraum vom 19.10. bis 24.10. bleiben die Temperaturen in Metzingen immer unter 9°C.

**Kalte Jahreszeit**

- In der kalten Jahreszeit liegen die $CO_2$-Werte von Ende November bis Mitte Dezember konstant tief bei rund 0,2 %. Danach steigen die Werte um etwa 1 % mit gelegentlichen Ausschlägen fast auf Sommer Niveau (1,5 %).
- Die Lufttemperatur in der Höhle bleibt weiterhin konstant.
- Im Diagramm sind die Tage, an denen der Siphon in Augenschein genommen wurde, mit grüner Markierung für „Siphon auf“ und roter Markierung für „Siphon zu“ eingetragen.

**Diskussion**

Warme Jahreszeit

In Abbildung 5 ist die Bewetterung in der Falkensteiner Höhle für die Verhältnisse in der warmen Jahreszeit dargestellt.

In der Höhle herrscht das ganze Jahr über eine Temperatur von etwa 9°C. In den Sommermonaten gibt es Phasen, in denen die Außentemperatur nie unter die Höhlentemperatur sinkt. In diesen

Abb. 5: Thermische Bewetterung der Falkensteiner Höhle in den warmen Monaten (Grafik in Anlehnung an PECHHOLD, 1991)

strömt permanent kalte Höhlenluft aus dem Eingangsportal. In der Höhle entsteht ein Unterdruck, der dafür sorgt, dass durch Kluftspalten im Gestein Luft durch die $CO_2$-reiche Humusschicht in die Höhle gezogen wird (PECHHOLD, 1991, S.72 ff.). Die Aktivität der Mikroorganismen und damit die $CO_2$-Produktion ist in den warmen Monaten besonders hoch (PECHHOLD, 2000). So kann auch die hohe $CO_2$-Konzentration in der Falkensteiner Höhle in den warmen Monaten erklärt werden.

- Für die kurzfristigen Abweichungen von diesen hohen Werten (Dips in Abb. 3) wurden folgende Ursachen diskutiert:
  Bei heftigen Niederschlägen füllen sich die Kluftspalten. Dadurch kann die $CO_2$-reiche Bodenluft nicht mehr in die Höhle eingeblasen werden.
- Kälteeinbruch: Bei niedrigen Außentemperaturen sinkt der $CO_2$-Gehalt (siehe Abschnitt Kalte Jahreszeit).

Weitere Möglichkeiten, wie eine übergelagerte barometrische Bewetterung oder heftige Westwinde, die auf das Höhlenportal drücken, wurden als unwahrscheinlich angesehen und nicht weiter verfolgt.

Die $CO_2$-Peaks in den Zeiträumen vom 07.08. bis 11.08., vom 27.08. bis 29.08., vom 15.08. bis 16.08. sowie am 18.08. deuten auf einen Zusammenhang zwischen Temperatur und $CO_2$-Gehalt hin. Zu Beginn dieser Abschnitte fallen die Außentemperatur und der $CO_2$-Gehalt gleichzeitig rasch ab. Eine zentrale Rolle dürfte das Verhältnis Höhlentemperatur zu Außentemperatur spielen. Fällt die Außentemperatur ab, stellt sich die beschriebene Bewetterung ein oder kehrt sich um. In Abbildung 1 fallen die Temperaturen nachts nicht unter die Höhlentemperatur, senken sich jedoch teilweise bis auf 9°C ab. Da die Werte in der Wetterstation Metzingen auf 350 m ü. NN gemessen wurden und die Höhle rund 300 m höher liegt, ist es sehr wahrscheinlich, dass am Höhleneingang und auf der Albhochfläche die Temperaturen etwas geringer waren und damit teilweise unter 9°C lagen.

Ein eindeutiger Einfluss des Regens kann aus dem Diagramm nicht abgelesen werden. Die heftigen Regengüsse am 14., 15. und 18.08. hatten keine Auswirkungen auf die $CO_2$-Konzentration in der Höhle. Die Niederschläge im Einzugsgebiet könnten jedoch in diesem Zeitraum stark vom Regen in Metzingen abgewichen sein. Aktuelle Vergleiche haben gezeigt, dass die Niederschlagswerte von Metzingen stark von denen in Bad Urach abweichen können.

Bemerkenswert ist der $CO_2$-Peak am 27./28.07. Die Tiefsttemperaturen von etwa 15°C deuten darauf hin, dass auch an der Falkensteiner Höhle die Temperatur über 9°C lag. Am 27.07. gab es jedoch mit 13 mm heftige Regenfälle, die möglicherweise zu einem kurzzeitigen Siphonverschluss führten. Dies könnte ebenfalls nach dem starken Regen am 04.09. der Fall gewesen sein. Leider liegen für diese Tage keine Kenntnisse über den Wasserstand in der Höhle vor. Zum aktuellen Zeitpunkt lassen sich keine Aussagen über das Verhalten der $CO_2$-Konzentrationenn bei verschlossenem Siphon im Sommer treffen.

**Kalte Jahreszeit**

Die Ursache für die niedrige $CO_2$ -Konzentration in der kalten Jahreszeit lässt sich wie folgt erklären:

Im Winter ist die Umgebungsluft kälter als die Höhlenluft. Dadurch strömt Luft in die Höhle. Die $CO_2$-reiche Höhlenatmosphäre wird von der eindringenden Frischluft, die nur 0,04 % $CO_2$ enthält, in die hinteren Höhlenteile und durch die Kluftspalten nach oben gedrückt. Dabei wird sie aufgewärmt und entweicht über den Boden der Oberfläche. Sie reichert sich ebenfalls mit $CO_2$ an, allerdings weniger

Abb. 6: Thermische Bewetterung der Falkensteiner Höhle in den kalten Monaten (Grafik in Anlehnung an PECHHOLD, 1991)

Abb. 7: $CO_2$-Gehalt der Höhlenatmosphäre, Niederschläge und Temperaturen aus Metzingen im Winter 2010/2011

als in der warmen Jahreszeit auf dem Weg durch den Boden in die Tiefe.

Das $CO_2$ kann in der kalten Jahreszeit nicht direkt über die Luft in die Höhle gelangen, es wird dann ausschließlich über das Wasser in die Höhle transportiert. Über dem Wasser stellt sich ein Konzentrationsausgleich des $CO_2$ mit der Luft ein, das durch folgendes chemisches Gleichgewicht beschrieben werden kann:

$$CO_{2(aq)} \rightleftharpoons CO_{2(g)}$$

Bei starken Niederschlägen steigt der Pegel des Höhlenbachs, bis der Siphon verschlossen wird. Die heftigen Regenfälle vom 09.12. dürften dafür gesorgt haben, dass der Siphon verschlossen wurde. Bei der Wartung des Datenloggers am 10.12. wurde diese Vermutung bestätigt: In der Höhle war Hochwasser. Durch den verschlossenen Siphon konnte in der Höhle wesentlich weniger Luft zirkulieren, es kam weniger Frischluft in die Höhle und das aus dem Wasser ausgasende $CO_2$ staute sich vor dem verschlossenen ersten Siphon auf. Dieser Effekt wurde von uns bereits im Vorjahr postuliert und kann ebenfalls mit den Werten aus dem Winter 2010/2011 (Abb. 7) belegt werden:

In der Grafik werden Zeiten mit verschlossenem Siphon (rot) und Zeiten mit geöffnetem Siphon (grün) farblich hervorgehoben. Tage, an denen der Siphon gesichert offen bzw. verschlossen war, sind in der Grafik mit „auf“ und „zu“ gekennzeichnet.

**Übergangsjahreszeit**

Die in der Übergangsjahreszeit auftretenden täglichen $CO_2$-Peaks lassen sich mit denselben Effekten aus den warmen und kalten Monaten belegen. Allerdings wechseln sich die Verhältnisse hier in einem konstanten Rhythmus ab: Tagsüber steigt die Außentemperatur über die Höhlentemperatur und es herrschen die Bewetterungsverhältnisse des Som-

Abb. 8: Zusammenhang zwischen Außentemperatur und $CO_2$-Konzentration in der Höhle

mers. Nachts fällt die Temperatur der Umgebung unter den Messwert in der Höhle und es stellt sich die umgekehrte, für die kalte Jahreszeit typische Windrichtung, vom Höhlenportal in die hinteren Höhlenbereiche ein. Dadurch steigen die $CO_2$-Werte tagsüber durch das über die Kluftspalten eingetragene $CO_2$ stark an. Nachts wird das Kohlendioxid wieder in die hinteren Höhlenteile und teilweise über die Klüfte aus der Höhle hinaus transportiert.

Um den Zusammenhang zwischen Außentemperatur und $CO_2$-Gehalt in der Höhle zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 8 ein Ausschnitt aus der Kurve mit den Werten von der Übergangsjahreszeit 2011 stark vergrößert.

Die periodischen Verläufe der Außentemperatur und der $CO_2$-Konzentration unterliegen einer Phasenverschiebung von etwa sieben Stunden. Offenbar benötigt der Höhlenwind die Zeit, um von der Eintrittsstelle durch die Klüfte und die Höhle bis zur Messstation am Regentörle zu gelangen. Wenn man die Windgeschwindigkeit mit 0,1 m/s ansetzt und von einer zurückgelegten Strecke von 2 km ausgeht, ergibt sich näherungsweise ein Zeitraum von sechs Stunden.

Der Effekt des täglichen Ein- und Ausatmens der Falkensteiner Höhle, das heißt des täglichen Fallens (= Einatmen) und Ansteigens (= Ausatmen) der $CO_2$-Werte, wird durch die Darstellung der Messdaten in Abbildung 3 sehr gut belegt. Trotzdem treten an einigen Stellen geringe Diskrepanzen zwischen den Messwerten und dieser Theorie auf. Diese sind jedoch leicht mit der unterschiedlichen Lage von Wetterstation und Höhle zu erklären.

Die Regenfälle im Herbst dürften den Wasserstand in der Höhle kaum beeinflusst haben. Wasserstandsmessungen haben gezeigt (MAUCH, 2008) dass Niederschläge unter 10 mm in der Höhle eher nicht bemerkt werden. Geringe Niederschläge haben noch weniger Auswirkung, wenn vor dem Regenguss eine lange Trockenperiode herrschte und der Boden viel Feuchtigkeit speichern kann. Diese Situation war in der kalten Jahreszeit, im Herbst 2011, auf jeden Fall gegeben.

**Zusammenfassung**

Generell können folgende Aussagen getroffen werden:

- Liegen die Tageshöchst- und tiefstwerte der Außentemperatur unter der Höhlentemperatur, so stellt sich bei offenem Siphon am Regentörle ein $CO_2$-Gehalt von rund 0,2 % ein.
- Liegen die Tageshöchst- und tiefstwerte über der Höhlentemperatur, so stellt sich am Regentörle ein $CO_2$-Gehalt von etwa 1,8 % ein.
- Liegen die Tageshöchsttemperaturen über und die Tiefsttemperaturen unter der Höhlentemperatur, so kann eine periodische Zu- und Abnahme des $CO_2$-Gehaltes beobachtet werden. Die Periode entspricht in etwa einem Tag (in Abhängigkeit des Zeitpunktes von Höchst- und Tiefsttemperatur), die Amplitude ist abhängig von der Dauer der Über- beziehungsweise Unterschreitung der Höhlentemperatur.
- In der kalten Jahreszeit steigt der $CO_2$-Gehalt bei geschlossenem Siphon von 0,2 % auf Werte zwischen 1% und 2 %.

**Ausblick**

- Die $CO_2$- und die Temperatur-Daten am Regentörle werden weiterhin erfasst und abgespeichert. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, Zusammenhänge in der warmen Jahreszeit bei offenem und geschlossenem Siphon zu dokumentieren und eine endgültige Erklärung für die im Sommer auftretenden $CO_2$-Peaks nach unten zu finden.
- Ein zweiter $CO_2$-Logger soll an ganz verschiedenen Stellen der Höhle, wie zum Beispiel am Eingang, in der Reutlinger Halle oder am zweiten Siphon, die $CO_2$-Konzentrationen messen. Diese Daten können dann mit den Daten des ersten Loggers verglichen werden und weitere Rückschlüsse auf die Bewetterung der Höhle ermöglichen.
- Inzwischen protokolliert ein weiterer Datenlogger die Außentemperaturen in der Nähe des Höhlenportals. Eine Wetterstation beim Flugplatz in Grabenstetten wird momentan installiert. Mit Hilfe der Daten dieser neuen Messstelle könnten sich weitere Auswertungsmöglichkeiten ergeben.
- Inzwischen wurde mit einem tragbaren Datenlogger ein $CO_2$-Profil vom Eingang bis zum zweiten Siphon erstellt. Dabei konnten interessante Zusammenhänge gefunden werden. Der $CO_2$-Gehalt in der Versturzstrecke war am Tag der Messung mit Werten von 0,7 bis 0,8 % in etwa nur halb so hoch wie in den wasserführenden Abschnitten. Im Bereich der Lehmwände gab es jedoch drei Stellen, an denen deutlich höhere $CO_2$-Werte gemessen wurden. Dieses erste erstellte $CO_2$-Profil soll mit weiteren Messungen bestätigt oder widerlegt und mögliche Ursachen für die Ergebnisse gefunden werden.

## 2. Mikrobiologische Untersuchungen in der Falkensteiner Höhle

Seit vielen Jahren wird in der Höhlen AG die Frage aufgeworfen, ob man das Wasser in der Falkensteiner Höhle, aber auch in anderen Höhlen, trinken kann. Aus diesem Grund hat Katharina Gerling bereits 2010 begonnen, Wasserproben in der Falkensteiner Höhle mikrobiologisch zu untersuchen. Im vergangenen Jahr stand ihr Katharina Wolf zur Seite und gemeinsam fanden sie einige interessante Zusammenhänge.

### Einleitung

Unkritische Höhlenbesucher trinken dieses Wasser auf ihren Höhlentouren. Beim Hinweis auf mögliche Verunreinigungen wird manchmal erwidert, dass das Wasser unbedenklich sei, da es durch das Erdreich gefiltert würde. Da sich auf der Albhochfläche über der Höhle jedoch Wald und Felder befinden, erscheint ein sorgloses Trinken des Höhlenwassers als risikoreich. Es ist davon auszugehen, dass das Wasser auf seinem Weg durch die Humusschichten im Wald Bakterien und andere Mikroorganismen aufnimmt und diese so in die Höhle eingetragen werden. Des Weiteren muss wegen der zahlreichen Felder über der Höhle damit gerechnet werden, dass dort zeitweise organischer Dünger ausgebracht und das Karstwasser dadurch belastet wird.

Um dieser Sache auf den Grund zu gehen, wurde untersucht, ob das Wasser in der Falkensteiner Höhle mikrobiell belastet ist und lebensmittelrechtlichen Aspekten entspricht. Dazu wurden an mehreren Stellen Wasserproben genommen und auf die Gesamtkeimzahl hin untersucht. Von den Agarplatten dieser Bestimmungen wurden einzelne Kolonien isoliert und durch zahlreiche Tests identifiziert. So konnten Rückschlüsse auf die Trinkbarkeit sowie die Herkunft einiger Mikroorganismen gezogen werden.

### Probenentnahme

Die Proben wurden mit sterilen Gefäßen an den folgenden Entnahmestellen genommen:

- Regentörle (Deckenquelle)
- Höhlenbach am ersten Siphon
- Deckenquelle direkt nach dem ersten Siphon
- Hangquelle, außerhalb der Höhle, etwa 150 m vom Eingang entfernt

Um zu verhindern, dass sich die Keimzahlen ändern, wurden die Proben kühl gelagert und schnell untersucht.

### Methodik der quantitativen Analytik

Um die Keimzahl der Wasserproben zu bestimmen, wurden diese auf selbstgegossene Agarplatten in mehreren Verdünnungen ausgebracht. Die Nährböden wurden bei 30°C im Brutschrank gelagert und nach drei Tagen ausgezählt. Um die Bedingungen in der Höhle widerzuspiegeln, wurde ebenfalls das Wachstum bei 8°C untersucht. Diese Platten wurden nach drei und nach sieben Tagen ausgewertet.

### Methodik der qualitativen Analytik

Um die für die Identifizierung nötigen Reinkulturen zu erhalten, wurden abgegrenzte Kulturen mit ausgeglühten Drahtösen von den Nährböden gelöst und auf frischen Platten ausgestrichen. Diese wurden dann ebenfalls für drei bis sieben Tage bebrütet.

Die Kolonien wurden zuerst auf ihre morphologischen Merkmale hin untersucht:

- Form, Farbe und Konsistenz wurden beschrieben
- in SIM-Agar wurde auf Beweglichkeit getestet
- Gram-Differenzierung wurde mit Hilfe des KOH-Tests durchgeführt

Anschließend wurden die physiologischen Merkmale (physikalische und biochemische Funktionen) untersucht:

- Katalase-Test
- Zytochromoxidase-Test
- Test auf Schwefelwasserstoffbildung
- Test mit Kovacs-Reagenz

Die genaue Methodik dieser Tests kann in der Jugend-forscht-Arbeit von Katharina Gerling und Katharina Wolf nachgelesen werden.

### Identifizierung durch Sequenzierung des 16S-rRNA-Gens

Zur Identifizierung einiger Stämme wurde die DNA der Bakterien lysiert, extrahiert, sequenziert und bestimmt. Die genaue Vorgehensweise und die Theorie der DNA-Analytik würden den Rahmen dieses Artikels sprengen und können ebenfalls in der bereits erwähnten Jugend-forscht-Arbeit nachgelesen werden.

### Ergebnisse

### Keimzahlbestimmung

Die auf den bewachsenen Platten gefundenen Kolonien wurden ausgezählt. Anschließend wurden die Kolonien bildenden Einheiten pro Milliliter (KbE/mL) errechnet.

Tab. 1: Gesamtkeimzahl bei 30°C Brutschranktemperatur

| | Regentörle Deckenquelle | 1. Siphon Höhlenbach | 1. Siphon Deckenquelle | Hangquelle |
|---|---|---|---|---|
| Gesamtkeimzahl nach 3 Tagen | 90 KbE/mL | 20.150 KbE/mL | 129 KbE/mL | 2.150 KbE/mL |

**Auswertung der bei 30°C bebrüteten Platten**

Die Mittelwerte der bestimmten Gesamtkeimzahlen aller auswertbaren Proben bei 30°C Brutschranktemperatur sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

**Auswertung bei 8°C gelagerten Platten**

In der Tabelle 2 werden die Mittelwerte der bestimmten Gesamtkeimzahlen bei 8°C Kühlschranktemperatur aufgeführt. Die Temperatur von 8°C wurde gewählt, um ähnliche Bedingungen wie in der Höhle zu schaffen.

Bereits im Jahr 2010 wurden deshalb an zwei verschiedenen Tagen an 13 verschiedenen Stellen zwischen Eingang und zweitem Siphon Proben genommen. Sie wurden mit einem Test auf coliforme Bakterien untersucht. Diese dürfen laut Trinkwasserverordnung in 100 mL nicht nachweisbar sein. Bis auf einen der 26 durchgeführten Tests waren jedoch alle positiv. Das Vorkommen von coliformen Bakterien deutet auf fäkale Verunreinigungen des Wassers hin.

**Beobachtete Unterschiede in der Morphologie**

Tab. 2: Gesamtkeimzahl 8°C Kühlschranktemperatur

| | Regentörle Deckenquelle | 1. Siphon Höhlenbach | 1. Siphon Deckenquelle | Hangquelle |
|---|---|---|---|---|
| Gesamtkeimzahl nach 3 Tagen | 0 KbE/mL | 5.800KbE/mL | 10 KbE/mL | 317 KbE/mL |
| Gesamtkeimzahl nach 7 Tagen | 0 KbE/mL | 14.800KbE/mL | 61 KbE/mL | 1.250 KbE/mL |

**Diskussion**

Wie erwartet waren die Keimzahlen bei einer Brutschranktemperatur von 8°C deutlich geringer als bei 30°C. Selbst nach einer Brutzeit von sieben Tagen waren die Werte in etwa nur halb so hoch.

Im Höhlenbach am ersten Siphon konnten deutlich höhere Keimzahlen gefunden werden als in den Deckenquellen am Regentörle und ersten Siphon. Auffällig ist, dass die Hangquelle deutlich geringere Werte als der Höhlenbach aufweist. Obwohl der Zusammenhang zwischen Hangquelle und Höhlenbach durch Markierungsversuche (WITZIG, 1989) nachgewiesen wurde, ist es offensichtlich, dass die Hangquelle nicht ausschließlich von Höhlenwasser gespeist wird.

Die Trinkwasserverordnung schreibt eine Keimzahl von höchstens 100 KbE/mL bei einer Brutschranktemperatur von 37°C vor. Unter Berücksichtigung dieser Vorgabe sollte das Wasser des Höhlenbachs auf keinen Fall getrunken werden. Die untersuchten Quellen liegen im Bereich der maximalen Keimzahl. Bei der Beurteilung der Trinkbarkeit des Wassers muss jedoch nicht nur die Zahl der Keime, sondern auch die Art der Keime berücksichtigt werden.

Bei den durchgeführten Bestimmungen fiel auf, dass sich nicht nur die Gesamtkeimzahl, sondern auch die gewachsenen Kolonien selbst stark unterschieden:

Auf Petrischalen, die bei 8°C bebrütet wurden, waren hauptsächlich farblose oder matte bis leicht gelbliche Kolonien erkennbar, die zum Großteil eine glatte oder wellige Form aufwiesen. Die Proben aus dem Brutschrank hingegen wiesen neben den matt weißen Kolonien auch Farben wie dunkelgelb, rosa und lila auf. Ebenfalls war eine größere Vielfalt an Randformen gegeben.

**Ergebnisse der qualitativen Analytik**

Nach der Durchführung der Tests zur Bestimmung der physiologischen und morphologischen Merkmale sowie der DNA-Analyse konnten einige Bakterienstämme eindeutig identifiziert werden. Die im Folgenden beschriebenen Eigenschaften der Mirkoorganismen aus der Literatur konnten in den durchgeführten Tests bestätigt werden.

***Janthinobacterium***

Das *Janthinobacterium* hat die Form eines Stäbchens mit abgerundeten Enden. Diese kommen einzeln, teilweise aber auch in Paaren oder kurzen Ketten vor

und sie neigen dazu Schleim zu produzieren. Diese beiden Eigenschaften konnten bereits zu Beginn der Untersuchungen festgestellt werden. *Janthinobakterien* sind Gram-negativ, beweglich und strikt aerob. Es ist sowohl Katalase als auch Cytrochrom-Oxidase positiv.

Nach *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (BUCHANAN, 1974) wächst dieser Stamm bei Temperaturen zwischen 4°C und etwa 30°C. Der ideale pH-Wert für das Wachstum des *Janthinobakterium* liegt im neutralen Bereich, bei pH7–pH8.

Das Bakterium wird in der Literatur nur wenig beschrieben. Der Mikrobiologe RENÉ KADEN beschrieb 2009 einige interessante Zusammenhänge in Bezug auf die Pigmentierung dieses Stammes. (KADEN, 2009, S.90). Des Weiteren entdeckte er eine Verbindung des Janthinobacteriums mit Nadel- und Mischwäldern, wo es bei Pilzen die so genannte Weichwurzelkrankheit hervorruft.

Die ersten 800 m des Verlaufs der Falkensteiner Höhle sind oberirdisch von einem dichten Mischwald bewachsen. Dieser beginnt direkt am Höhleneingang. Es liegt die Vermutung nahe, dass dieses Bakterium mit dem Regenwasser aus dem Waldboden in die Höhle sickert.

***Micrococcus luteus***

Bei dem Stamm *Micrococcus luteus* weist der Name (lat. Lutea „gelb") auf das Erscheinungsbild der Kolonien hin. Das gelbe Bakterium ist, wie auch in den durchgeführten Tests nachgewiesen, Gram-positiv und besitzt das Enzym Katalase. Bakterien dieser Gattung können sowohl Oxidase positiv als auch negativ reagieren.

Das Bakterium tritt in Form von Kokken auf und ist beweglich. Die Kokken bevorzugen keine strenge Anordnung, setzen sich jedoch zeitweise zu tetraedrischen Gebilden zusammen. Der Stoffwechsel verläuft aerob. Die Bakterien zeigen weder Probleme mit Trockenheit noch mit hohen Salzkonzentrationen. Das Vorkommen von Micrococcus luteus ist eher unspezifisch. Häufig tritt dieser Stamm jedoch auf der menschlichen Haut auf und könnte durch die vielen Höhlenbesucher eingeschleppt worden sein.

***Staphylococcus hominis***

Diese Gram-positiven Bakterien erinnern in ihrer Form an Weintrauben. Die rundlichen Bakterien können einzeln, in Paaren und selbst in Gruppen über mehrere Ebenen vorkommen. Sie sind unbeweglich und bilden Katalase, der Oxidasetest kann sowohl negativ als auch positiv ausfallen. Auf einem Vollmedium gewachsene Kolonien zeigen eine gelbe oder weiße Farbe auf. Hierbei ist auffällig, dass gelbe Kolonien verhältnismäßig groß sind, während weiß gebildete Kolonien sich eher klein entwickeln (BUCHANAN, 1974). Bakterien der Gattung *Staphylococcus* kommen ebenfalls häufig auf der menschlichen Haut sowie auf den Schleimhäuten von Menschen und Tieren vor und gelangen vermutlich ebenfalls durch Einschleppung in die Höhle. Anders als der als ungefährlich eingestufte *Micrococcus* treten Stämme der Gattung *Staphylococcus* als Krankheitserreger auf. Einige unter ihnen sind in der Lage, Resistenzen gegen Antibiotika zu entwickeln.

***Streptomyces***

*Streptomyceten* sind Gram-positiv auftretende, aerobe Bakterien. Sie kommen hauptsächlich in Böden vor, tragen den charakteristischen Erdgeruch mit sich und werden häufig in der Medizin zur Antibiotikaherstellung eingesetzt.

Bei fast allen geöffneten Platten der Gesamtkeimzahlbestimmung war ein charakteristischer Geruch nach frischer Erde erkennbar. Dafür ist der Geruchsstoff Geosmin verantwortlich, den Professor DAVID E. CANE im Jahre 2003 zum ersten Mal in dem Bodenbakterium S*treptomyces coelicolor* nachweisen konnte. (RITTER, 2007)

Vermutlich werden die *Streptomyceten*, wie bereits beim *Janthinobakterium* beschrieben, durch den Waldboden in die Höhle gespült.

**Fazit**

Aufgrund der gefundenen Keimzahlen, vor allem im Höhlenbach, sollte das Wasser der Falkensteiner Höhle nicht getrunken werden. Das Wasser aus den untersuchten Deckenquellen weist zwar eine deutlich niedrigere Gesamtkeimzahl auf, die Wasserproben sind jedoch ebenfalls nicht unbedenklich, da an mehreren Stellen ein krankheitserregender Keim sowie coliforme Bakterien gefunden wurden. Um gesundheitliche Folgen zu vermeiden, ist vom sorglosen Trinken des Höhlenwassers unbedingt abzuraten.

Die Situation der Wasserverunreinigung ist nicht immer gleich, die Arbeit liefert nur eine Momentaufnahme.

**Ausblick**

In weiteren Untersuchungen soll festgestellt werden, an welchen Stellen die Bakterien, die für die hohen Keimzahlen im Höhlenbach verantwortlich sind, in die Höhle eintreten. Hierzu ist eine Tour bis zum vierten Siphon geplant, bei der in möglichst

kurzen Abständen Wasserproben im Höhlenbach gezogen werden sollen.

Des Weiteren soll in Kombination mit Markierungsversuchen der große Unterschied zwischen den Keimzahlen der Hangquelle und des Höhlenbachs untersucht werden.

### 3. Fototour im Departement Doubs

Traditionell wurde auch in diesem Jahr von der Höhlen-AG eine Ausfahrt in den französischen Jura durchgeführt. Es wurden einige Karst-Klassiker im Departement Doubs besucht. Dabei standen wie immer die Anwendung der geübten Einseiltechnik sowie die Höhlenfotografie im Mittelpunkt. Die folgenden Bilder wurden von Mathias Martin in der Gouffre du Baumes des Crêtes und dem Gouffre de Petit Siblot aufgenommen.


### Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Mitgliedern der Höhlen-AG der GS Tübingen für ihre tatkräftige Unterstützung.

Unser ganz besonderer Dank gilt Manfred Brenner, der uns all dies ermöglicht hat und uns jederzeit unterstützt – ständig Touren in die Falki organisiert, in nächtlichen Skypekonferenzen über die Messwerte diskutiert, Ausarbeitungen Korrektur liest und vieles mehr macht.

Auch möchten wir uns bei Dr. Friederike Hörmann von der Universität Hohenheim bedanken; für die guten Erklärungen, die Unterstützung und vor allem für die Möglichkeit unsere Tests und die DNA-Sequenzierung dort durchführen zu dürfen.

Jürgen Fodor von den Pfullinger Höhlenforschern möchten wir herzlich danke sagen für wertvolle Tipps bei der Bewertung der Messdaten und für die ständige Bereitschaft, die Höhlen-AG zu unterstützen.

Herzlichen Dank an Herrn Erwin Horrer, Schulleiter der Gewerblichen Schule Tübingen, der die Höhlen-AG nicht nur ermöglicht, sondern auch unterstützt, wo er kann.


In der Eingangshalle im Gouffre de Baumes des Crêtes. Bei diesen Bildern bekommt man eine Ahnung, um welche Ausmaße es sich bei dieser Kathedrale mit ihren mächtigen Tropfsteinformationen handelt.

In der Eingangshalle im Gouffre de Baumes des Crêtes.

Spiegelung in einem Sinterbecken

Am Grund des 40m Einstiegschachts

Die Baume des Crêtes besitzt auch sehr viele kleine Schätze.

**Literatur**


BUCHANAN, ROBERT EARLE; GIBBONS, N. E. (1974): Bergey's Manual of Determinative Bacteriology, 8th ed. Williams & Wilkins Co., Baltimore

KADEN, RENÉ (2009): Mikrobiologische Gewässeranalytik – Am Beispiel der Untersuchung einer Trinkwassertalsperre, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg

MAUCH, FELIX; ALTENHEIN, SVEN und MÖHRLE, NILS (2008): Wasserstandsmessungen in der Falkensteiner Höhle; Jugend-forscht-Arbeit

PECHHOLD, EBERHARD (1991): $CO_2$-Gehalte und Kalkgehalte des Wassers in der Falkensteiner Höhle; Laichinger Höhlenfreund Nr. 26, S. 67–78

PECHHOLD, EBERHARD (1996): Die Rolle der Gesteins- und Bodenbewetterung beim Verkarstungsprozeß am Beispiel der Schwäbischen Alb; Laichinger Höhlenfreund Nr. 31, S. 25–38

PECHHOLD, EBERHARD (2000): Der $CO_2$-Gehalt der Bodenluft im bedeckten Karst: Welchen Einflüssen unterliegt er? Mitteilungen der deutschen Höhlen- und Karstforscher e. V., Ausgabe Nr. 46, München

RITTER, K. STEPHEN (2007): How Nature Makes Earth Aroma, http://pubs.acs.org/cen/news/85/i39/8539notw8.html <Zugriff:30.07.2012>

WITZIG, REINER; WINTER, ULRICH (1989): Forschungsergebnisse zum Grabenstetter Höhlensystem, in Berichte zum Symposium „Die Grabenstetter Großhöhle“

Sämtliche Jugend-forscht-Arbeiten der Höhlen-AG stehen unter www.hoehlenag.de im Bereich Veröffentlichungen als pdf-Dokumente zur Verfügung.

**Autoren:**
Katharina Gerling
Hinter den Gärten 6
72072 Tübingen
katharinagerling@gmx.de

Matthias Martin
Rudolfstraße 3
76131 Karlsruhe
matthias@martin-tue.de

Die Bilder auf der Seite 41 wurden von Matthias Martin im Gouffre de Petit Siblot aufgenommen