

# JUNGE

## wissenschaft

JungforscherInnen publizieren  
online | *peer reviewed* | original

Verlag:  
Physikalisch-  
Technische  
Bundesanstalt



Physik

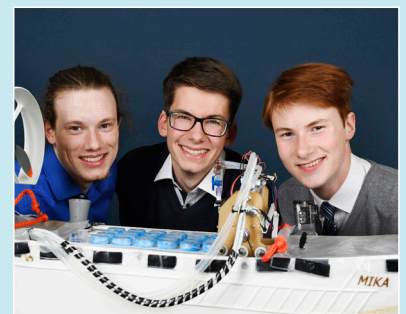
# Höhle mit Geheimnissen

Karstgewässeruntersuchung in der *Križna Jama*  
mittels selbst entwickelter Methoden

*Für die Erforschung der slowenischen Wasserhöhle Križna Jama wurden Methoden zur Probenentnahme entwickelt, die weniger in das Ökosystem der Höhle eingreifen als herkömmliche Methoden. So konnte das Wasser der Križna Jama erstmalig mikrobiologisch untersucht und neue Erkenntnisse über das hydrologische System der Križna Jama gewonnen werden sowie der Einfluss der Besucher auf die Höhle bestimmt werden.*



## DIE JUNGFORSCHER



**Leon Kausch (1999)**

**Moritz Grumann (2000)**

**Leon Nitsche (2002)**

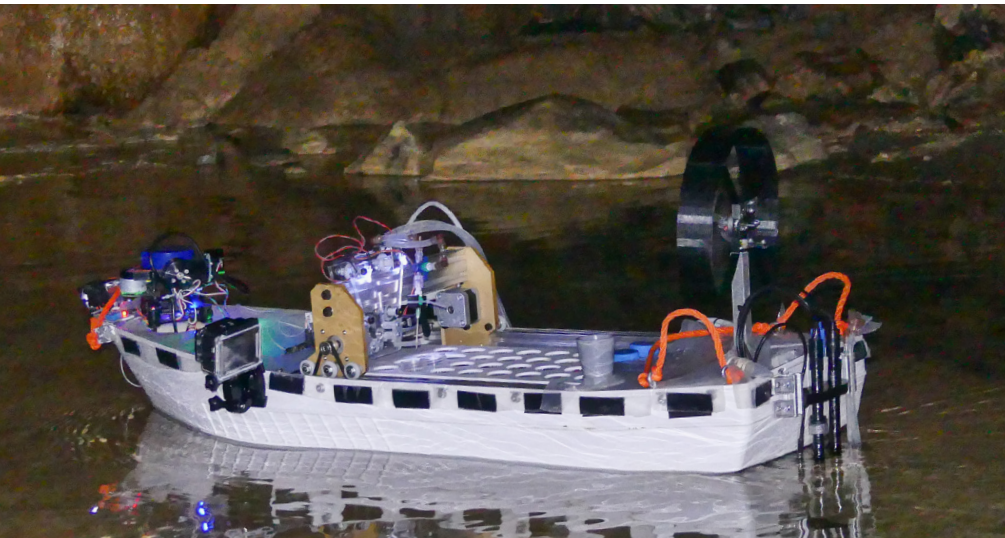
Schülerforschungszentrum  
Nordhessen

**Eingang der Arbeit:**

26.9.2019

**Arbeit angenommen:**

3.3.2020



# Höhle mit Geheimnissen

Karstgewässeruntersuchung in der *Križna Jama* mittels selbst entwickelter Methoden

## 1. Einleitung und Fragestellung

Im Untergrund der Karstlandschaft rund um die Wasserhöhle *Križna Jama* fließen zahlreiche Bäche und Flüsse. Da diese Flusssysteme nur an bestimmten Orten, wie z.B. Höhlen untersucht werden können, sind viele Zuflüsse noch nicht bekannt.

Bekannt dagegen ist das makroskopische Leben in der Höhle, nun soll auch das mikroskopische Leben in der Höhle erfasst werden, wodurch eventuell Rückschlüsse auf den Zustand des Ökosystems und mögliche Belastungen getroffen werden können.

Bei Forschungen in der *Križna Jama* muss der Höhlenschutz beachtet wer-

den. Invasive Methoden lassen sich deshalb nicht nutzen. Dazu gehören jedoch viele Standardmethoden der Gewässeruntersuchung, wie die Entnahme und Untersuchung von Sedimenten.

Daher wurde das minimal invasive Karst-Analyseboot (kurz *MIKA*) entwickelt, das zusammen mit Bojen helfen soll, folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Mikroorganismen beherbergt die *Križna Jama*?
- Funktioniert der Höhlenschutz der *Križna Jama* trotz touristischer Nutzung?

- Können neue Erkenntnisse über den Wasserlauf gewonnen werden?
- Wie lassen sich diese Untersuchungen mit dem Höhlenschutz vereinbaren?

## 2. Die Wasserhöhle *Križna Jama*

Die *Križna Jama* liegt in Slowenien, in der Nähe von Postojna, mitten in einem großen Karstgebiet bei den Koordinaten 45°44'42.16"N 14°27'51.23"E. Insgesamt umfassen die Gänge der *Križna Jama* ungefähr 8 km. Sie gehört zu den Wasserhöhlen.

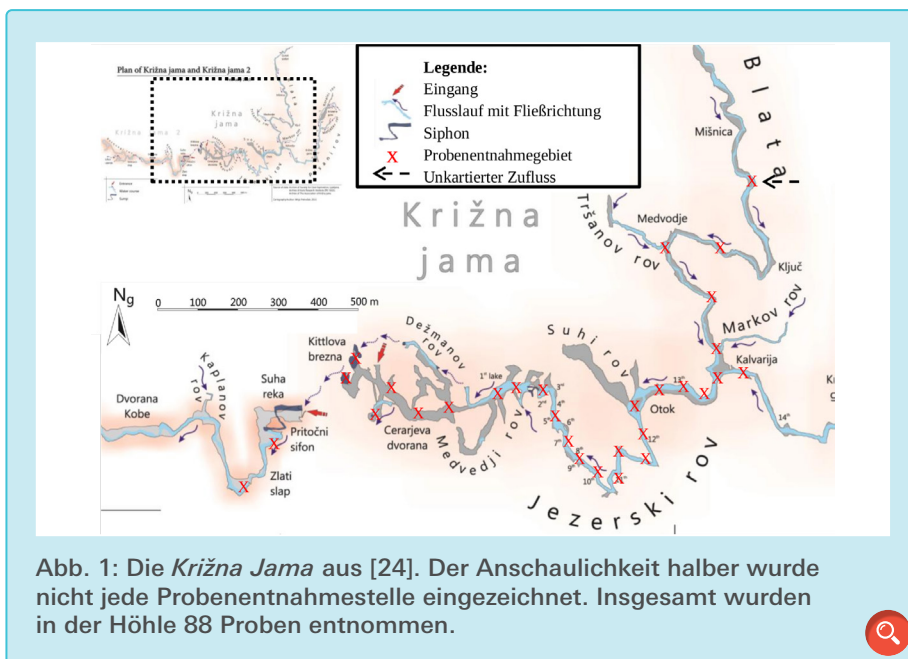
### 2.1 Fluss des Wassers

Auf dem Bloke Plateau, nordwestlich der Höhle, versickert das Wasser der beiden Hauptzuflüsse. Diese fließen in der Höhle zusammen ([siehe Abb.1](#)) [24]. Weiter fließt das Wasser durch die *Križna Jama* in die *Križna Jama 2*, bevor der Strom wieder an der Oberfläche in einen Bach mündet [19].

Die Temperatur des Wassers beträgt nahezu konstant 8°C. Der pH-Wert liegt bei 7,1–7,8. Das Wasser ist reich an Calciumionen und Carbonaten [25].

### 2.2 Touristische Nutzung der Höhle

In der *Križna Jama* besuchen in der Hauptsaison Gruppen von bis zu 60 Leuten den ersten See (1<sup>st</sup> lake in [Abb. 1](#)), der restliche Teil bis zur Kalvarija wird maximal von Vierergruppen besucht. Zum Vergleich, die Postojnska Jama wird täglich von bis zu 10.000 Touristen besichtigt [26]. Eine Belastung der Höhle durch die Touristen ist dennoch nicht vollständig auszuschließen. Für die Touristen wird die Höhle allerdings nicht ausgebaut. Die Besucher bewegen sich meist auf kleinen Pfaden, es ist keine permanente Beleuchtung installiert. Dadurch entsteht hier keine Lampenflora, also durch Beleuchtung wachsen-



de mikrobiologische Kolonien wie zum Beispiel in der Postojnska Jama [13][26].

### 2.3 Chemische Einflüsse der Umgebung

Landwirtschaftliche Nutzung und Bebauung der Region belasten das Grundwasser mit Nährstoffen wie Ammonium, Nitrat und Phosphat [1]. Örtliche Kläranlagen filtern Phosphat oder Nitrat nicht aus dem Abwasser heraus, wodurch diese Stoffe direkt in die Bäche gelangen [26]. Streusalz gelangt ebenfalls in das Grundwasser.

Die Gegend ist, abgesehen von den Feldern, fast vollständig bewaldet. Die Wälder der Region können durch natürliche Prozesse, wie dem Abbau von organischem Material, für leichte Nährstoffeinträge sorgen. Im Vergleich zu den anthropogenen Nährstoffquellen sind die natürlichen Quellen zu vernachlässigen.

### 2.4 Geologische Rahmenbedingungen

Die Höhle besteht aus Kalkstein, hauptsächlich Calcit und kleinere Mengen Dolomit. Calcit ist in Wasser löslich, während Dolomit schlechter löslich ist. Deswegen fließen Grundwasser und

auch unterirdische Bäche wie der Jezerski rov bevorzugt durch den Calcit. In der Križna Jama ist der wohl häufigste Einschluss im Calcit neben dem Dolomit, das Mangan, was durch dunkle Bereiche erkennbar ist.

### 3. Die Höhlenexpeditionen

Innerhalb von 12 Tagen im Juli 2018 wurden drei Expeditionen von bis zu zehn Stunden Dauer durchgeführt. Aufgrund der Auflagen des Höhlenschutzes war bei jedem Gang in die Križna Jama ein Führer dabei.

Während der ersten Expedition arbeiteten zwei Gruppen gleichzeitig. Die erste Gruppe fuhr mit einem Schlauchboot entlang des Jezerski rov, um zunächst den ersten See mittels des MIKAs zu beproben und bis See 14 und der Blata entlang, Bojen auszulegen. Währenddessen entnahm die zweite Gruppe Proben aus dem 20 Meter tiefen Schacht Kittlova brezna und einem weiteren drei Meter tiefen Schacht.

Während der zweiten Expedition wurde der Flusslauf bis zum See 14 mit dem MIKA befahren und beprobt. An der Kalvarija teilte sich die Gruppe auf, um einmal aus der touristisch nicht genutzten Blata Proben zu entnehmen. Die

zweite Gruppe nutzte die ca. drei Stunden, um See 13 und See 14 verstärkt mit dem MIKA zu beproben. Auf dem Rückweg wurde jeweils eine der doppelt ausgelegten Bojen eingesammelt.

Beim dritten Besuch wurde eine weitere Messreihe mit den Sensoren des MIKAs durchgeführt und sämtliche Bojen wieder aus der Höhle geholt. Während der drei Expeditionen wurden auch händisch Proben entnommen.

Neben den Expeditionen in der Križna Jama wurde auch eine in die Križna Jama 2 unternommen sowie eine zu bereits bekannten Zu- und Abflüssen der Höhle (siehe Abb. 2). Die Križna Jama 2 ist der Hauptabfluss der Križna Jama und eine von Sloweniens am besten geschützten Höhlen. Sie ist bislang deutlich schlechter erforscht als die Križna Jama, da der Zugang zu ihr stark limitiert ist [26][25].

### 4. Methoden der Gewässeranalytik für das Höhlenwasser

Bei der Untersuchung des Wassers der Križna Jama wurden – unter anderem – geläufige Methoden genutzt. Dabei wurden die Konzentrationen von im Wasser gelösten chemischen Substanzen und Schwebstoffen quantitativ bestimmt.

#### 4.1 Umgang mit den Wasserproben aus der Höhle

Die Wasserproben wurden mit zwei Methoden entnommen, zum einen wie unter „5.1.3 Wasserprobenentnahme mit dem MIKA“ beschrieben und zum anderen per Hand. Bei den Proben, die per Hand entnommen wurden, war es wichtig, dass die Probenröhrchen gegen den Strom in das Wasser gehalten wurden. Dadurch konnten auf dem Wasser schwimmende Partikel schlechter in die Probe gelangen und diese verunreinigen. Alle Wasserproben wurden randvoll und langsam befüllt, damit sich die

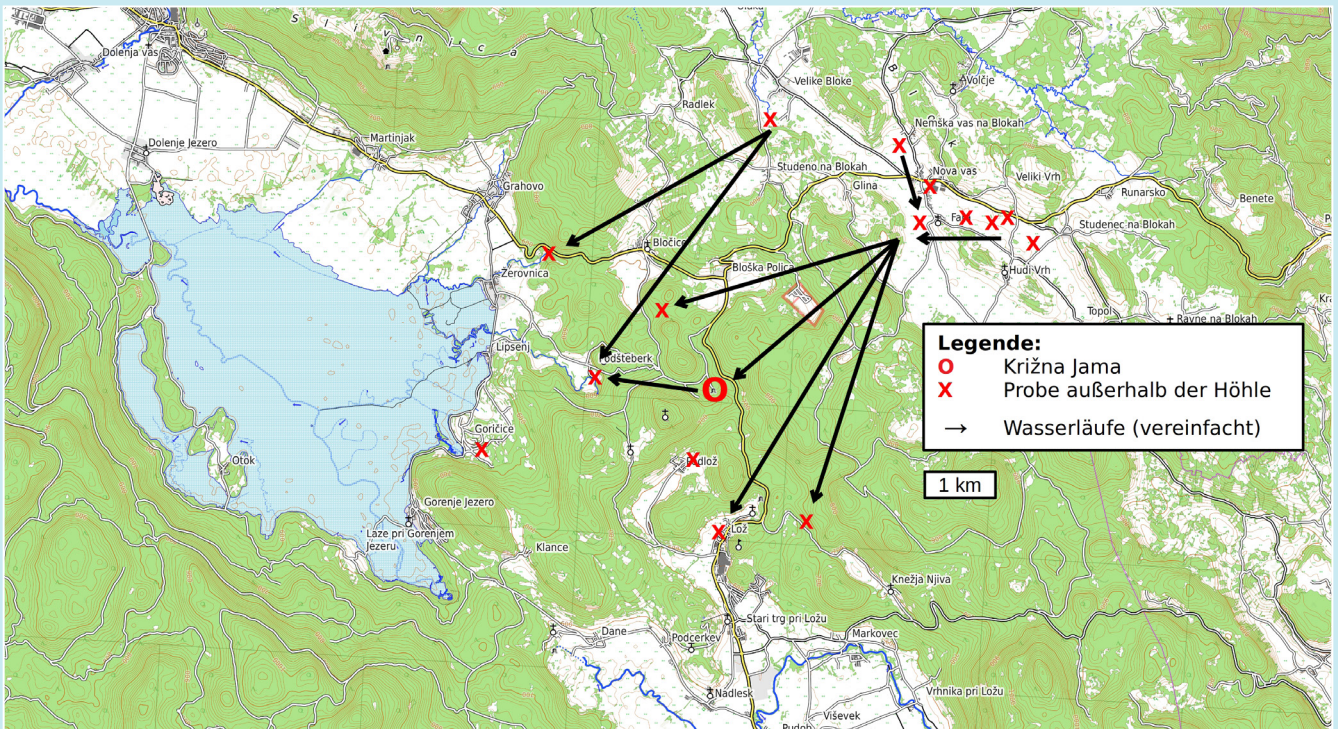


Abb. 2: Umgebungskarte der *Križna Jama*. Die Hydrologie des Gebiets wurde nach Prelovšek eingezeichnet (Bloke Plateau in weiß im Osten der Karte) [38][25].

Chemie und Biologie der Wasserprobe möglichst wenig durch die Anreicherung mit Sauerstoff verändert. Wenn es nicht möglich war, das Probenröhrchen vollständig unter Wasser zu halten, wurde der Deckel der Probe als Schöpfkelle genutzt. Außerdem wurden die Proben immer knapp unterhalb der Wasseroberfläche entnommen.

Da jede Probe wichtig und nicht zu ersetzen war, war es notwendig sie richtig zu lagern, damit sich die Eigenschaften der Probe nicht verändern. Nach der Probenentnahme wurden die Proben schnellstmöglich gekühlt. Dabei wurde eine Temperatur von 4°C gewählt, da diese leicht unterhalb der Temperatur der Höhle von 8°C liegt und so Stoffwechselaktivitäten minimiert wurden. Eine Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes kann nicht genutzt werden, da das die biologische Untersuchung beeinflusst. In der Probe enthaltene Zellen würden durch den Frost aufplatzen und wären unter dem Mikroskop nicht mehr sichtbar. Direkt nach dem Abschluss der biologischen Untersuchung

wurden die Proben eingefroren, damit eine Veränderung der chemischen Parameter möglichst unterbunden wurde. Damit die Kühlkette auf der Fahrt von Slowenien nach Deutschland nicht unterbrochen wurde, wurden die Proben in einer mobilen Kühlbox mit Kompressor bei 4°C gelagert.

Zur chemischen Analyse wurden die Proben filtriert, damit störende Schweb-

stoffe die Reaktion oder die photometrische Messung nicht beeinflussen. Da allerdings bei den Filtraten vorhandene Mikroorganismen und andere mikroskopisch kleine Objekte aus der Probe entzogen wurden, musste die unfiltrierte Probe für die Mikroskopie genutzt werden. Vor jeder Untersuchung wurde die Probe durch starkes Schütteln homogenisiert, was für repräsentative Ergebnisse sorgte.

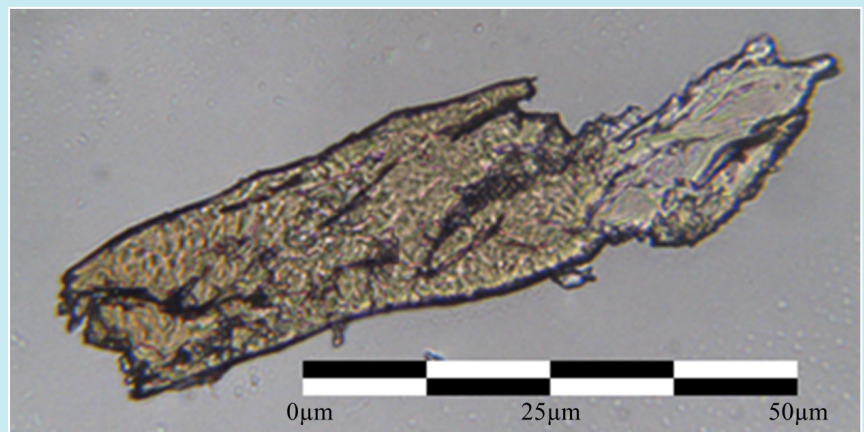


Abb. 3 Ein Zellrest, wie er häufig in der *Križna Jama* gefunden wurde.



Tab. 1: Die untersuchten Stoffe in den Wasserproben und die Daten zu den Kalibrierungen. Die Metalle wurden mit Atomabsorptionsspektroskopie nachgewiesen und haben entsprechend niedrige Nachweisgrenzen.

Stoff	Messbereich	Steigung der Regression	Extinktion bei 0mg/L	R2	Vertrauensbereich (99,9%)	Nachweisgrenze	Bestimmungsgrenze
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,4–2 mg/L	0,60 L/(mg · cm)	-0,08	0,9856	0,16 mg/L	0,41 mg/L	1,22 mg/L
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,2–1 mg/L	0,77 L/(mg · cm)	0,04	0,9987	0,03 mg/L	0,06 mg/L	0,18 mg/L
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2–10 mg/L	0,01 L/(mg · cm)	0,00	0,9989	0,69 mg/L	0,95 mg/L	2,86 mg/L
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,5–2,5 mg/L	0,07 L/(mg · cm)	0,05	0,9966	0,02 mg/L	0,41 mg/L	1,23 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5–12,5 mg/L	0,01 L/(mg · cm)	0,03	0,9989	0,01 mg/L	1,08 mg/L	3,25 mg/L
Cl <sup>-</sup>	0,5–2,5 mg/L	0,03 L/(mg · cm)	0,00	0,9994	0,06 mg/L	0,09 mg/L	0,27 mg/L
Ca <sup>2+</sup>	0,5–1,5 mmol/L	0,002 L/(mmol · cm)	0,03	0,9999	0,02 mmol/L	0,04 mmol/L	0,13 mmol/L
Al	2–8 µg/L	0,08 L/(µg · cm)	-0,08	0,9691	0,06 µg/L	1,49 µg/L	4,48 µg/L
Fe	8–20 µg/L	0,01 L/(µg · cm)	-0,01	0,9875	0,01 µg/L	5,48 µg/L	16,44 µg/L
Mn	1–4 µg/L	0,05 L/(µg · cm)	0,03	0,9995	0,03 µg/L	0,09 µg/L	0,28 µg/L
Na	0,1–0,5 µg/L	1,84 L/(µg · cm)	0,29	0,9972	0,01 µg/L	0,04 µg/L	0,11 µg/L
Pb	8–80 µg/L	0,01 L/(µg · cm)	0,02	0,9951	0,01 µg/L	13,03 µg/L	39,09 µg/L
K	10–50 µg/L	0,002 L/(µg · cm)	0,00	0,9966	3,20 µg/L	4,95 µg/L	14,84 µg/L
Cr	5–25 µg/L	0,016 L/(µg · cm)	0,02	0,9959	0,77 µg/L	2,37 µg/L	7,10 µg/L
Zn	2–8 µg/L	0,06 L/(µg · cm)	-0,03	0,9972	0,72 µg/L	1,13 µg/L	3,40 µg/L
Ni	5–25 µg/L	0,003 L/(µg · cm)	0,00	0,9978	0,54 µg/L	1,74 µg/L	5,20 µg/L
Cu	20–100 µg/L	0,01 L/(µg · cm)	-0,11	0,9839	4,90 µg/L	18,83 µg/L	56,48 µg/L
Co	1–5 µg/L	0,01 L/(µg · cm)	0,00	0,9998	0,03 µg/L	0,10 µg/L	0,30 µg/L

#### 4.2 Mikroskopische Untersuchung der *Križna Jama*

Das Wasser ist einer der diversesten Lebensräume. Speziell in Höhlen können schon leichte Schwankungen in den Eigenschaften des Wassers die Mikroflora entscheidend verändern. Man kann also durch die Untersuchung dieser Lebewesen Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Wassers ziehen. Mit der mikrobiologischen Untersuchung können außer-

dem Einflüsse auf das Ökosystem der Höhle festgestellt werden.

Zur Bestimmung dieser Eigenschaften wurden Proben unter dem Lichtmikroskop untersucht. Mit einer Ependorfpipette wurden 20 µl der Probe entnommen und auf einen Objektträger (Ot) gegeben. Der Tropfen wurde mit einem Deckglas abgedeckt. Anschließend wurde das Präparat unter dem Lichtmikroskop untersucht. Hierfür wurde die Fläche des Deckglases

einmal mit 100-facher und ein zweites Mal mit 400-facher Vergrößerung abgerastert. Von sämtlichen Objekten wurde mit einer Mikroskopkamera mindestens ein Bild gemacht (siehe Abb. 3). Das einheitliche Format der Deckgläschen und Volumen der Probe sorgte hierbei für eine Vergleichbarkeit der Messwerte. War von einer eindeutigen Art eine hohe Anzahl an Individuen vorhanden, so wurden mehrere Beispielbilder gemacht und die Anzahl aller Objekte notiert. Bei charakteristischen Bewegun-



gen oder anderen Auffälligkeiten wurde ein Video von dem Objekt aufgenommen. Jedem Bild und Video wurden eine Kennziffer mit entsprechender Anzahl und ein vorläufiger Name zugeordnet. Nach Abschluss des Mikroskopievorgangs wurden die genauen Arten mit einem Bestimmungsbuch bestimmt [7]. Mit diesem Verfahren können Mikroorganismen mit einer Größe von ca. 5 bis 500 µm gefunden werden.

### 4.3 Chemische Verfahren zur Analyse einer Höhlenwasserprobe

Im Gegensatz zu den biologischen Untersuchungen des Wassers kann mit der chemischen Untersuchung eine Momentaufnahme des Gewässerzustands erstellt werden. Dazu wurden unter anderem Nährstoffe, weit verbreitete Anionen und zahlreiche Metalle und Schwermetalle untersucht. Außerdem ist in der Höhle der Calcium- und Ma-

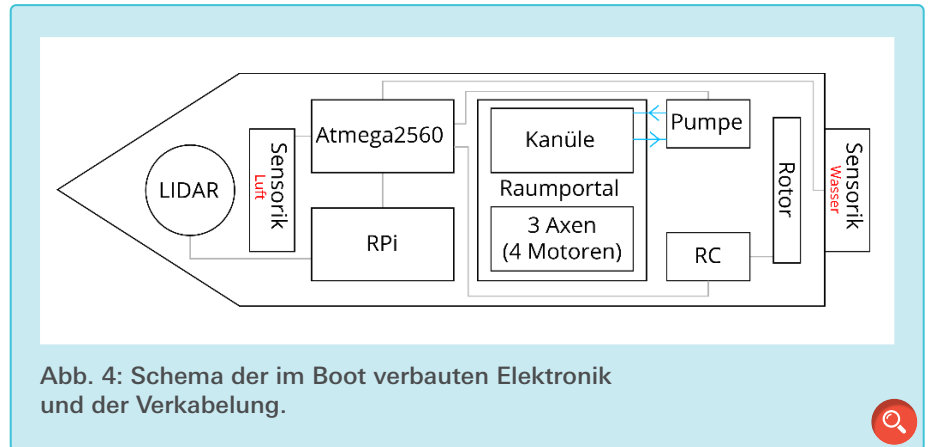


Abb. 4: Schema der im Boot verbauten Elektronik und der Verkabelung.

gnesiumgehalt interessant, da diese Parameter eine Veränderung im Gestein andeuten können. Sämtliche Wasserproben aus Slowenien wurden mit der Atomabsorptionsspektroskopie, photometrischen Verfahren, sowie mit einer Titration untersucht. Damit wurde das Wasser auf 19 verschiedene Parameter geprüft. Die Parameter, die untersucht wurden, sind in der [Tab 1](#) dargestellt und relevante Parameter zur Messung angegeben. Zusätzlich wurde auch die

Wasserhärte bestimmt (Vertrauensbereich 99,9%: 1,82 mg/L) [1][15].

## 5. Selbstentwickelte Methoden

Um die komplexen Fragestellungen des Projekts zu beantworten, ist eine Vielzahl an speziellen Methoden, Abläufen und Techniken entstanden. Dazu zählen die Bojen, die wir für die Untersuchung der Mikrobiologie der Höh-

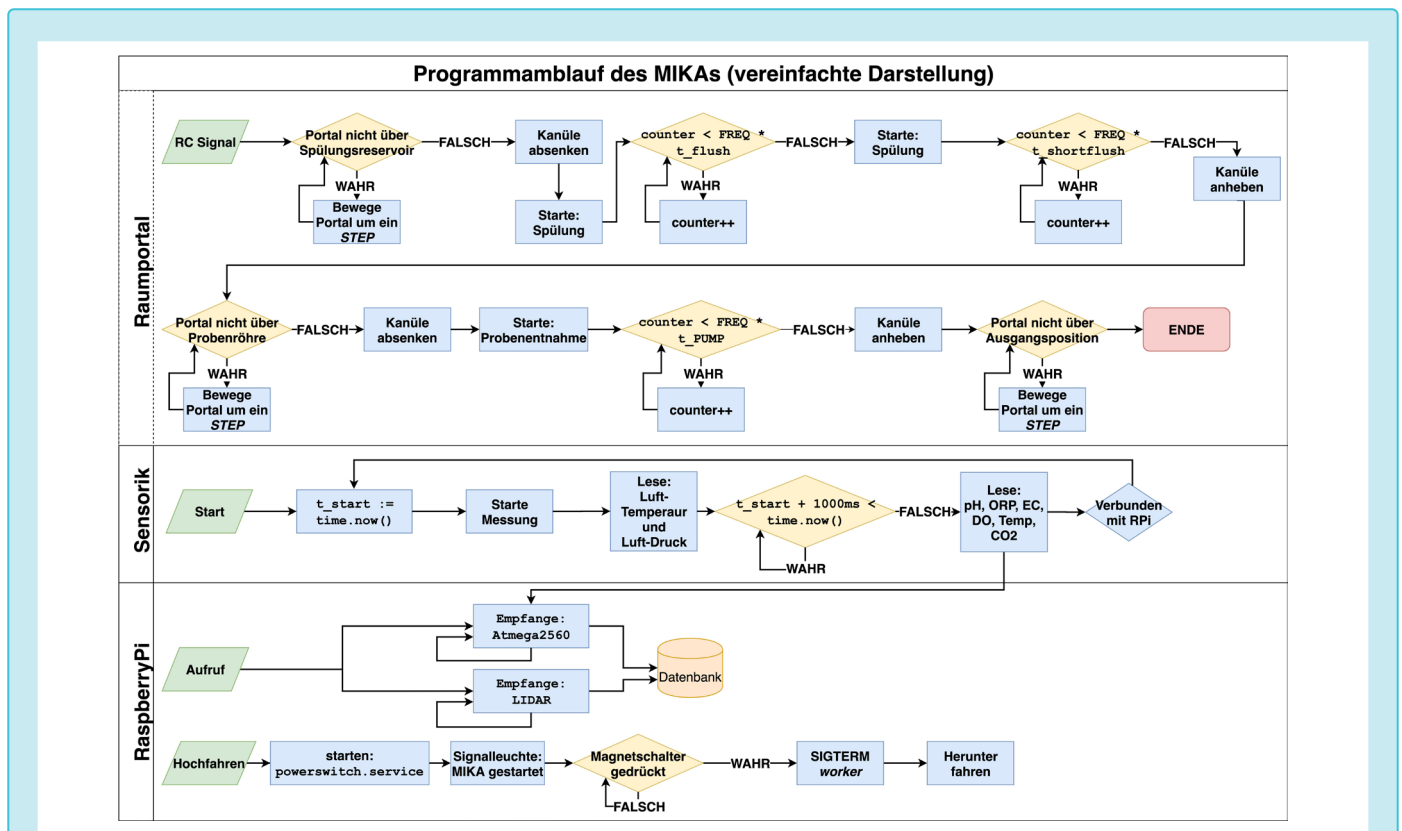


Abb. 5: Visualisierung des auf dem MIKA laufenden Codes. Dabei laufen auf dem Arduino Mega bis zu zwei Prozesse gleichzeitig ab. Dabei werden gleichzeitig die Sensoren ausgewertet und das Raumportal gesteuert. Der Raspberry Pi speichert die Daten des Arduino und des LIDARs.

le benötigten, aber auch eine erweiterte Single-Rope-Technik zum Höhlenklettern. Vor allem aber war das minimal invasive Karst-Analyseboot *MIKA* entscheidend für das Projekt.

## 5.1 Entwicklung des Forschungsbootes

Das *MIKA* wurde für den Zweck entwickelt, den Bedingungen einer Höhle gerecht zu werden, sowohl in analytischer, mobiler als auch höhlenschützender Hinsicht. Dabei werden für die Auswertung im Labor Wasserproben entnommen. Diese werden mit Echtzeitparametern ergänzt. Zudem kartographiert ein LIDAR-System Höhlenabschnitte und zeichnet auf, an welchen Stellen Wasserproben entnommen worden sind ([siehe Abb. 4](#)). Bei der Konstruktion wurden Erkenntnisse zum Bootsbau aus einer anderen Jugend forscht-Arbeit [12] berücksichtigt.

Aufgrund der geringen Anzahl an genehmigten Befahrungen der Höhle war es nötig, dass die Proben so unverfälscht wie möglich entnommen werden konnten. Weil die meisten Seen nicht durch Ufer miteinander verbunden sind, musste auf ein Schlauchboot zurückgegriffen werden. Durch dessen Größe und die Paddelbewegungen wurde viel Sediment und Schlamm aufgewirbelt. Das kann die Wasseroberflächenproben stark verfälschen. Die fehlenden Ufer erschwerten auch die händische Probenentnahme. Hierfür eignet sich das minimal invasive Karst-Analyseboot. Durch seinen Antrieb wurden Verwirbelungen minimiert. Wasserparameter wurden regelmäßig automatisch gemessen.

### 5.1.1 Probenentnahme

Die Entnahme von Proben wird halbautomatisch gesteuert. Dabei gibt die steuernde Person mittels eines Schalters einen Befehl zur Probenentnahme, welche dann automatisch abläuft. Gesteuert werden diese (halb-)automatischen

Prozesse von einem Mikrokontroller (*Atmega2560*) und einem *Raspberry Pi*. Weil in Höhlen das GPS, worüber man die Uhrzeit beziehen kann, aufgrund der Abschirmung durch die Gesteinsdecke nicht verfügbar ist, wird die Zeit mittels einer digitalen Echtzeituhr gemessen.

### 5.1.2 Verwirbelungsfreier Antrieb

Um Auf- und Verwirbelungen, welche Messergebnisse verfälschen können, zu reduzieren, nutzt das *MIKA* anstatt einer Schiffsschraube einen Luftpropeller. Die Luftschraube ist durch eine Lenkstange schwenkbar und besitzt einen Propellerschutz. Dieser schützt den Rotor vor Zusammenstoßen mit der Höhlenwand an Überhängen. Außerdem schützt er vor versehentlichem Hineingreifen in den Propeller. Gesteuert wird das *MIKA* mit einer im Modellbau üblichen Fernbedienung und einem auf dem Boot befindlichen Empfänger. Dieser steuert einen Servomotor zum Schwenken der Lenkstange, den Motortreiber des Propellers und die Befehlsübergabe der Probenentnahme.

### 5.1.3 Echtzeitmessungen von Wasserparametern

Neben den Wasserproben werden in Echtzeit Daten über das Wasser erhoben, um wichtige und in der Wasseranalytik übliche Parameter konstant zu erfassen. Diese Messungen werden von dem *Atmega2560* gesteuert. Ein Digitalthermometer misst die Wassertemperatur, vier weitere Elektroden überwachen den pH-Wert, den gelösten Sauerstoff, das Redoxpotential und die elektrische Leitfähigkeit. Vor dem *Atmega2560* sind ICs geschaltet, welche die Signale der Elektroden auswerten.

Die Elektroden werden mit BNC-Leitungen und voneinander getrennten Stromkreisläufen geschirmt, um wechselseitige Störungen zu vermeiden.

Des Weiteren wurde ein CO<sub>2</sub>-Sensor verbaut. Aus dem An- bzw. Abstieg des

in der Luft befindlichen Kohlenstoffdioxids lassen sich Rückschlüsse auf den Kalkkreislauf ziehen.

Der *Atmega2560* kommuniziert mittels verschiedener Protokolle mit der verbauten Messelektronik. Die mit Abstand größte Verarbeitungszeit für eine Messung, mit Zeiten zwischen 600 ms und 900 ms besitzen die ICs zur Verarbeitung der Signale der Elektroden. Diese Verarbeitungszeit limitiert die Anzahl an Messungen am stärksten, da sie nicht optimierbar ist. Also musste die Software für andere Komponenten um diese Verarbeitungszeit herum optimiert werden. So werden auf dem *Atmega2560* zu verarbeitende Prozesse dann ausgeführt, wenn gerade eine Messung stattfindet. Schlussendlich werden für jeden Messzyklus die gemessenen Daten in einer CSV-Datei gespeichert ([siehe Abb. 5](#)).

Damit die Messwerte nicht verfälscht werden, wird vor jedem Einsatz die Sensorik kalibriert. Dazu wird auf dem *Atmega2560* eine Software installiert, welche als Brücke zwischen einem Computer und den mit I<sup>2</sup>C steuerbaren ICs dient. Die Elektroden werden mithilfe von Kalibrierlösungen kalibriert.

### 5.1.4 Wasserprobenentnahme mit dem *MIKA*

Der Apparat zur Probenentnahme besteht aus zwei Komponenten: Dem Raumportal ([siehe Abb. 6 und 7](#)) und dem Schlauchsystem. Das konstruierte Raumportal ist in der Lage, eine Kanüle in zwei Raumachsen parallel zur Wasseroberfläche zu bewegen und die Kanüle in ein Probenröhrchen zu stecken. Die Kanüle gehört zum Schlauchsystem, welches über eine Pumpe Höhlenwasser transportieren kann. Um Kreuzkontamination zu verringern, spült sich das Schlauchsystem selbst, bevor eine Probe entnommen wird. Dazu wird die Pumpe von einem Regler umgepolt; das noch im Schlauch stehende Wasser fließt heraus und von der Probeentnahmestelle kann neues Wasser nachfließen.

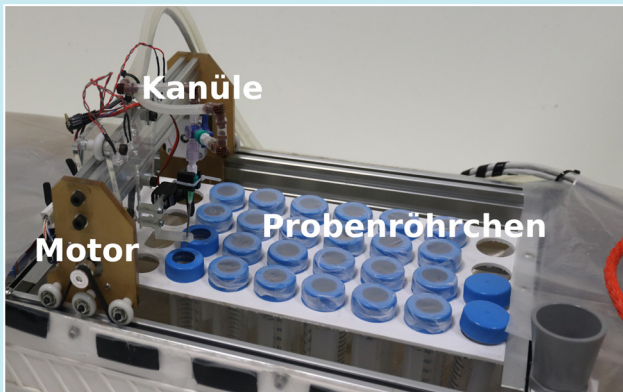


Abb. 6: Das Raumportal auf dem MIKA.

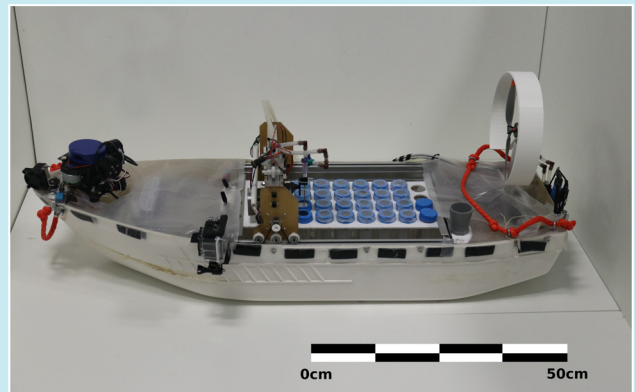


Abb. 7: Großaufnahme des MIKA.

ben. Ventile sichern dabei den korrekten Fluss des Wassers. Anschließend wird ein wenig Wasser aus der Kanüle in ein dafür vorgesehenes Spülröhrchen abgelassen.

Der *Atmega2560* besitzt nur einen Rechenkern. Deshalb kann nur eine Aufgabe zur gleichen Zeit bearbeitet werden. Während einer Probenentnahme soll jedoch immer noch die Sensorik ausgewertet werden. Zu diesem Zweck wird für den Spülvorgang ein 16-Bit-Timer genutzt. Ein solcher Timer kann durch Mitzählen des Prozessortakts in regelmäßigen Zeitabständen die Hauptroutine kurz unterbrechen und Quellcode ausführen, was Interrupt genannt wird. Aufgrund der hohen Interrupt-Frequenz, mit der der Code unterbrochen wird, muss der *Atmega2560* sehr

hardwarenah programmiert sein. Um das Raumportal zu bewegen, wird den Schrittmotortreibern mit jedem Interrupt ein kurzer Puls gegeben, bis die Motoren an dem gewünschten Ort sind. Damit die Pumpe läuft, wird dem Treiber der Pumpe der Befehl gegeben, in eine bestimmte Richtung zu pumpen. Ermittelt wird die Anzahl an Zyklen mit Hilfe der Interrupt-Frequenz und der Zeit, die die Pumpe Wasser fördern soll. Diese Zyklen werden dann bis zur bestimmten Anzahl mitgezählt. Bei Erreichen dieses Werts wird die Routine unterbrochen, sodass mit dem nächsten Schritt fortgefahren werden kann. Von der Fernbedienung kann man über den Empfänger mittels eines Schalters einen Impuls an den *Atmega2560* senden. Dieser startet darauf den Ablauf einer Probenentnahme.

### 5.1.5 Anpassung an die Höhle und Instandhaltung

Die Schaltelektronik ist in wasserdichten Boxen verbaut, damit Feuchtigkeit, Wasser und Schlamm aus der Höhle nicht die Einsatzfähigkeit des Bootes gefährden. Ein Ausschalter für den auf dem Boot befindlichen *Raspberry Pi* wird durch einen Magnetschalter realisiert. Unsachgemäßes Ausschalten kann für Datenverluste sorgen. Außerdem ist durch Kondenswasser besonders gefährdete Elektronik mit *Parafilm* abgedeckt. Weitere Elektronik außerhalb der Boxen ist größtenteils mit *Plastidip* vor eindringendem Wasser geschützt. Der Innenraum des MIKA wird mit einer Plastikplane vor Spritzwasser geschützt. Energiekabel und Signalleitungen zwischen den Bo-

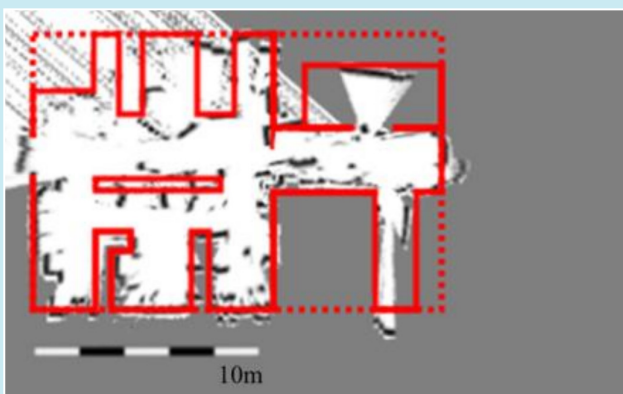


Abb. 8: Eine mit dem LIDAR erstellte Karte vom Arbeitsraum des SFN (schwarzweiß) und ein Grundriss des Raums (rot). Das MIKA wurde dabei auf einem Rollbrett bewegt.

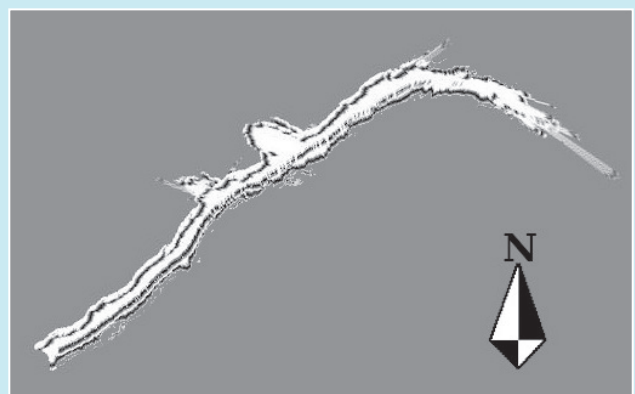


Abb. 9: Karte der Grube Samson, aufgenommen mit dem LIDAR-System des MIKA.



xen und außerhalb verbauter Komponenten werden durch abgedichtete Kabelführungen geführt.

Mit Blick auf die besonderen Gegebenheiten einer Höhle sind ein um ca. 160° schwenkbarer Scheinwerfer und zwei verschiedene Signalleuchten an Steuer- und Backbord verbaut. Beides sind Maßnahmen, um der steuernden Person das Lenken und Orientieren des *MIKA* zu erleichtern. Mit 100 cm Länge und 33 cm Breite lässt sich das *MIKA* über die Trageriemen auch über zu kletternde Passagen tragen. Zudem lässt es sich so auch in enge, schwer zugängliche Stellen manövrieren.

Zusätzlich zu den Echtzeitmessungen werden am Bug und in den wasserdichten Boxen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen. Somit wird die Eruierung von Laufzeitfehlern leichter. Außerdem kann durch die wasserdichten Boxen ein Hitzestau entstehen. Wenn Bauteile überhitzen, führt dies zu einer Funktionsuntüchtigkeit, welche den Einsatz nachhaltig beeinträchtigen kann. Deshalb wird hier zusätzlich mit Lüftern die Luft in den Boxen homogen verteilt.

#### 5.1.6 Entwicklung eines Protokolls für *Atmega2560* und *Raspberry Pi*

Da der *Raspberry Pi* die Datensätze von Sensorik und LIDAR vereinen soll, um das Zusammenfügen von Position und Messwerten zu ermöglichen, müssen Arduino und *Raspberry Pi* in der Lage sein, miteinander zu kommunizieren. Die speziellen Anforderungen machten es notwendig, ein eigenes, simples, auf UART basierendes Protokoll zu entwickeln. Der *Raspberry Pi* bekommt dadurch die Möglichkeit einen UNIX-Zeitstempel zu erfragen, um seine Zeitmessung mit dem *Atmega2560* zu synchronisieren, aber auch den Datenfluss an Newline separierten CSV-Ein-

trägen zu starten oder zu stoppen.

#### 5.1.7 Vermessung einer Höhle mittels LIDAR

LIDAR ist ein Indoor-Navigationsverfahren zur optischen Abstandsmessung. Ein sogenannter LIDAR-Scanner ist aufgebaut aus einem Laser-Distanzmesser und einem Motor. Von ihm ausgehend werden Polarkoordinaten, welche einen Querschnitt (Punktwolke) der Umgebung ergeben. Will man aus mehreren Punktwolken eine Umgebungskarte erstellen und sich gleichzeitig im Raum orientieren, nutzt man einen SLAM-Algorithmus (Simultaneous Localisation and Mapping). Die Anwendung eines solchen Systems lohnt sich an Orten wo Präzision und/oder Reaktionsfähigkeit auf die Umgebung gefragt sind. Im speziellen Fall einer Höhle eignet es sich zudem, weil das GPS nicht verfügbar ist, aber auch weil man detaillierte Karten der Umgebung erstellen kann, ohne in das System einzugreifen. Es lassen sich mit dieser präzisen Lokalisation die Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherstellen, während detaillierte Karten erstellt werden, welche in vielen Fällen für solche Höhlen nicht existieren. Durch schwachen Wellengang kann jedoch die Präzision stark vermindert werden. Um diesen Effekt auszuschließen, wird das System in zwei Rotationsachsen stabilisiert. Das verbaute System dient somit außerdem einem konzeptionellen Beweis für die Einsatzfähigkeit von LIDAR-Scannern auf Wasser.

Die hohe Luftfeuchtigkeit in der *Križna Jama* sorgte dafür, dass die Datenübertragung des LIDARs gestört wurde. Um jedoch das Potential eines solchen Systems unter Beweis zu stellen, wurde es erneut abgedichtet und in der Grube Samson (Deutschland, Niedersachsen) getestet. Die Luft in der Grube ist genau wie die der *Križna Jama* mit Feuchtigkeit übersättigt. Mit dem überarbeiteten System ließ sich eine Karte der Grube erstellen ([Abb. 9](#)). Auf dieser sind vie-

le Details zu erkennen, wie zum Beispiel die Schnittfläche eines Risses, der durch Gitterstäbe vom Weg getrennt ist. Die [Abbildungen 8](#) und [9](#) wurden mit der BreezySLAM Bibliothek [37] erstellt.

#### 5.1.8 Zuverlässigkeit des *MIKA*s

Auf dem *MIKA* sind drei Arten von Sensorik verbaut: Die überwachende Sensorik besteht aus Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren. Weiter gibt es experimentelle Sensoren, wie das LIDAR und den CO<sub>2</sub>-Sensor. Beide sind nicht missionskritisch. Somit liefern beide Geräte Werte, die zur Reproduzierbarkeit beitragen, beziehungsweise nicht direkt zur Beantwortung der Fragestellungen notwendig sind. Die wichtige und missionskritische Sensorik sind die am Heck verbauten Elektroden. Sie messen relevante Parameter der Wasseranalytik mit einer hohen Frequenz und sind somit unersetzlich.

Bei der hohen mechanischen Belastung, die durch den Transport durch eine Höhle entsteht, ist eine dauerhafte Zuverlässigkeit nicht immer garantiert. Zudem wird die Wahrscheinlichkeit von Wasserschäden durch die hohe Luftfeuchtigkeit und von der Decke tropfendes Wasser erhöht.

Durch verschiedene Anstrengungen in der Bauweise des Bootes soll die Zuverlässigkeit erhöht und bei einem Ausfall das Auffinden und die Behebung der Fehler erleichtert werden.

Während der Expedition haben sich technische Fehler im LIDAR-System und CO<sub>2</sub>-Sensor ergeben. Beide haben der hohen Feuchtigkeit nicht standgehalten. Während der CO<sub>2</sub>-Sensor komplett ausfiel, wurde die Übertragung von Daten des LIDAR-Systems massiv gestört. Resultat sind überlappende, fehlende oder schlichtweg fehlerhafte Datensätze. Mehrere Versuche, die Daten wieder herzustellen, waren erfolglos. Die Messergebnisse der Feuchtigkeitssensoren in den Boxen zeigten eine

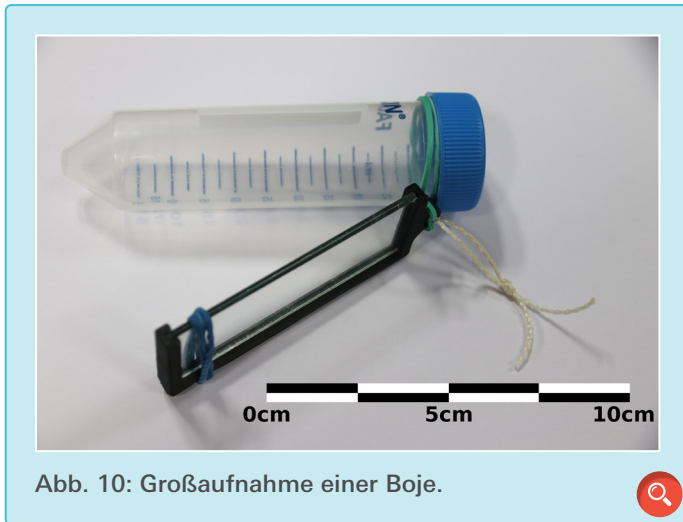


Abb. 10: Großaufnahme einer Boje.

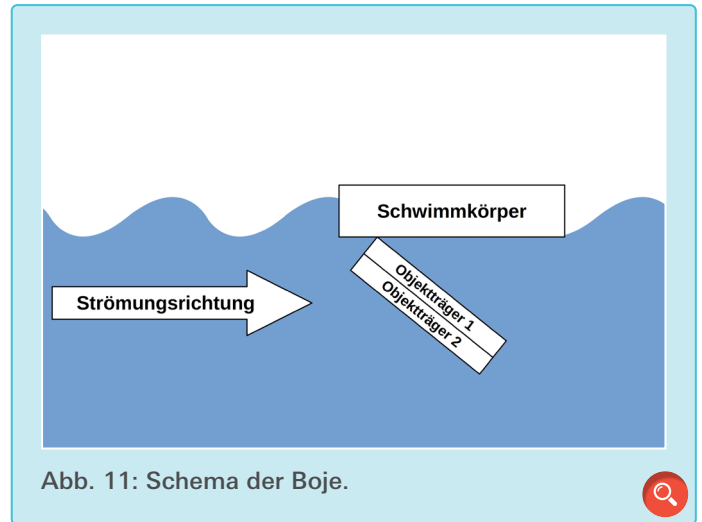


Abb. 11: Schema der Boje.

mit Wasser übersättigte Luft an, weshalb weitere Kondensatbildung durch Aufheizen vermieden wird. Anders als die experimentelle hat die missionskritische Sensorik den harschen Bedingungen standgehalten.

## 5.2 Bojen

Die Bojen wurden für die mikrobiologische Untersuchung der Wasserläufe eigens entworfen, um als minimal-invasiver Ersatz für Sedimentproben zu dienen. Diese werden für gewöhnlich für mikrobiologische Untersuchungen verwendet.

### 5.2.1 Notwendigkeit der Entwicklung eines neuen Messverfahrens

Die permanente Dunkelheit in der Höhle unterbindet Photosynthese, was die Anzahl an Mikroorganismen geringhält. Um dieses Problem zu umgehen, entnimmt man für gewöhnlich Sedimentproben, da sich die wenigen Schwebstoffe dort absetzen und man so mehr Material als in Wasserproben erhält. Diese Form der Probenentnahme ist in der *Križna Jama* jedoch streng durch den Höhlenschutz verboten, da hierdurch die Naturbelassenheit der Höhlenböden auf Jahre hinweg gestört wird. Die gewählte Funktionsweise der daraus resultierenden Messstationen basiert logischerweise ebenfalls auf dem Prinzip der Sedimentation, also

der Grundidee, dass sich über mehrere Tage Objekte auf einer Oberfläche absetzen und dadurch ansammeln. Dafür wird ein Objektträger für drei bzw. fünf Tage im Wasser gelassen. Daraufhin wird er herausgenommen und die Unterseite gesäubert. Anschließend wird mit einem Lichtmikroskop die Probe untersucht.

### 5.2.2 Aufbau der Bojen

Neben der Problematik die Objektträger an der Höhlenwand zu fixieren, muss auch der Höhlenschutz beachtet werden. Dieser verbietet schwere Fixierungen wie z.B. Haken oder Schäden durch Bohrungen. Deswegen müssen die Messstationen möglichst kompakt und schonend zu fixieren sein und dennoch den Objektträger in einer konstanten Position und Tiefe halten. Eine festgelegte Position ist einerseits wichtig für die Wiederauffindbarkeit und andererseits für eine eindeutige Zuordnung der Messergebnisse. Die Notwendigkeit einer kompakten Bauart ergibt sich aus den eingeschränkten Transportmöglichkeiten in der Höhle.

Als Auftriebskörper dient ein 50 ml Probenröhrchen. An diesem wird eine selbst gefertigte Objektträgerhalterung mit einem Gummiband befestigt. In dieser werden zwei Objektträger fixiert (siehe Abb. 10 und 11). Diese berühren sich mit jeweils einer Seite. Letztere wird später gesäubert und unter dem

Lichtmikroskop als Unterseite verwendet. Die Boje ist außerdem mit einer Schnur aus Polypropylen verbunden, mit welcher die Messstation an Felsvorsprüngen in der Höhlenwand (siehe Abb. 12) befestigt wird.

### 5.2.3 Vorteile der Bojen

Verglichen mit anderen Methoden der Aufkonzentration bestehen mehrere Vorteile. Erstens ist die Ansammlung durch Sedimentation für Mikroorganismen sehr viel schonender als z.B. Zentrifugation, durch welche Mikroorganismen derart beschädigt werden können, dass sie nicht mehr bestimmbar sind. Des Weiteren sind die Bojen leicht herzustellen, einfach zu transportieren, kompakt zu lagern, schnell zu befestigen und vor allem minimal-invasiv, um den Höhlenschutz zu achten. Zusätzlich befindet sich an den Objektträgern sehr viel weniger Wasser als in herkömmlichen Proben, was zum einen Mikroorganismen in ihrer Bewegung einschränkt und sie zum anderen daran hindert sich – insbesondere bei niedrigen Temperaturen – stark zu vermehren.

Einer der wohl wichtigsten Vorzüge gegenüber händischen Proben ist die konstante Tiefe der Objektträger, um eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu wahren. Der Vorteil der Probenröhrchen als Auftriebskörper besteht im Speziellen darin, dass nach der Entnahme der



Abb. 12: Eine unserer selbstentwickelten Bojen wird in der Höhle befestigt.



Bojen aus dem Wasser die Objektträger in dem Röhrchen gelagert werden können. Außerdem wird kein Sediment entnommen und der Höhlenboden geschont. Eine mögliche Fehlerquelle ist, dass sich nicht nur mehr Mikroorganismen, sondern auch mehr Sediment und Verunreinigungen an den Objektträger anlagern. Diese können das Auffinden von tatsächlichen Lebewesen erschweren, da sie die Organismen überdecken.

#### 5.2.4 Vergleichsmessungen zur Messdatenvalidierung

Um die Effizienz der Methode zu überprüfen, haben wir mehrere Messreihen mit Proben und Bojen im Bugasee, der Fulda, der Ahne und im Wahlebach rund um Kassel durchgeführt. Bojen wurden für drei oder fünf Tage im Wasser gelassen und bei ihrer jeweiligen Entnahme wurde zusätzlich eine händische Wasserprobe entnommen. Anschließend wurde eine Untersuchung mit dem Lichtmikroskop durchgeführt.

Hierbei fallen folgende Eigenarten der Messmethode auf. Vereinzelt kommt es vor, dass sich auch Sand und Schlamm auf dem Objektträger absetzen und die Sicht erschweren. Dies schränkt die Untersuchung jedoch nur wenig ein und trat bei insgesamt 72 Messungen nur selten auf. Auffällig ist, dass die Ob-

jektträger je nach Ortswahl eindeutige Variationen in der Menge zeigen (zwischen 13 und 513 gezählten Objekten), während die Wasserproben nur 4 bis 20 Objekte unabhängig von der Ortswahl aufweisen. Bei Betrachtung der Messwerte fällt auf, dass in schmutzigeren Gewässern die Bojen einen Sättigungswert erreichen, da die Objektträger (Ot) völlig bedeckt sind. Dies geschieht bei den Wasserproben nicht. Folglich sind Wasserproben besser geeignet für die Untersuchung von stärker belasteten Gewässern, in denen Bojen lediglich zur qualitativen Bestimmung ausreichen würden. Allerdings liefern die Bojen besonders bei niedrigen Konzentrationen auswertbare Messergebnisse, da hier durch die größeren Mengen Messfehler weniger ins Gewicht fallen als bei den niedriger konzentrierten Wasserproben. Folglich sind die Bojen für die Höhle geeignet, da dort eine geringe Menge an Schwebstoffen vorliegt.

Ein weiterer erwähnenswerter Punkt ist, dass sich auf Ot1 durchschnittlich etwa 2,5-mal so viel Material anlagert, wie an Ot2 (siehe Abb. 11). Dies ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf zwei Faktoren zurückzuführen. Zum einen befindet sich die freie Seite von Ot2 frontal in der Strömung, was Sedimentation erschwert, während Ot1 von Ot2 abgeschirmt in einem vergleichsweise strö-

mungsarmen Bereich liegt (siehe Abb. 11). Zum anderen zeigt die freie Seite von Ot2 nach unten, während die des Ersten nach oben gerichtet ist und damit herabsinkende Objekte wesentlich leichter auffangen kann.

Demnach sind Bojen nicht nur für die simple qualitative Bestimmung der vorhandenen Spezies, sondern auch für die Untersuchung der Konzentration an Organismen in Gewässern mit geringer Belastung den Sedimentproben überlegen. Zusätzlich bieten sie eine für die Höhle schonende und dennoch zuverlässige Messmethode.

#### 5.3 Probenentnahme in tiefen Schächten

Um die Proben im Schacht *Kittlova brezna* und dem kleinen Schacht entnehmen zu können, muss man in den Schacht gelangen, wozu die beim Höhlenklettern übliche „Single-Rope-Technik“ (SRT) genutzt wurde. Jedoch war bis zuletzt unklar, ob in der *Kittlova brezna* unter der Abseilstelle Wasser ist und wenn dort welches ist, wie tief es ist. Um auf diesen Fall vorbereitet zu sein, wurde eine Methode entwickelt, wie man am Seil hängend Wasserproben entnehmen kann.

Dazu wurde die Kletterausrüstung mit einer Tasche für Wasserproben und einem speziellen Probennehmer, dem Selfiestick, erweitert. Der Selfiestick besteht aus einem Teleskopstab, an dessen Spitze ein aufgebohrter Probendeckel befestigt ist. In diesen modifizierten Deckel kann man Probenröhrchen hineinschrauben und diese nach dem beschriebenen Verfahren zur Probenentnahme nutzen. Sobald das Probenröhrchen befüllt ist, wird es aus der Halterung heraus geschraubt und mit einem dichten Deckel versehen.

Durch den Teleskopstab hat der Selfiestick ein geringes Packmaß, was beim Klettern überaus praktisch ist. Zum Entnehmen von Proben ist eine große

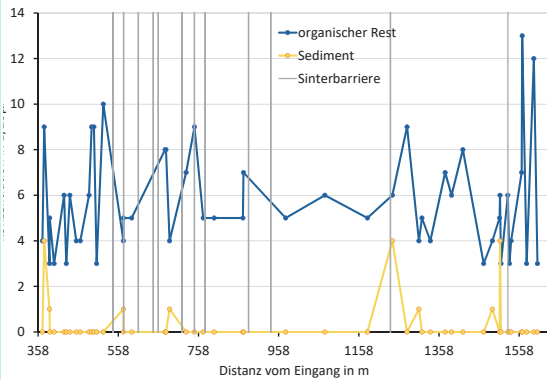


Abb. 13: Biologische Untersuchung der Wasserproben. Es ist keine systematische Veränderung erkennbar.

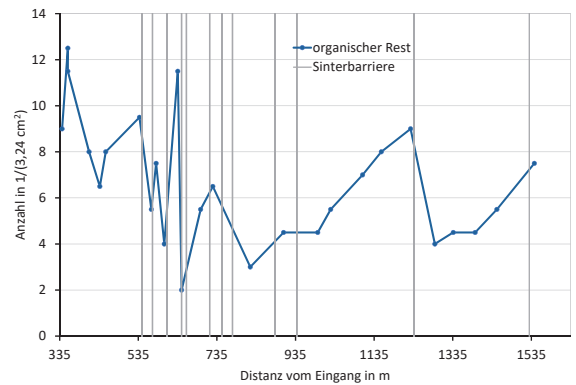


Abb. 14: Gefundene Zellreste auf den Bojen im Verlauf der Höhle. Abfall der Konzentration der organischen Reste zwischen 1300 m und 1500 m Entfernung zum Eingang sowie zwischen 950 m und 1250 m.

Reichweite notwendig, welche der Selfiestick ebenfalls bietet. Auch außerhalb der Höhle wurde der Selfiestick oft zum Entnehmen von Proben an schwer zugänglichen Stellen genutzt. Da man nach der Probenentnahme wieder aus dem Schacht heraus kommen muss, wurde trainiert, wie man das Kletterequipment am Seil hängend für den Aufstieg umbauen kann.

## 6. Ergebnisse der Messungen und Diskussion

Mit dem MIKA und unserer Klettermethode wurden über 100 Wasserproben entnommen, mit denen über 1000 biochemische Messwerte erhoben werden konnten. Zusätzlich wurden 27 Bojen ausgelegt und unter dem Lichtmikroskop untersucht. Außerdem haben die Sensoren am Heck des Bootes ca. 175.000 Messwerte erfasst. Diese erfolgreiche Datenerhebung zeigt nicht nur die Effizienz unserer Methoden, sondern liefert auch genug Material, um mehrere, bisher unbekannte Aussagen über die Höhle und das Karstsystem zu treffen. Diese Beobachtungen werden nachfolgend beschrieben, diskutiert und die Schlussfolgerungen erläutert.

### 6.1 Regenerationsprozesse in der Höhle

#### 6.1.1 Beobachtung

Bei der mikroskopischen Auswertung der Bojen und Wasserproben wurden neben sporadischen Sedimentablagerungen ausschließlich Fragmente von Lebewesen gefunden, deren schlechter Zustand eine genaue Kategorisierung verhindert. In der Höhle scheint es – abgesehen von einigen bereits bekannten makroskopischen Arten (Krebse, Würmer, Fledermäuse) – kein Leben zu geben, welches sich unter dem Mikroskop erfassen lässt.

Bei den Wasserproben ist kein Muster erkennbar (siehe Abb. 13). Bei den Bojen hingegen zeigt sich eine Struktur, die mit den Sinterbarrieren der Höhle verbunden zu sein scheint (siehe Abb. 14). Diese Barrieren sind in der Grafik als graue Balken dargestellt.

Ab Kalvarija kommt es bis zur nächsten Sinterbarriere zwischen See 12 und 13 zu einem kontinuierlichen Abfall der Menge an organischem Material (Siehe Abb. 14, Distanz vom Eingang ca.: 1300 bis 1500 m). An dieser Barriere steigt die Konzentration erneut und fällt im folgenden Verlauf annähernd linear ab. Ab der darauffolgenden Barriere zwischen See 11 und 12 folgen im Wasserlauf viele Sinterbarrieren, worauf bis zu

See 1 die Messwerte chaotisch ansteigen. Dort liegen die Werte durchgehend hoch.

#### 6.1.2 Diskussion

Die Abwesenheit der Mikroorganismen ist mit dem Fehlen von Licht in Verbindung zu bringen, welches Pflanzenwachstum unterbindet und so auch heterotrophem Leben die Nahrung entzieht. Denn anders als in anderen Schauhöhlen gibt es in der *Križna Jama* kein permanentes, künstliches Licht.

In der *Križna Jama* ist kein Leben in der Größenordnung zwischen 5 und 500 µm auffindbar.

Für den Anstieg des organischen Materials an Sinterbarrieren gibt es mehrere mögliche Erklärungen. Zum einen ist hier das Wasser flacher und der Strom beengt, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit steigt. Außerdem wird der stetige Wasserfluss an den Barrieren unterbrochen, was Verwirbelungen zur Folge hat. Zum anderen müssen an diesen Stellen Touristen die Boote verlassen und teilweise mehrere Meter durch das Wasser laufen, wodurch es ebenfalls zum Aufwirbeln von Partikeln kommen kann. Da beide Gründe den gleichen Effekt haben und nur eben dieser

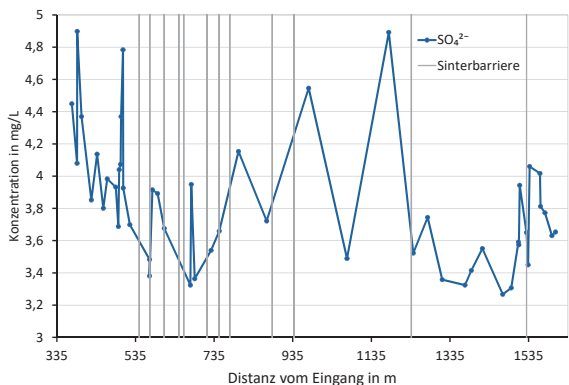


Abb. 15: Sulfatgehalt des *Jezerski rov* im Bachverlauf der *Križna Jama*. Der Verlauf zeigt vereinzelte Schwankungen.

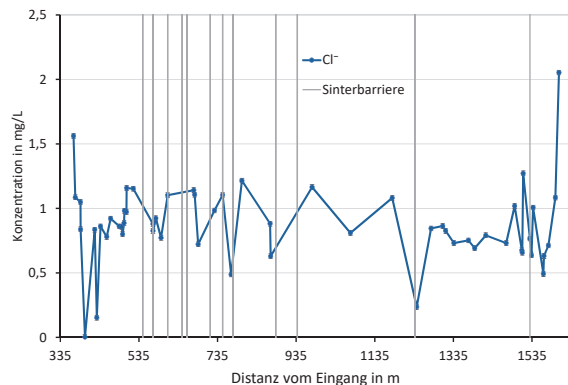


Abb. 16: Der Chloridgehalt des *Jezerski rov* verändert sich nicht deutlich im Bachverlauf der *Križna Jama*.

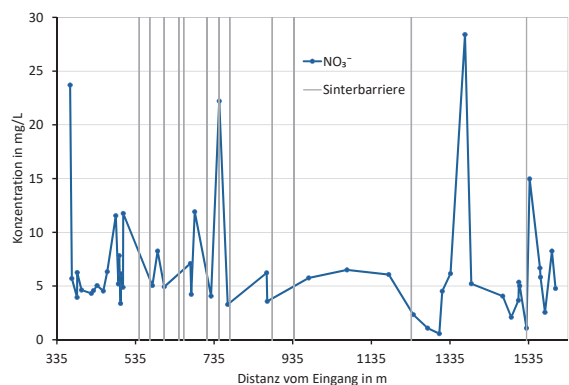


Abb. 17: Nitratgehalt des *Jezerski rov* im Bachverlauf der *Križna Jama*. Abgesehen von den Ausreißern gibt es keine Veränderungen.

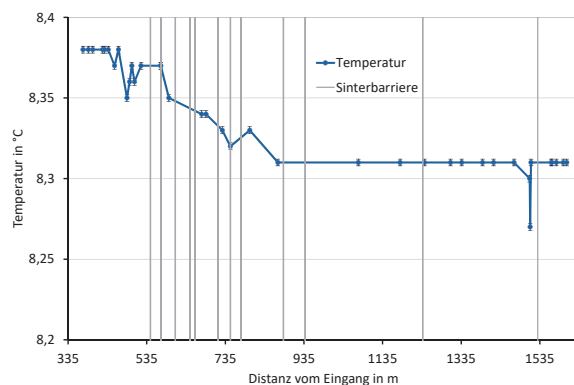


Abb. 18: Temperatur des *Jezerski rov* im Bachverlauf der *Križna Jama*. Der Anstieg erscheint aufgrund der Änderung um nur 0,07°C nicht signifikant, kann aber auch an dem in der Nähe befindlichen Eingang liegen.

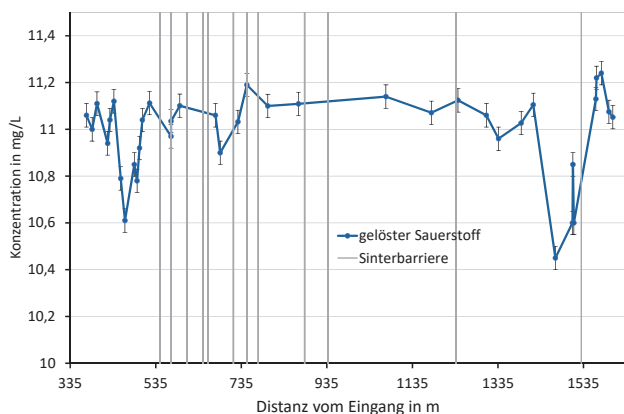


Abb. 19: Sauerstoffgehalt des *Jezerski rov* im Bachverlauf der *Križna Jama*. Der Sauerstoffgehalt bleibt vor allem zwischen 500 m und 1400 m konstant.



gemessen wurde, ist es nicht feststellbar, welcher der beiden Faktoren überwiegt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist eine Kombination dieser Umstände verantwortlich für die ansteigenden Werte nach Barrieren. Demnach ist ein eindeutiger Einfluss durch Höhlenbesucher nicht nachweisbar.

Ein Zusammenspiel aus mehreren Faktoren gibt es auch bei den sinkenden Werten zwischen den einzelnen Barrieren, was ebenfalls in [Abb. 13](#) beobachtet werden kann. Hier setzen sich Schwebstoffe vermutlich einerseits am Grund ab, andererseits leben in der Höhle auch mehrere heterotrophe Tierarten, wie

Tab. 2: Vergleich der Messergebnisse der *Kittlova Brezna*, des kleinen Schachts und des ersten Sees.

Messstelle	Cl <sup>-</sup> in mg/L	Mg <sup>2+</sup> in mmol/L	Ca <sup>2+</sup> in mmol/L	Ca/Mg
Kittlova Brezna	2,78 ±0,06	0,50 ±0,03	1,20 ±0,02	2,73 ±0,09
Kleiner Schacht	15,46 ±0,06	0,37 ±0,03	0,98 ±0,02	2,64 ±0,09
See 1	1,32 ±0,06	0,67 ±0,03	1,04 ±0,02	1,28 ±0,09

z.B. kleine Krebse, die um zu überleben das wenige, organische Material im Wasser fressen müssen.

Die Höhle filtert durch Sedimentation das Wasser von Schwebstoffen, welche jedoch an Sinterbarrieren durch Verwirbelungen und Tourismus teilweise wieder aufgeschwemmt werden.

## 6.2 Die Suche nach Zuflüssen und touristischen Einflüssen

### 6.2.1 Beobachtung

In der Höhle ändert sich die chemische Zusammensetzung des Wassers nur geringfügig, siehe Abb. 15–19. In [Abb. 15](#), [16](#) und [19](#) sind Fehlerbalken eingearbeitet, diese sind jedoch nur geringfügig größer als die Markierungen. Bis auf einzelne Schwankungen verändern sich die Konzentrationen nicht. Bei den Schwankungen und Ausreißern sind keine Zusammenhänge erkennbar. Jedoch steigt der Sulfatgehalt ([siehe Abb. 19](#)) im zweiten See, welcher in Fließrichtung vor dem ersten See liegt, an.

Sulfat, Magnesium, Calcium, Chlorid und Nitrat sind in der gesamten Höhle nachweisbar, wohingegen sämtliche untersuchten Metalle abgesehen von Alkali- und Erdalkalimetallen nicht nachweisbar sind. Außerdem sind in allen Wasserproben Nitrit, Phosphat und Ammonium nicht nachweisbar. Auch hier gibt es keine Veränderungen, die in der Höhle auftreten.

### 6.2.2 Diskussion

Obwohl verschiedene Nährstoffe vorliegen, lässt sich in der *Křižna Jama* kein Leben unter dem Mikroskop finden. Die Hauptursache davon ist der Lichtmangel in der Höhle.

Die durchgehend niedrigen Konzentrationen von Chlorid und Nitrat sind ein Anzeichen für eine geringe Belastung des Wassers. Außerdem sind die Konzentrationen der Nährstoffe sowie von Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat recht gering (siehe Abb. 15–19), was eine hohe Wasserqualität anzeigt.

Eine übermäßige Beeinflussung des Wasserlaufes durch Tourismus würde die Werte stark erhöhen. Ein Einfluss von Touristen würde sich vor allem im ersten See bemerkbar machen. Der Sul-

fatgehalt steigt allerdings bereits im zweiten See an, weshalb er nicht direkt auf den Tourismus zurückzuführen ist. Somit handelt es sich dabei um eine andere, nicht feststellbare Ursache.

Da es keine Änderungen im Wasserlauf gibt, ist es unwahrscheinlich, dass es in der *Křižna Jama* im *Jezerki rov* einen Zufluss gibt, der sich auf die chemische Zusammensetzung des Bachs auswirkt. Genauso ist ein Einfluss der Touristen auf das Wasser nicht nachweisbar, da es selbst im Eingangsbereich der Höhle zu keinen Änderungen kommt.

Das Fehlen des Phosphats lässt sich durch die Phosphatausfällung erklären (siehe 6.5 Phosphatausfällung). Daneben könnten die Werte auch auf die nicht vorhandene Mikroflora zurückzuführen sein, die, wenn sie vorhanden

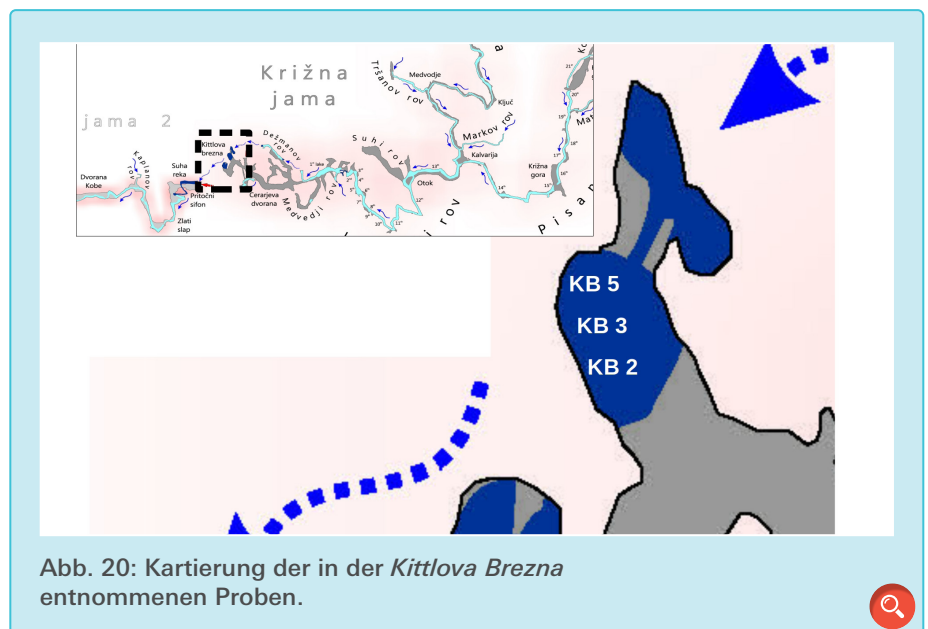


Abb. 20: Kartierung der in der *Kittlova Brezna* entnommenen Proben.

Tab. 3: Messergebnisse in der *Kittlova Brezna*. Auffällig ist das Absinken der Härte, der Calciumkonzentration und der Nitratkonzentration von oben nach unten.

Messstelle	Härte in mmol/L	Ca <sup>2+</sup> in mmol/L	Ca/Mg	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> in mg/L	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> in mg/L	Cl <sup>-</sup> in mg/L
KB5	1,96 ±0,02	1,39 ±0,02	2,42 ±0,09	9,61 ±0,69	nn	2,61 ±0,06
KB3	1,88 ±0,02	1,11 ±0,02	1,44 ±0,09	6,00 ±0,69	nn	2,75 ±0,06
KB2	1,65 ±0,02	0,98 ±0,02	1,45 ±0,09	5,11 ±0,69	nn	2,71 ±0,06

wäre, durch Verwesung Phosphat freisetzen würde.

Alles in allem kann keine touristische oder anders entstehende anthropogene Belastung der Höhle festgestellt werden. Des Weiteren kann kein Zufluss zwischen *Kalvarijska* und dem ersten See gefunden werden.

### 6.3 Geologische und biologische Unterschiede zwischen der *Blata* und dem *Pisani rov*

Der *Pisani rov* zeichnet sich, genauso wie der *Jezerški rov*, durch seine zahlreichen Seen aus. Im Gegensatz dazu hat die *Blata* keine strömungsberuhigten Bereiche, da hier der Bach durch einen schmalen Graben durchgängig fließt. Außerdem besteht der Boden in der *Blata* überwiegend aus sehr feinem Schlamm, während die Tunnel des *Jezerški rov* und des *Pisani rov* nahezu vollständig aus Kalkstein und ein wenig Dolomit bestehen. Da es deutliche geologische Unterschiede zwischen der *Blata* und dem *Pisani rov* gibt, soll untersucht werden, wie sich das auf die gefundenen Zellreste auf den Bojen auswirkt.

Auf der Boje im See 14 wurden mit 7,5 ±1 mikrobiologischen Fragmenten mehr Zellreste als in der *Blata* (4 ±1 mikrobiologische Fragmente) gefunden.

Diese Differenz kommt vor allem durch zwei Faktoren zustande. Zum einen hat der Schlamm der *Blata* vermutlich eine

absorbierende Wirkung auf die Zellreste, zum anderen wird die Sedimentation durch die stärkere Strömung verhindert, was wiederum die Konzentration der Schwebstoffe erhöht. Im See 14 sind diese beiden Faktoren genau umgekehrt, da der Kalkstein die Biomasse nur wenig absorbiert, was die Konzentration erhöht. Durch die geringe Strömung wird jedoch die Sedimentation verstärkt. Somit ist die absorbierende Wirkung der Umgebung auf die Zellreste wirkungsvoller als die Sedimentation.

### 6.4 Hydrologie im Eingangsbereich der *Križna Jama*

#### 6.4.1 Beobachtung

In dem kleinen Schacht im Eingangsbereich der *Križna Jama* haben wir einen deutlich höheren Chloridgehalt als in dem Hauptstrom der *Križna Jama* gemessen (siehe Tab. 2). In sämtlichen Proben der *Kittlova Brezna* ist der Chloridgehalt erhöht. Der Calciumgehalt des Wassers im kleinen Schacht ist niedriger als im ersten See, während er in der *Kittlova Brezna* höher ist. In der *Kittlova Brezna* werden am nordwestlichen Ufer des Sees erhöhte Nitratgehalte beobachtet, welche nach Südosten abfallen (siehe Abb. 20 und Tab. 3). Zwischen dem ersten See und der *Kittlova brezna* entstehen große Veränderungen in der Menge an Chlorid und dem Verhältnis zwischen Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup>.

#### 6.4.2 Auswertung

Die Änderung des Chlorid- und Calciumgehalts zwischen dem *Dezmanov rov* und der *Kittlova brezna* lässt sich nicht durch das durchflossene Gestein erklären, was zeigt, dass sich dort ein Zufluss in den Hauptstrom der Höhle befindet.

Da sich das Wasser auf der Strecke von ca. 150 m vom ersten See zum kleinen Schacht nicht so auffällig verändern kann, hängt der Bach im kleinen Schacht vermutlich nicht mit dem Hauptstrom, der von See 13 kommt, zusammen. Diese Vermutung wird durch einen niedrigeren Magnesiumgehalt, eine geringere Härte und einen stark abweichenden Chloridgehalt im kleinen Schacht im Vergleich zu dem ersten See bestätigt. Das zeigt, dass der Bach im kleinen Schacht nicht aus dem *Jezerški rov*, dem Bach des ersten Sees, gespeist wird.

Aufgrund der geografischen Lage des kleinen Schachts wurde des Weiteren überlegt, ob der Bach im kleinen Schacht der Zufluss zwischen dem ersten See und der *Kittlova brezna* sein kann.

Durch eine Mischung des ersten Sees und des Bachs im kleinen Schacht kann der Chloridgehalt der *Kittlova brezna* erklärt werden. Jedoch widerlegt der Calciumgehalt, dass der Bach im kleinen Schacht der gesuchte Zufluss zwischen dem ersten See und *Kittlova brezna*

Tab. 4: Vergleich der Nitrat-, Chlorid-, Calcium- und Magnesiumkonzentrationen im See 14, dem *Markov rov* und dem unkartierten Zufluss.

Messstelle	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> in mg/L	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> in mg/L	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> in mg/L	Cl <sup>-</sup> in mg/L	Ca <sup>2+</sup> in mmol/L	Mg <sup>2+</sup> in mmol/L
unkartierter Zufluss	3,64 ±0,69	nn	nn	0,41 ±0,06	0,99 ±0,02	0,37 ±0,03
Markov rov	22,46 ±0,69	nn	nn	0,32 ±0,06	1,02 ±0,02	nn
See 14	5,62 ±0,69	nn	nn	1,02 ±0,06	0,84 ±0,02	0,92 ±0,03

na sein kann, wenn von einer Mischung ohne hydrochemische und thermische Veränderungen ausgegangen wird. Da der Bach im kleinen Schacht wahrscheinlich nicht der Zulauf zwischen dem ersten See und *Kittlova brezna* ist, muss es einen anderen Zufluss geben.

Ein weiterer Zufluss zwischen dem *Dežmanov rov* und der *Kittlova brezna* ist nicht bekannt, jedoch widersprechen einige unserer Messungen in der *Kittlova brezna* (siehe Tab. 3) dieser Aussage. Sie zeigen, dass es in der *Kittlova brezna* noch einen weiteren Zufluss geben könnte, da am nordwestlichen Ufer erhöhte Nitratwerte gemessen werden.

Nach Prelovšek werden starke Änderungen der chemischen Zusammensetzung des Bachs als Zufluss interpretiert [23]. Da bereits bekannt ist, dass es einen Zufluss zwischen dem *Dežmanov rov* und *Kittlova brezna* gibt, der den Chloridgehalt erhöht und in allen Proben der *Kittlova brezna* der Chloridgehalt bereits höher als im ersten See ist, scheint dieser Zufluss sich schon mit dem Wasser des *Dežmanov rov* vermischt zu haben. Die räumlich begrenzte Änderung der chemischen Zusammensetzung ist allerdings nur mit einem Zufluss zu erklären. Doch anhand des Chloridgehalts ist auch deutlich, dass es nicht der Zufluss zwischen dem *Dežmanov rov* und der *Kittlova brezna* sein kann, der diese Änderung in der Chemie hervorruft.

Wie auch in der restlichen Höhle sind die Phosphatkonzentrationen in den Proben recht gering, was mit den unter „6.6 Phosphatausfällung“ genannten Beobachtungen zu erklären ist.

#### 6.4.3 Diskussion

Prelovšek ist sich sicher, dass ein Zufluss zwischen dem *Dežmanov rov* und der *Kittlova brezna* in die Höhle fließt [26]. Diese These des lokalen Höhlenforschers können wir somit bestätigen.

Des Weiteren hat auch Prelovšek den Bach im kleinen Schacht untersucht, wobei auch seine Messwerte auf einen vom Hauptstrom unabhängigen Bach hindeuten [26]. Der Bach im kleinen Schacht wird somit nicht aus dem *Jezerski rov* gespeist und fließt auch nicht in den Hauptstrom der *Križna Jama*.

Der zweite Zufluss, der in die *Kittlova brezna* strömt, fließt vermutlich am nordwestlichen Ufer in die Höhle.

#### 6.5 Zuflüsse in der *Blata*

Aufgrund der geografischen Lage der Zuflüsse *Markov rov* und des unkartierten Zuflusses (siehe Abb. 1, auf der rechten Seite) zwischen *Kljuc* und *Misnica* wird vermutet, dass diese beiden Zuflüsse verbunden sind. Beide müssen zwischen der *Blata* und dem *Pisani rov* verlaufen, weshalb es wahrscheinlich ist, dass dieser Bach sich beim unkartierten Zufluss aufteilt und dann ein-

mal in die *Blata* läuft und einmal weiter zum *Markov rov* fließt. Des Weiteren ist ein Zustrom in den *Markov rov* von dem *Pisani rov* bekannt.

Der *Markov rov* enthält sehr viel Nitrat und dem unkartierten Zufluss ähnliche Chlorid- und Calciumkonzentrationen (siehe Tabelle 4). Der Nitratgehalt, des Sees 14 und des unkartierten Zuflusses liegen im für die Höhle üblichen Bereich. Die Magnesiumkonzentration des *Markov rov* liegt unter der Nachweisgrenze.

Diese anfängliche Vermutung kann anhand der Messwerte nicht bestätigt werden, da der *Markov rov* im Vergleich zu den beiden anderen Bächen kein Magnesium enthält. Außerdem kann die Nitratkonzentration des *Markov rov* nicht durch eine Mischung vom *Pisani rov* und dem unkartierten Zufluss erzielt werden.

#### 6.6 Phosphatausfällung

Auffällig an dem *Markov rov* ist der hohe Nitratgehalt, während Phosphat nicht nachweisbar ist (siehe Tab. 4). In Proben von Zuflüssen, die durch Felder an der Oberfläche fließen, ist immer Phosphat nachweisbar und die Konzentration ist deutlich höher als der Phosphatgehalt in der Höhle. Hinzu kommt, dass der Nitratgehalt außerhalb der Höhle teilweise dem Nitratgehalt des Wassers in der Höhle ähnelt (siehe Tab. 5). Außerdem treten an der Oberfläche in diesem Ge-



Tab. 5: Gegenüberstellung der Nährstoffkonzentrationen in der Höhle und außerhalb der Höhle. Die Probenentnahmestellen sind Abb. 1 und 2 zu entnehmen. Die Phosphatkonzentration der Zuläufe und der Höhle unterscheiden sich signifikant.

Gebiet	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> in mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> in mg/L
außerhalb der Höhle	0,5-5	5-16
in der Höhle	nn	5-7

biet immer hohe Nitrat- und Phosphatkonzentrationen zusammen auf.

Aufgrund dieser Beobachtung müsste auch Phosphat in der Probe vom *Markov rov* enthalten sein, wenn an dieser Stelle nährstoffreiches Wasser von der Oberfläche in die Höhle strömt. Phosphat bildet jedoch zum Beispiel mit Calcium schwerlösliche Minerale, wodurch die Phosphate des *Markov rov* möglicherweise bereits vor dem Eintritt in die *Križna Jama* aus dem Wasser ausgefällt werden. Dieser Phosphatmangel wirkt sich auf das Leben in der *Križna Jama* aus. Durch die geringe Phosphatkonzentration fehlt Lebewesen, vor allem den mikroskopisch kleinen Organismen, ein wichtiger Nährstoff.

### 6.6.1 These: Das Phosphat wird als Calciumphosphat oder Apatit ausgefällt

Zunächst wurde mit Hilfe des Löslich-

keitsprodukts der Sättigungsindex (SI) berechnet. Gemessen wurde

$$c_{Ca^{2+}} = 1 \frac{mmol}{L}$$

$$c_{PO_4^{3-}} = 0,05 \frac{mmol}{L}$$

$$pH = 7,5$$

Gegeben ist:

$$K_{LApatit} = 3,55 \cdot 10^{-55} \left( \frac{mol}{L} \right)^9$$

Damit kann berechnet werden: Formel 1 und Formel 2

Da der SI größer als 0 ist, neigt das Höhlenwasser dazu, Apatit auszufallen. Somit ist rein rechnerisch ein Ausfällen des Phosphats als Apatit wahrscheinlich. Vermutlich dient das Gestein als Kristallisationskeim und das Phosphat wird auf dem Weg von der Oberfläche zu der Höhle ausgefällt.

### 6.6.2 Experimentelle Überprüfung

$$K_{istApatit} = c_{Ca^{2+}}^5 \cdot c_{PO_4^{3-}}^3 \cdot 10^{-(14-pH)} = 3,95 \cdot 10^{-35} \left( \frac{mol}{L} \right)^9$$

Formel 1

$$SI_{Apatit} = \log \left( \frac{K_{istApatit}}{K_{LApatit}} \right) \approx 20$$

Formel 2

Um dies experimentell zu bestätigen, wurden zwei Versuche durchgeführt. In einer übersättigten alkalischen Lösung von Phosphat und Calcium konnte keine Veränderung des Phosphatgehalts nachgewiesen werden. Dadurch wird deutlich, dass zum Ausfällen des Phosphates mehr als nur eine übersättigte Lösung notwendig ist.

In einem zweiten Modellversuch wurde der Einfluss des Gesteins mit einbezogen. Eine Chromatographiesäule wurde mit einer ca. 3 cm dicken Schicht aus Calciumcarbonat befüllt. In einer Lösung, die zuvor 5 mg/L Phosphat enthielt, war nach dem Durchlaufen der Chromatographiesäule kein Phosphat mehr nachweisbar.

### 6.6.3 Diskussion

Es wird deutlich, dass das Gestein in vielfacher Hinsicht eine wichtige Rolle spielt. Zum einen können sich ausgefallene Kristalle an die raue Oberfläche des Gesteins anhaften. Das Gestein dient allerdings auch als Kristallisationskeim. Außerdem wird direkt am Gestein eine deutlich höhere Konzentration an Calcium erreicht, was das Ausfällen des Phosphats weiter begünstigt.

Diese Reaktion hat eine große, wenn auch unbekannte, Wirkung auf die Region westlich der *Križna Jama*. Der Phosphatgehalt in den oberirdischen Zuflüssen überschreitet deutlich die Richtwerte. Normalerweise eutrophiert ein Gewässer mit einem so hohen Phosphatgehalt, was jedoch mit der *Križna Jama* und dem Karst als natürliche Filter verhindert wird. Somit wird das Risiko einer Eutrophierung in den der *Križna Jama* nachfolgenden Gewässer gesenkt und diese vor der starken Überdüngung des Bloke Plateaus geschützt.

Zusätzlich trägt der Phosphatmangel vermutlich auch zu dem fehlenden mikrobiologischen Leben der *Križna Jama* bei.

## 7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die neu entwickelten Methoden wurden dem Härte-test einer Feldforschung unterzogen. Sie waren nicht nur sehr erfolgreich, sondern konnten herkömmliche Methoden ersetzen. Sie berücksichtigen den Höhlenschutz und lassen das Ökosystem der Höhle weitestgehend unberührt.

Mit unseren Untersuchungen können wir die Hydrologie der *Križna Jama* besser verstehen: Nicht nur wurde die *Križna Jama* erstmalig mikrobiologisch untersucht, mit dem Ergebnis, dass sich kein Leben in der Größenordnung von 5 µm bis 500 µm finden lässt, sondern es wird auch die These eines Zuflusses zwischen dem ersten See und *Kittlova brezna* weiter gefestigt. Gleichzeitig kann aber der Bach im kleinen Schacht südwestlich von *Kittlova brezna* als eben dieser Zufluss ausgeschlossen werden. Es zeigen sich zudem starke Indizien dafür, dass der kleine Schacht komplett isoliert von dem weiteren hydrologischen Geschehen der Höhle ist. Außerdem wird ein bisher unbekannter nährstoffreicher Zufluss in der *Kittlova brezna* vermutet.

Des Weiteren wurde mit Hilfe unserer Bojen deutlich, dass sich in den beiden langsam fließenden, langen Seen mikroskopische Zellreste absetzen und so das Wasser in der Höhle gereinigt wird. Zusätzlich fällt bereits vor der Höhle das im Wasser gelöste Phosphat aus, wodurch das Risiko einer Eutrophierung in nachfolgenden Gewässern gesenkt wird.

Es konnte kein konkreter Einfluss durch Touristen nachgewiesen werden. Der strenge Höhlenschutz der *Križna Jama* scheint zu funktionieren.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei allen, die unser Projekt unterstützt haben. Speziell möchten wir uns bei unseren Betreuern Klaus Peter Haupt und Malte Lemster bedanken, die mit uns in jede Höhle gegangen sind und uns immer wieder inspiriert und motiviert haben. Das gilt für alle Betreuer des Schülerforschungszentrums Nordhessen, die uns mit guten Denkanstößen immer wieder neue Wege aufgezeigt haben. Ohne die Unterstützung des Schülerforschungszentrums Nordhessen wäre unser Projekt nicht möglich gewesen. Ganz besonders möchten wir uns bei Mitja Prelovšek bedanken, der uns vor Ort immer wieder mit Ortskenntnissen, langer Karstforschungserfahrung und als Ansprechpartner zur Verfügung stand, uns aber immer ermöglicht hat unsere eigenen Ideen und Fragestellungen zu verfolgen. Außerdem hat uns das Karst Research Center seine Labore vor Ort zur Verfügung gestellt, was unser Projekt deutlich erleichtert hat.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Büttner, G. Wagner. Analysenmethoden, (2016). Kassel: Fachbereich Technik der Elisabeth-Knipping-Schule.
- [2] A. Rusznyak, D. M. Akob, S. Nietzsche, K. Eusterhues, K. U. Totsche, T. R. Neu, T. Frosch, J. Popp, R. Keiner, J. Geletneky, L. Katzschmann, E. Schulze, K. Küsel. (2011). Calcite Biomineralisation by bacterial isolates from the recently discovered pristine karstic Herrenberg cave. Jena: American society microbiology.
- [3] Arduino Language Reference. Abgerufen am 18.01.2019 von <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [4] B. Geric, T. Pipan, J. Mulec. (2004). Diversity of culturable bacteria and meiofauna in the epikarst of Skocjanske Jame caves (Slovenia). Ljubljana: Department of Biology, Biotechnical Faculty und Karst Research Institute ZRC SAZU.
- [5] Borchers, D. U. Validierungsdokument zu DIN 38406-32. Mülheim an der Ruhr.
- [6] D. C. Culver, B. Sket. (2012). Karstology and development challenges on karst II - Construction, tourism, ecology, protection. Ljubljana: ZRC SAZU.
- [7] Heinz Streble, D. K. (2017). Das Leben im Wassertropfen. Kosmos.
- [8] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. IEEE COMPUTER SOC.
- [9] J. Mulec, A. Oarga-Mulec, R. Tomazin, T. Matos. (2015). Characterization and fluorescence of yellow biofilms in karst caves, southwest Slovenia. Postojna: Karst research Institute, Research center of the slovenian academy of Sciences and Arts.
- [10] J. Mulec, P. Zalar, N. Zupan Hajna, M. Rupnik. (2002). SCREENING FOR CULTURABLE MICROORGANISMS FROM CAVE ENVIRONMENTS (SLOVENIA). Ljubljana: Karst Research Institute ZRC SAZU und Department of Biology.
- [11] Janez Mulec, V. Krištufek, A. Chroňáková. (2012). Comparative microbial sampling from eutrophic caves in Slovenia and Slovakia using RIDA<sup>®</sup>COUNT test kits. Tampa, Karst Research Institute, Institute of Soil Biology.
- [12] Kramer, Kausch (2017). Gewässeruntersuchungen mit dem Wasseranalyseboot - Der Natur ganz nah. Kassel.
- [13] Križna Jama. Abgerufen am 14.01.2019 von <https://krizna-jama.si/de/>
- [14] Lasha Asanidze, G. A. (2017). Geoecological Monitoring of Karst Water in Georgia, Caucasus (Case Study of Racha Limestone Massif). Tbilisi: Department of Geomorphology and Geoecology, Vakhushti Bagrationi Institute of Geograph.
- [15] M. Büttner, G. Wagner. (2015). Praktikum der analytischen Chemie - Teil 3: Quantitative Analyse. Kassel: Fachbereich Technik der Elisabeth-Knipping-Schule.
- [16] M. Büttner, G. Wagner. (2016). Praktikum der analytischen Chemie - Teil 5: Chromatographie. Kassel: Fachbereich Technik der Elisabeth-Knipping-Schule.
- [17] Markl, G. (2004). Minerale und Gesteine. München: Spektrum.
- [18] Martina Pacher, V. P. (2014). Palaeontology, Zoology and Geology alaeontology, Zoology and Geology. Wien: Österreichische Akademie der Wissenschaften.
- [19] M. Prelovšek, J. T. (2008). Hydrodynamic aspect of caves. Bologna: Karst Research Institute SRC SASA.
- [20] Oliphant, T. (2006). Guide to numpy. USA: Trelgol Publishing.
- [21] Perenthaler, T. S. (2010). Karst pools in subsurface environments: collectors of microbial diversity or temporary residence between habitat types. Zurich: Limnological Station, Institute of Plant Biology, University of Zurich.
- [22] PlatformIO - Cross-platform IDE and unified debugger. Abgerufen am 18.01.2019 von <https://platformio.org/>
- [23] M. Prelovšek. (2009). Present-day speleogenetic processes, factors and features in the epiphreatic zone. Nova Gorica: University of Nova Gorica Graduate School.
- [24] M. Prelovšek. (2013). Plan of Križna Jama and Križna Jama 2. Karst Research Center ZRC SAZU.
- [25] M. Prelovšek. (2014). The hydrogeological setting of Križna Jama. Wien: Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. akad. Wiss.
- [26] M. Prelovšek. (01.–15. Juli 2018). (Interviewer: Moritz Grumann, Leon Nitsche, Leon Kausch)
- [27] M. Prelovšek. K. (2014). The geological setting of Križna Jama. Wien: Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. akad. Wiss.
- [28] Seilnacht, T. Seilnacht. Abgerufen am 23.12.2018 von <http://www.seilnacht.com/Minerale/kreisl.htm>
- [29] Serban M. Sarbu, C. Kane, B. Kinkle (1996). A Chemoautotrophically Based Cave Ecosystem. Cincinnati: Department of biological sciences, university of cincinnati.
- [30] T. Shabarova, Widmer, Perenthaler. (2013). Mass effects meet species sorting: transformations of microbial assemblages in epiphreatic subsurface karst water pools. Zurich: Limnological Station, Institute of Plant Biology, University of Zurich.
- [31] T. Shabarova, Villiger, Morenkov, Niggemann, Dittmar, Perenthaler. (2013). Bacterial community structure and dissolved organic matter in repeatedly flooded subsurface karst water pools. Kilchberg: Limnological Station, Institute of Plant Biology, University of Zurich.
- [32] T. Shabarova, J. Perenthaler. (2009). Investigation of Bacterioplankton communities in aquatic karst pools in Bärenschacht cave of Bernese Oberland. Kilchberg: Limnological Station, Institute of Plant Biology.
- [33] Wagner, M. Büttner. (2014). Ökologie und Umweltschutz - Materialsammlung - Teil 3: Ökologie des Wassers. Kassel: Elisabeth-Knipping-Schule.
- [34] Wagner, M. Büttner. (2014). Praktikum der analytischen Chemie - Teil 1: Einführung in die Labortechniken - Teil 2: Qualitative Analyse. Kassel: Elisabeth-Knipping-Schule.
- [35] Williams, D. F. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. West Sussex: Wiley.
- [36] Y. Chen, L. Wu, R. Boden, A. Hillebrand, D. Kumaresan, H. Moussard, M. Baci, Y. Lu, J. C. Murrell. (2009). Life without light: microbial diversity and evidence of sulfur- and ammonium-based chemolithotrophy in Movile Cave. Warwick: Department of Biological Science
- [37] Simon D. Levy (13.01.2019). Abgerufen am 07.03.2019 von <https://github.com/simondlevy/BreezySLAM?files=1>
- [38] S. Erhardt, P. Hochreuther, M. Schütz (11.03.2020). Abgerufen am 23.03.2020 von [www.opentopomap.org](http://www.opentopomap.org)

# Publiziere auch Du hier!

Forschungsarbeiten von  
Schüler/Inne/n und Student/Inn/en

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

## Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

## Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

### Chefredaktion Junge Wissenschaft

Dr.-Ing. Sabine Walter  
Paul-Ducros-Straße 7  
30952 Ronnenberg  
Tel: 05109 / 561508  
Mail: [sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de](mailto:sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de)

## Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschickt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

## Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d. h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d. h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



# Richtlinien für Beiträge

Für die meisten Autor/Inn/en ist dies die erste wissenschaftliche Veröffentlichung. Die Einhaltung der folgenden Richtlinien hilft allen – den Autor/innen/en und dem Redaktionsteam

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d. h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.
- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.
- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF

ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)

- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage [www.junge-wissenschaft.ptb.de](http://www.junge-wissenschaft.ptb.de) herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.

# Impressum

[JUNGE]  
wissenschaft



## Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt (PTB)  
[www.junge-wissenschaft.ptb.de](http://www.junge-wissenschaft.ptb.de)

## Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion  
Junge Wissenschaft  
Paul-Ducros-Str. 7  
30952 Ronnenberg  
E-Mail: [sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de](mailto:sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de)  
Tel.: 05109 / 561 508

## Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,  
Pressesprecher der PTB  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
E-Mail: [jens.simon@ptb.de](mailto:jens.simon@ptb.de)  
Tel.: 0531 / 592 3006  
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

## Design & Satz

Sabine Siems  
Agentur „provieler werbung“  
E-Mail: [info@provieler-werbung.de](mailto:info@provieler-werbung.de)  
Tel.: 05307 / 939 3350

