

# Verbreitung und Tiefenlage von Unterwassertropfsteinen und Kleinformen in der Blautopfhöhle

Eckhard Hinderer, Rainer Straub und Wolfgang Ufrecht

## Zusammenfassung

Bei zahlreichen Tauchgängen und mit der Auswertung von Bild- und Filmmaterial sowie Fachliteratur wurden Kleinformen (Karren, Fließfacetten, Bodenkolke) und Unterwassertropfsteine, die in der Diskussion um Alter und Entstehung der Blautopfhöhle eine große Rolle spielen, kartiert. Die erhobenen Daten sind in einer Tabelle dokumentiert.

Fließfacetten und die hier auftretenden Sonderformen von Bodenkolke sind nicht durch vadose Fließgewässer entstanden. Lediglich Karren, Unterwassertropfsteine und reine Erosionskolke weisen auf zeitweilige Luffüllung der Höhle (Karren bis -34 m, Unterwassertropfsteine bis -5 m unter Karstwasseroberfläche). Daraus können Wasserspiegelabsenkungen gefolgert werden, die einstmals bis auf 478 mNN und damit etwa bis auf die Höhe der Talsohle in der Blaubeurer Urdonauschlinge herabreichten. Für eine Absenkung unter die Talsohle gibt es keine Belege.

Der datierte Stalagmit aus dem Äonendom zeigt, dass im Holozän der Wasserspiegel gegenüber heute noch mindestens 4 m tiefer gelegen haben muss. Der nach der Sinterbildung erfolgte Wasseraufstau bis über die Stalagmitenspitze hinaus ist auf die Aufschotterung des Urdonautals sowie auf die Eingriffe des Menschen zurückzuführen, der zur Nutzung des Wassers Stauwehre anlegte.

## 1 Einleitung

Die Vielfalt von Kleinformen – in der amerikanischen höhlenkundlichen Fachliteratur oftmals „Speleogene“ genannt – verleiht den Höhlen zusammen mit den Sinterbildungen einen variationsreichen Schmuck. Auf der Suche nach Indizien für die Rekonstruktion der Entstehungsgeschichte der Höhle sind sie zugleich aber auch wichtige Informationsquellen. Das Studium der Kleinformen ist also unverzichtbar für die speläologische Bearbeitung der Höhlen. Ungeachtet dessen werden die Formenelemente noch immer viel zu wenig beachtet und dadurch das in ihnen steckende „Potential“ außer Acht gelassen. In der Blautopfhöhle spielen die Kleinformen in der Diskussion um speläogenetische Fragestellungen seit Langem eine Rolle. So werden verschiedentlich Kleinformen bzw. Unterwasser-

tropfsteine mit der Tiefenlage der von der Urdonau geformten Felssohle in der Blaubeurer Talschlinge in Verbindung gebracht (BARTH et al. o.J., HASENMAYER 1986a, b, c). Bisher liegen jedoch nur Einzelbeobachtungen ohne systematische Auswertung vor. Um den Formenschatz des Felsreliefs als aussagekräftige Elemente für Fragen der Höhlenentstehung heranziehen zu können, wurde in den letzten Jahren von der Arge Blautopf vermehrt Augenmerk auf die Kleinformen gelegt und eine systematische Erfassung angestrebt. Ihre Kartierung während zahlreicher Tauchgänge umfasst die Beschreibung von Lage und Tiefe unter der heutigen Karstwasseroberfläche sowie die fotografische Dokumentation.

An Formenelementen wurden aufgenommen: Fließfacetten, Bodenkolke und Karren (nach HASENMAYER Tropfwasserrinnen).

---

**Anschriften der Verfasser:** ECKHARD HINDERER, Höhenblick 16, 89155 Erbach-Bach; RAINER STRAUB, Uhuweg 7, 70794 Filderstadt; Prof. Dr. WOLFGANG UFRECHT, Kaiserstr. 45, 70599 Stuttgart; alle Arge Blautopf.

Hinsichtlich der Rekonstruktion fossiler Karstwasserstände sind Tropfsteinbildungen von Bedeutung, die heute unterhalb der Karstwasseroberfläche liegen („Unterwassertropfsteine“). Die Kartierungen wurden ergänzt durch Auswertung von umfangreichem Bild- und Filmmaterial sowie von verschiedenen Veröffentlichungen über das Blauhöhlensystem (ARGE BLAUTOPF 2009, BARTH et al. o.J., BOHNERT 2002, HASENMAYER 1986 a, b, c, SCHOPPER & KÜCHA 2007, KÜCHA et al. 2009). Die Ergebnisse der Kartierung und Erhebung sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Kleinformen werden oft als Leitelemente für phreatische oder vadosa Raumbildung bzw. -erweiterung angesehen. Hinsichtlich der Wasserführung der Höhlenräume wird zu meist eine statische Betrachtung zugrunde gelegt. So erfolgt eine einfache Untergliederung in phreatisches bzw. vadoses, also vollständig wassererfülltes bzw. nur teilweise wassererfülltes oder wasserfreies Bildungsmilieu, wobei „phreatisch“ und „vados“ als starre Entwicklungsstadien gesehen werden. Dabei bleibt außer Acht, dass sich der Zustand der Wassererfüllung nicht nur schleichend in einer Richtung verändert, d.h. mit der Tieferlegung einer Karstwasseroberfläche durch fortschreitende Verkarstung, sondern episodische bzw. saisonale Hochwasserereignisse sehr rasche Wechsel zwischen phreatischem und vadosem Zustand im gleichen Niveau verursachen.

Zudem wird der Zustand der Wassererfüllung eines Raums mit einem charakteristischen Fließverhalten verbunden, d.h. der phreatische Zustand mit laminarem und der vadosa Zustand mit turbulentem Fließen. Gerade diese einfache Korrelation liegt in der Natur nicht vor. Tatsächlich ist das Fließverhalten weniger statisch, wie es durch die Gliederung zum Ausdruck kommt. So können vor allem im Schwankungsbereich der Karstwasseroberfläche in direkter Folge auf Hochwasserereignisse Höhlenabschnitte immer wieder geflutet werden. Hier, aber auch im dauerhaft wassererfüllten Bereich (phreatische Zone) strömt das Wasser durchaus auch turbulent und mit hoher Geschwindigkeit.

## 2 Kartierergebnisse

Die Ergebnisse der Kartierung der Kleinformen und Unterwassertropfsteine sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Sie sind mit Signaturen nach Tiefenlage unter der rezenten Karstwasseroberfläche und nach der Entfernung vom Blautopf (bis 1850 m) eingetragen. Mit Farben ist die Sicherheit der Formenansprache markiert. Insgesamt wurden an 42 Stellen in der Höhle Kleinformen bzw. Unterwassertropfsteine festgestellt. Häufig überlagern sich verschiedene Formen an einer Stelle. Es konnten 8-mal Bodenkolke, je 18-mal Unterwassertropfsteine und Karren sowie 10-mal Fließfacetten erfasst werden. Generell verteilen sich die Elemente auf Tiefen von weniger als 27 m unterhalb der Karstwasseroberfläche. Nur zwischen Kolkschwelle und dem Beginn des Bunkers reichen sie bis auf 32 bis 34 m Tiefe herab. In einem Fall sind Bildungen, die als Übergangsformen von Fließfacetten zu Kolken angesehen werden, in einer Tiefe von 39 m angetroffen worden. Die Tiefenangaben beziehen sich auf die Karstwasseroberfläche, die auf das Wehr am Blautopf auf 512 mNN eingestellt ist und in die Höhle ohne Gradient hineinprojiziert wird.

### 2.1 Fließfacetten

Fließfacetten sind bis 860 m vom Eingang und in Tiefen von 4 bis 33 m festzustellen. Die mittlere Tiefenverbreitung liegt bei 14 bis 23 m (zwischen 450 m Kartoffeldüse und 860 m Flaschenhals). Die Extremwerte treten in einem Seitengang der Scooterklamm (4 m unter Wasserspiegel) und im Eingangsbereich in der Karrenschlucht (31-33 m) auf. In der Höhle sind die Fließfacetten weit verbreitet und kommen großflächig an Boden, Wand und Decke (z.B. Flaschenhals) vor. Sie sind sehr häufig mit Bodenkolken vergesellschaftet und stehen mit diesen als deren „Vorläufer“ wohl auch in genetischem Zusammenhang (vgl. Kap. 2.3).

Die Fließfacetten zeigen in der Blautopfhöhle unterschiedliche Größe. Sie sind im Mittel um 3 bis 4 cm lang, erreichen aber auch im Einzelfall bis 8 cm. Sieht man die Formen am Fuß des Kolkbachbetts als Fließfacetten, dann können Längen bis 15 cm genannt werden.

	Topf	Düse	Zwillingsgänge				Kolschwelle				Karrenschlucht	Beginn Bunker	Ende Bunker				Lift	Donauhalle			
WT	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	
1																					
2																					
3																					
4																					
5		KA																			
6		KA																			
7		KA																			
2		KA																			
9		KA																			
10		KA																			
11		KA																			
12		KA																			
13		KA																			
14		KA																			
15			KA																		
16			KA																		
17			KA																		
18			KA																		
19			KA																		
20				MG																	
21																					
22																					
23				MG																	
24																					
25																					
26					MG																
27																					
28						KO															
29																					
30								FF													
31								KO													
32									KO	KO											
33											FF										
34											KA	KA									
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
40																					

FF = Fließfacetten  
 KA = Karren  
 KO = Kolk  
 MG = massiver Fels-Grund  
 MG = Gesichert kein massiver Fels-Grund  
 MP = Messpunkt  
 TG = Tauchgang  
 TS = Tropfstein  
 WT = Wassertiefe  
  
 Grün = Gesicherte Erkenntnis  
 Blau = Wahrscheinliche Erkenntnis  
 Rot = Unsicher

Tab. 1: Tabellarische Darstellung der Verbreitung von Kleinformen und Unterwassertropfsteinen in der Blautopfhöhle. (Waagrechte Achse: Entfernung vom Eingang in Meter, senkrechte Achse: Tiefe in Meter unter der rezenten Karstwasseroberfläche). WT: Wassertiefe. Die dickere Linie bei 34 m Wassertiefe entspricht höhenmäßig der Talsohle in der Blaubeurer Schlinge.

		Scooterseitengang		Kirchentreppe		Wolkenschloß		Kartoffeldüse		Fallgrube		Felsgraben		Riss		Krokodil		Hohle Gasse					
WT		300		450		550	560	570		610		670	680	690		730		780	790	800	810	820	
1						TS																	
2																							
3																							
4		FF																					
5																							
6																							
7																							
2																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14				FF																			
15																							
16																							
17								KO															
18								KO												FF			
19								KO										KA	KO	KO	KO		
20								FF									FF						
21																							
22														KA									
23												KA											
24												FF											
25															KA								
26											KA												
27																							
28										KA													
29																							
30																							
31																							
32																							
33																							
34																							
35																							
36																							
37																							
38																							
39																							
40																							

	Flaschenhals		Ziege		Kurz vor Mörike- dom		Mörike- dom		Dekostelle JH im Mörike- dom		Mittelschiff	
WT	860	1010	1080	1090	1100	1170	1210	1220	1230	1240	1250	1300
							TS				TS	TS
1												TS
2												TS
3												
4									TS			
5						TS						
6												
7												
2												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16	FF		KA									
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												

					Beginn Anendom		Abzweig z. Speleo.- Weg				Im Speleonautenweg			Brunnenschacht		Stirnhöhlengang		
WT		1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380		1420		1550	1560		1750		1800
1																		
2								TS										
3					TS				TS									
4				TS														
5																		
6																		
7																		
2																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13											KO							
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20													KO					
21																		
22																		
23																		TS
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
33																		
34																		
35																		
36																		
37																		
38																		
39																		
40																		

Im Massenkalk zeigen sie nur selten die typische asymmetrische Form mit steilem Abfall an der oberstromigen Kante der Hohlform und allmählichem Anstieg nach außen. Viele Facettenbildungen überlagern sich zudem, so dass aus ihrer nur schwer ersichtlichen Geometrie selten eine Fließrichtung ableitbar ist. In den Fällen, wo die Form der Facetten gut ausgeprägt ist, ergibt sich eine höhlenauswärts gerichtete Fließrichtung. Lediglich an den großen Facetten am Fuß des Kolkbachbetts wäre eine Fließrichtung etwa senkrecht dazu ableitbar.

Die Facetten an der Decke des Flaschenhalses zeigen nur geringe Eintiefung der Hohlkehle und nur aus der Wand herausragende Grate. SLABE (1995) bildet derartige Facetten ab und deutet ihre Form in Abhängigkeit von der Textur des Gesteins. Im slowenischen Karst fand er derartige Formen auf bioklastischem Gestein oder grobspätigem Dolomit. Beides tritt auch in den massig ausgebildeten Oberjurakalken der Schwäbischen Alb häufig auf.



Abb. 1 (links): Fließfacetten an der Decke des Flaschenhalses (860 m vom Eingang entfernt) in 16 m Tiefe unter dem Wasserspiegel. Aufn.: ARGE BLAUTOPF, HENNING MEZGER.  
Abb. 2 (rechts): Fließfacetten und Ansätze von Kolken in der Hohlen Gasse. Aufn. ARGE BLAUTOPF, HENNING MEZGER.

R. L. CURL hat sich intensiv mit der Morphologie und Genese der Fließfacetten auseinandergesetzt. Er sieht deren Entstehung durch turbulentes Druckfließen, bei dem der Kalkstein vor allem chemisch gelöst, nachrangig aber auch mechanisch überformt wird (BLUMBERG & CURL 1974). Innerhalb der phreatischen Zone herrschen turbulente Strömung und höhere Fließgeschwindigkeiten während eines Hochwasserereignisses. LAURITZEN et al. (1985) vermuten, dass die aus Fließfacetten abgeleiteten Strömungsgeschwindigkeiten nur kurzzeitigen Hochwasserbedingungen entsprechen. Seit CURL wird das Längen- und Breitenverhältnis der Facetten als Maß für die Fließgeschwindigkeit herangezogen, die zur Entstehung der Form geführt hat. Dabei bilden geringe Fließgeschwindigkeiten große Facetten (SLABE 1995 beschreibt 15-40 cm lange Facetten, die unter Geschwindigkeiten von 5-20 cm/s entstanden sein sollen)

und hohe Geschwindigkeiten kleine Facetten. PALMER (2007) vermutet, dass erosive Überformung der Facetten durch transportiertes Sediment erst ab Strömungsgeschwindigkeiten von größer 3 m/s einsetzt. Geht man mit der für die Blautopfhöhle bestimmten mittleren Facettenlänge von 4 cm in das Diagramm von CURL (1974), so liest man bei einem Raumdurchmesser von ca. 5 m eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 0,85 m/s ab. Nimmt man diesen Wert und einen mittleren Fließquerschnitt von 25 m<sup>2</sup>, so folgt nach dem DARCY-Gesetz ( $Q = V \times A$ , mit  $V$  = Fließgeschwindigkeit,  $A$  = Raumquerschnitt) überschlägig eine Quellschüttung von 21 m<sup>3</sup>/s, die zur Zeit der Facettenbildung geherrscht haben mag. Das entspricht im Vergleich zum heutigen Schüttungsverhalten Hochwasserbedingungen (HQ: 1956 – 1972 = 26,2 m<sup>3</sup>/s; VILLINGER 1978).

## 2.2 Karren

Karren werden bis 1080 m Entfernung vom Blautopf („Ziege“) festgestellt. Sie konzentrieren sich auf 19 bis 28 m Wassertiefe. Nur in der Karrenschlucht kommen sie von 32 bis 34 m unter dem Wasserspiegel vor. In der Höhle haben die Karren gleichbleibende Durchmesser von 2 bis 3 cm und verlaufen auf steil geneigter oder senkrechter Wandfläche. Ihre Ränder sind spitz und erscheinen scharfkantig.



Abb. 3: Rillenkarren in der Karrenschlucht zwischen 32 und 34 m Wassertiefe. Aufn.: ARGE BLAUTOPF, SALVATORE BUSCHE.

Im Blautopftrichter selbst sind an der westlichen Felswand im Abstand von ca. 1-2 m vier Rinnen mit Durchmessern von jeweils bis zu 10 cm aufgefunden worden, die bis 14 m Wassertiefe reichen. An der westlichen Seite des Topfes verlaufen die beiden größten Karren mit 35 x 45 cm und 100 x 105 cm Durchmesser. Sie sind bis 19 m unter den Wasserspiegel verfolgbar, also bis knapp vor die Düse. Aber auch auf der nördlichen und südlichen Seite befinden sich Karren mit Durchmessern um die

15 cm. Einige Karren in weniger als 6 m Wassertiefe sind undeutlich ausgebildet, ca. 10 cm breit und nur wenige Zentimeter tief.



Abb. 4: Karre an der südwestlichen Felswand des Blautopfs. Aufn. ARGE BLAUTOPF, MICHAEL SCHOPPER.

In Form und Aussehen sind die Karren der Blautopfhöhle, die von HASENMAYER als „Tropfwasserrinnen“ bezeichnet werden, den Rillenkarren gleichzusetzen. Diese entstehen auf der Erdoberfläche durch Korrosion über nackter Kalksteinoberfläche durch darauf ablaufendes Tropfwasser bzw. Rinnal. Ihre Bildung setzt also luffterfüllte Hohlräume voraus. Bei der Karrenschlucht fällt auf, dass über den Karren Spalten bzw. Schächte in die Höhe ziehen und möglicherweise von der Erdoberfläche aus Tropfwasser der Wandoberfläche zuführten. Auch im Blautopf selbst sind die großen Karrenrundungen an den West- und Nordseiten des Kessel auf Wasser zurückzuführen, das hangabwärts auf den Trichter zuffloss und bei Erreichen der Felswand Rillen herauslöste. Die großen Karren an der Westseite könnten auch auf einen Zufluss vom Galgental hinweisen. An der Einmündung des Seitentals hat sich ein Schuttfächer in die Blaubeurer Urdonau-Schlinge hinein verlagert, der zum einen das Bett der Ach nach Osten Richtung Rucken verschob und gleichzeitig durch sein Gefälle nach Norden und Nordosten Wasser aus dem Galgental in Richtung Blautopf geführt haben mag. Die in der Blaubeurer Schlinge mit den Karren höhenmäßig zusammenfallenden Flusssedimente gehören nach der terrassenstratigraphischen Gliederung in die letzte Kaltzeit, d.h. in das Würm-Glazial. In dieser Zeit kam es zu verstärkter Frostschuttbildung und während Auftauperioden hat Schmelzwasser den Solifluktionsschutt



aus dem Galgental in die Blaubeurer Schlinge transportiert. Dabei ist auch Wasser in den Blautopf eingeflossen. So hat dieser wahrscheinlich zumindest zeitweise als Ponor gewirkt. Dies war möglich, weil der Karstwasserspiegel tief lag, da während des Dauerfrosts auf der Karsthochfläche die Grundwasserneubildung stark eingeschränkt war. Die Zufuhr des Wassers in den Blautopf hat sicherlich zu keinem Anstieg der Karstwasseroberfläche geführt, da das Karstsystem zu diesem Zeitpunkt ja schon voll entwickelt war und das zufließende Wasser unterirdisch leicht abführen konnte.

In der Höhle sind auch Karren zu beobachten, die an der Wand an einer Schichtfläche beginnen und von dort aus senkrecht nach unten ziehen (z.B. „Felsgraben“). Offensichtlich trat Wasser aus der Schichtfläche aus und sickerte dann an der Wand ab.

Dieser Abfluss muss nicht dauerhaft vorhanden gewesen sein. So ist es denkbar, dass während Hochwasserphasen Wasser in das Gebirge hineingepresst wird und nach Abklingen des Hochwassers geben die Klüfte und Schichtflächen das zwischengespeicherte Wasser an die Höhle ab, solange bis der Speicher leergelaufen ist. In diesem Fall entstehen die Karren nur episodisch im Nachgang zu Hochwässern (FILIPPONI 2007).

Da in der Karrenschlucht die tiefsten Karren bis auf 34 m unter der heutigen Karstwasseroberfläche vorkommen, liefern sie ein Maß, bis zu welcher Tiefe die Blautopfhöhle zeitweise luffertfüllt war. Die Tiefenlage entspricht etwa der Felssohle in der Blaubeurer Schlinge der Urdonau, die in der Bohrung „Kindergarten“ bei 478,7 mNN erreicht wurde (ELLWANGER et al. 2009).

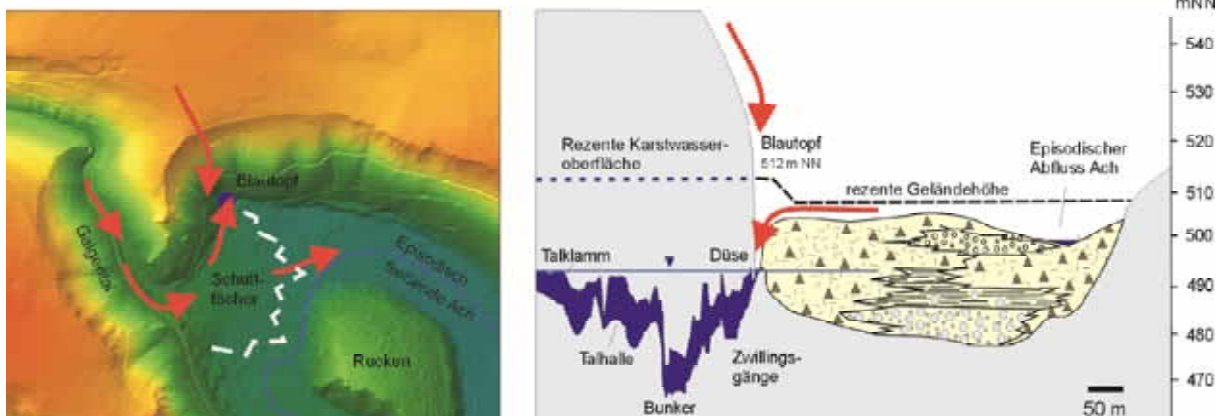


Abb. 5: Für die Entstehung der Karren im Blautopfrichter – vermutlich während des Würmglazials – kommt Schmelzwasser aus den umliegenden Hangbereichen in Frage oder Wasser, das episodisch über das Galgental in die Blaubeurer Talschlinge floss. Dabei hat der sich im Digitalen Höhenmodell (Zeichnung THOMAS WIEGAND) abzeichnende Schuttfächer einen Teil des Wassers Richtung Blautopf gelenkt, gleichzeitig aber auch die Ach Richtung Rücken abgedrängt. DGM-Daten: Copyright Landesvermessungsamt Baden-Württemberg vom 08.11.2004, Az.: 2851.2-D/2168.

### 2.3 Bodenkolke

Gruppen von Bodenkolken treten ab 70 m bis 120 m Entfernung vom Blautopf (Kolkchwelle), bei 570 m (Kartoffeldüse), bei 780 bis 800 m (Hohle Gasse), bei 1420 m (Speleonautenweg), bei 1550 m (Brunnenschacht, Tiefe der Kolke bis 1 m) sowie bei 1750 m auf. Sie befinden sich in 14 bis 20 m Tiefe unter dem Karstwasserspiegel. Lediglich die Vorkommen an der Kolkchwelle reichen von 28 bis 32 m Tiefe (484 bis 480 mNN) herab.

In der Höhle kommen neben einigen runden, stark erosiv geprägten Kolken, die bis 1 m Tiefe und 40 cm Durchmesser erreichen (Stirnhöhlengang, 25 m Wassertiefe) vor allem anders geformte Kolke vor, die eine komplexere Entstehungsgeschichte haben. Diese werden wie folgt charakterisiert:

- Sie kommen überwiegend an der Felssohle, aber auch an simsartigen Wandvorsprüngen vor.
- Die Durchmesser betragen zwischen 10 und 25 cm, Kolke bei der Düse

- haben Durchmesser zwischen 39 und 44 cm. Die Tiefe der Kolke erreicht weniger als 15 cm.
- Die Grundform ist überwiegend nicht kreisrund, sondern oval bis elliptisch; manche Kolke haben Kanten bzw. Ecken, meist an Klüften angelegt. Manche sind durch gerade Wandflächen (Kluft) an einer Seite begrenzt (asymmetrische Grundform).
- Die Wand- und Sohlflächen der Kolke sind eher rau als glatt. Viele Kolke sind innen mit Facetten überzogen, die sich nicht von den umgebenden Felsflächen unterscheiden. Häufig kommen die Kolke nicht isoliert im Fels vor, sondern überlappen sich bzw. werden durch Kolke mit größerem Durchmesser vereinnahmt.
- Sich überlappende Kolke sind entlang der Überschneidungsflächen scharfkantig und zeigen keine Spuren erosiver Überprägung.
- Der Felsgrund, in den die Kolke eingetieft sind, ist rau, strukturiert und uneben, keinesfalls erosiv geglättet.
- Einige Kolke, z.B. am so genannten Bachbett, sind an Klüften linear hintereinander aufgereiht, d.h. an einer Leitkluft orientiert.
- Die Kolke sind vereinzelt mit Geröllen verfüllt.

Daraus sind Eigenschaften ersichtlich, die in der Summe eine Bildung durch fluviatile Erosion ausschließen.

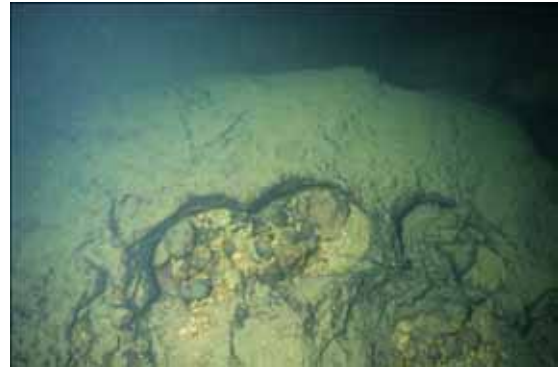


Abb. 6: Kolke mit Geröll. Aufn.: ARGE BLAUTOPF, ANDREAS KÜCHA.

Wie sind aber dann die Kolke entstanden? Den Schlüssel zum Verständnis ihrer Entstehung liefern ovale Einmuldungen in der Felssohle mit ca. 10 bis 15 cm Durchmesser und weniger als 10 cm Tiefe, die ECKHARD HINDERER bei einem Tauchgang im Juli 2009 direkt nach der Schwelle, die zum Bunker führt, in 39 m Tiefe entdeckte (Abb. 7). Die Überlappung der Einzelformen sowie der relativ große Durchmesser bis 15 cm gegenüber der geringen Tiefe von wenigen Zentimetern lässt vermuten, dass es sich hierbei um überprägte Fließfacetten handelt, zumal diese im weiten Umfeld den Fels überziehen. Sie werden als Übergangsformen verstanden, aus denen sich letztlich Bodenkolke fortentwickeln. Bodenkolke in der Ausprägung, wie sie in der Blautopfhöhle überwiegend vorkommen, sind demnach zumindest in ihrem frühen Bildungsstadium maßgeblich unter (epi)phreatischen Bedingungen, d.h. unter Druckströmung und chemischer Lösung, entstanden.

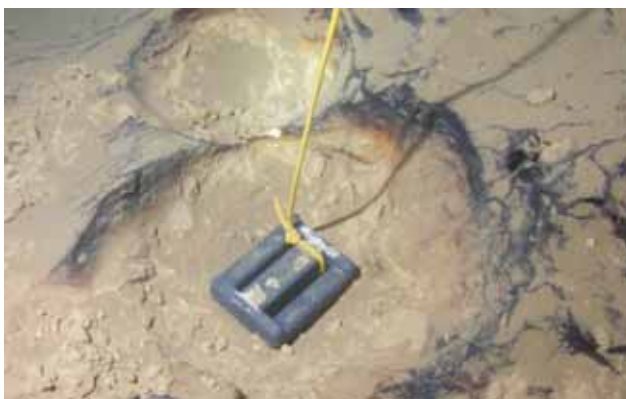


Abb. 7: Ovale und sich überlappende Eintiefungen im Bunker bei 39 m Wassertiefe. Sie werden als Übergangsformen von Fließfacetten zu Bodenkolken gesehen. Aufn.: ARGE BLAUTOPF, SALVATORE BUSCHE. Die Länge des Bleigewichts beträgt 7 cm.

Nachträgliche erosive Überprägungen, vor allem durch mitgeführtes Geröll, kann im Einzelnen nicht ausgeschlossen werden, obwohl die Gesamtgestalt und Oberfläche der Kolke wenig für mechanische Formung spricht

PALMER (2007) und SLABE (1995) sehen Kolke einerseits als vadose Form, entstanden unter Freispiegelgefälle am Grund von Schächten, Wasserfällen usw. Sie heben jedoch auch die Entstehung in der epiphreatischer Zone hervor, wo Wasser unter hohem Wasserdruck in überfluteten Gängen turbulent strömt. Aus diesem Grund können Kolke auch in bergaufwärts gerichteten Passagen entstehen. Bodenkolke sind also nicht zwingend ein Indiz für einen Bachlauf, wie dies z.B. von HASENMAYER (1986c) für die Blautopfhöhle vermutet wird (daher der Name „Kolkbachbett“). In der Konsequenz ist aus der vertikalen Verbreitung der Kolke in der Blautopfhöhle keine Mindest-Absenkung des Karstwasserspiegels innerhalb der Höhle abzuleiten.

Aus zahlreichen Beobachtungen in der Blautopfhöhle (belegt in den Abbildungen 9, 10 und 11) – insbesondere aber im Bereich des „Kolkbachbetts“ – kann für Kolke folgendes Entwicklungsschema gefolgert werden. Die einzelnen Schritte sind in Abb. 8-1 bis 8-5 stark abstrahiert dargestellt: Die Entwicklung von Kolken setzt an den Stellen ein, wo Wirbelbildung durch das Wasser möglich ist. Das können unebene Felsoberflächen, Kluftausbisse oder aber auch Fließfacetten sein (Abb. 8-1), die ja selbst durch turbulent fließendes Wasser entstehen. Besonders ausgetiefte Facetten können der Ausgangspunkt für die Fortentwicklung zu Kolken darstellen, die zunächst isoliert auf den Felsoberflächen verteilt sind (Abb. 8-2). Die Bodenkolke sind häufig an Klüfte gebunden bzw. durch Klüfte begrenzt und an diesen auch linear angeordnet. Daher kommen spitzovale Formen und ganz selten runde Formen zustande. Einer solchen Bindung an Klüfte ist in der Literatur bislang wenig Beachtung geschenkt worden. Sie ist aber eigentlich plausibel, da turbulent fließendes Wasser (und mitgeführte Sedimentfracht) an solchen Grenzflächen „anhaken“ und den Fels eintiefen kann. Sofern sich die

an Klüften hintereinander aufgereihten Kolke im Zuge des weiteren „Wachstums“ mehr und mehr überlappen und die Kolk-ränder entfernen, entwickeln sich längs-gestreckte rinnenähnliche Hohlformen. Im Unterschied zur erosiv entstandenen Rinne ist aber die Sohle der Hohlform reliefiert, rau und kantig und auch Grate in den Überlappungszonen der Kolke sind erhalten geblieben (Abb. 8-3 und 8-4).

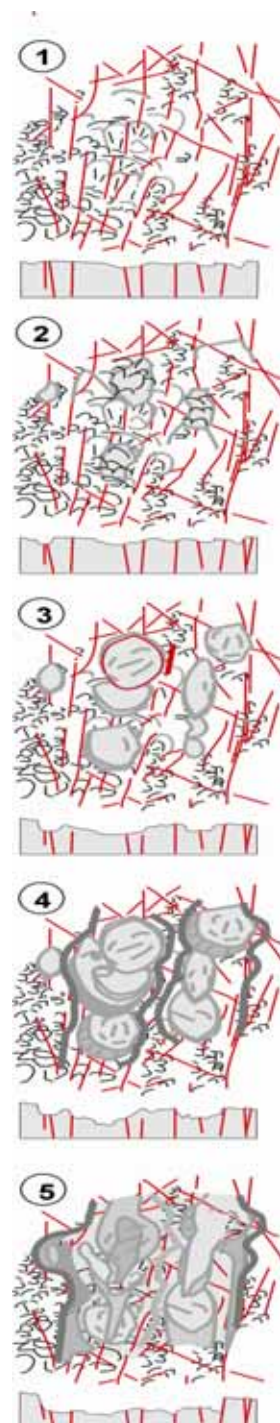


Abb. 8, Bild 1 bis 5: Schematisierte und abstrahierte Entwicklung von Bodenkolken und Bodenrinnen aus Fließfacetten, anhand der Befunde aus der Blautopfhöhle. Rote Linien = Klüfte



Abb 9: Fotodokumentation des Kolkbachbetts in der Blautopfhöhle. Einzelaufnahmen: HENNING MEZGER, Fotomontage: MICHAEL SCHOPPER.

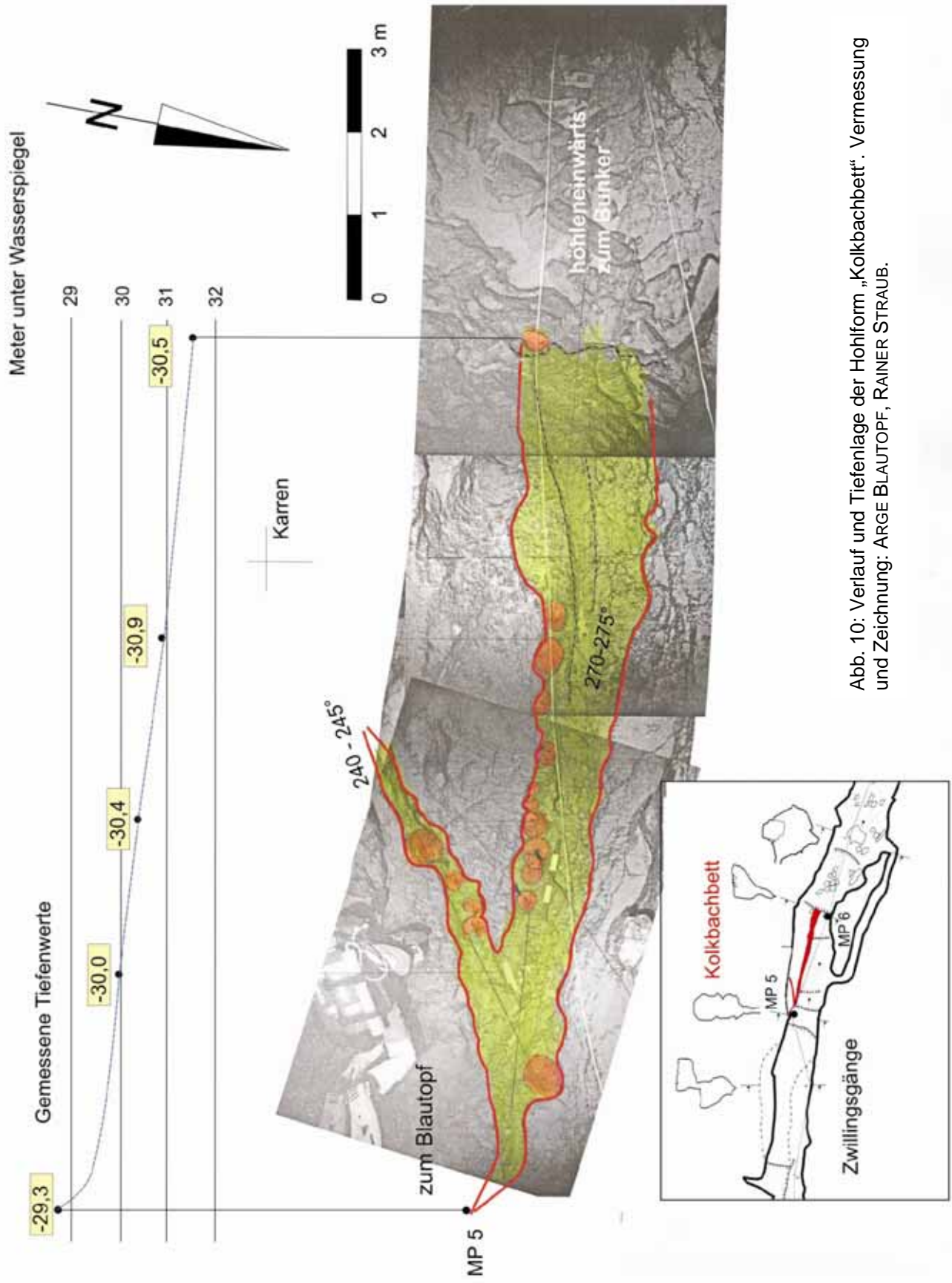


Abb. 10: Verlauf und Tiefenlage der Hohform „Kolkbachbett“. Vermessung und Zeichnung: ARGE BLAUTOPF, RAINER STRAUB.

Der Verlauf der Hohlform ist häufig klufftgebunden. Ihre Wände werden von Kluffflächen gebildet. Deshalb ist auch der Querschnitt der Hohlform nicht konvex oder U-förmig, sondern trapezförmig oder rechteckig mit einer klaren Kante zwischen Wand- und Sohlfläche. Auch dies ist ein

Indiz gegen erosive Entstehung. In einem finalen Stadium können mehrerer nebeneinander verlaufende Hohlformen durch laterale Ausweitung „zusammenwachsen“ und eine „Großrinne“ bilden (Abb. 8-5).

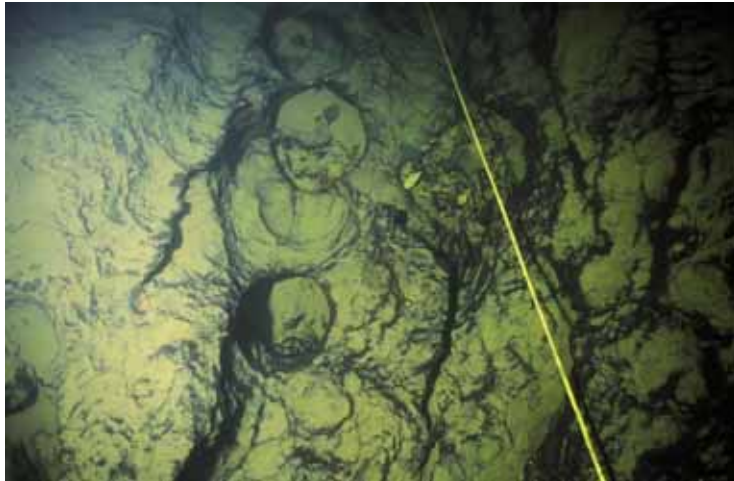


Abb. 11: Linear an einer Kluft aufgereihte Bodenkolke. Die Kolke überlappen sich und zeigen unterschiedliche Eintiefung. Die Kolkreihe wird von zahlreichen Kleinkolken sowie Fließfacetten benachbart. Aufn. ARGE BLAUTOPF, ANDREAS KÜCHA.

Als Produkt dieser Entwicklungsreihe kann auch das von JOCHEN HASENMAYER beschriebene „Kolkbachbett“ (BARTH et al. O.J.) verstanden werden. Es beginnt mit einer Breite von wenigen Zentimetern am Messpunkt MP 5 (Vermessung Arge Blautopf) 100 m vom Blautopf entfernt in 29 m Tiefe direkt am Fuß der Felswand. Auf den folgenden 11 m weitet sich die Hohlform auf 1,8 m Breite, bis sie an einer Kante (in 31,5 m Wassertiefe) mehr oder weniger senkrecht abbricht (Abb. 10). Das mittlere Gefälle der Felssohle beträgt ca. 6°. Der Verlauf ist genau von Osten nach Westen gerichtet. Nach etwa 1 m Entfernung von MP 5 zweigt eine kleinere längsgestreckte Hohlform nach SW ab, deren Sohle ebenfalls mit Kolken überzogen ist.

Das bis zu 1,8 m breite Kolkbachbett zeigt zentral eine kastenförmige 30 cm breite und ca. 15 cm tiefe Einkerbung. Die senkrecht stehenden Wände konvergieren oft mit Kluffflächen. Die Wände haben zum Felsboden eine deutliche Kante. Beide Flächen sind scharfkantig und rau. Wand und Sohle als auch die darin eingetieften Rinnen und Kolke sind mit Fließfacetten überzogen. Viele der einzelnen Hohlformen häufen sich an Klüften. Die Kolke und Rinnen sind strukturiert und nicht abgeschliffen. An den

Wänden sind vereinzelt Kolke seitlich angeschnitten.

Diese Befunde lassen zweifellos eine mehrphasige Entstehung vermuten, wobei jedoch Gerinnebildung infolge fluviatiler erosiver Formung ohne Bedeutung ist. Daher ist auch die Bezeichnung „Kolkbachbett“ irreführend. Erosive Prozesse hätten nicht nur die Felsoberfläche geglättet bzw. die herausstehenden Felskanten und -grate unduliert, sondern auch am bergewärtigen Absatz die Felskante abgeschliffen und am Fuße der mehrere Meter tiefen Stufe einen tiefen Bodenkolk heraus modelliert (wie z.B. in der Wasserfallstrecke der Falkensteiner Höhle oder auch im Tauchers Wandelsgang in der Wulfbachquellhöhle).

## 2.4 Unterwassertropfsteine

Beim Tropfsteinschmuck sind nur die unter dem Wasserspiegel befindlichen Bildungen von Bedeutung. Solche Unterwassertropfsteine treten vor allem ab 1170 m bis 1380 m Entfernung vom Eingang, d.h. zwischen Mörrike- und Äonendom, auf. Es sind Stalagmiten, aber auch Wandversinterungen (Sinterrippen), die heute in Wassertiefen von 1 bis 4 m zu finden sind. Der ursprünglich als Deckentropfstein angese-

hene „Elefantenfuß“ in 1010 m Entfernung vom Blautopf und 10 m Wassertiefe (SCHOPPER & KÜCHA 2007) wird heute als Felsform betrachtet. HASENMAYER erwähnt in seinen Vorträgen bei 1800 m einen ankorrodierten Tropfstein („Schwarzer Kamin“), der bis in 22 m Wassertiefe hinabreichen soll. Nach den von dort gezeigten Super-8-Aufnahmen (z.B. Vortrag HASENMAYER 17.01.08 Oberdischingen) ist die Ansprache als Tropfstein jedoch sehr unsicher. Genauso könnte es sich hier um eine Felsform handeln. Die Arge Blautopf hat den „Schwarze Kamin“ vor Ort noch nicht gesehen, da sie diesen Höhlenabschnitt absprachegemäß nicht betaut.



Abb. 12: Stalaktiten und Tropfsteinrippen im Zugangsbereich zum Mörikedom. Die Sinterbildungen reichen hier etwa vier Meter unter den Karstwasserspiegel hinab. Aufn.: ARGE BLAUTOPF, HENNING MEZGER.

Selbst wenn man den „Schwarzen Kamin“ mitberücksichtigt, reichen die Sinterbildungen nicht unter 22 m Wassertiefe (d.h. 490 mNN) hinab. Sie liegen damit deutlich über der Sohle der Urdonau in der Blaubeurer Talschlinge.

Ein im Äonendom von ANDREAS KÜCHA und JOCHEN MALMANN geborgener 86 cm langer Stalagmit, dessen Sockel sich 4 m unter

dem Wasserspiegel (508 mNN) befand, wurde von WACKERBARTH et al. (2009) auf ein Wachstumsalter von 8.943 bis 4.165 Jahren datiert. Der letzte Datierungspunkt liegt ca. 5 cm unterhalb der Tropfsteinspitze. Interpoliert man mit der mittleren Wachstumsrate, dann ist der Stalagmit tatsächlich bis vor ca. 3.600 Jahren gewachsen. Da dies nicht unterhalb des Wasserspiegels geschehen sein kann, liefert das ermittelte Alter den Zeitraum, in dem die Höhle noch nicht vollständig geflutet war. Die Flutung über die Stalagmitenspitze hinaus kann also frühestens vor ca. 3.600 Jahren erfolgt sein. Zu einem hohen Anteil geht der Aufstau des Wasserspiegels ab dem Sockel des Stalagmits auf den neuzeitlichen Einfluss des Menschen zurück, der das Wasser des Blautopfs und dessen Abfluss seit altersher nutzte, sei es zum Antrieb von Mühlrädern oder von Turbinen für die Energiegewinnung. Abb. 13 zeigt die eingemessenen Stauhöhen des Blautopfs und der Blau an mehreren Wehren. Hier geht der Wasserspiegel stufenweise von 512 auf 508,3 mNN herab.

Sollte es sich beim „Schwarzen Kamin“ tatsächlich um einen Tropfstein handeln, so muss dieser noch vor der Aufschotterung des Urdonautals und des damit verbundenen Aufstaus des Karstwassers gewachsen sein. Die Tiefenlage des Sinters von ca. 490 mNN korreliert höhenmäßig mit letztinterglazialen Sedimenten (terrassenstratigraphische Einstufung), die in der Blaubeurer Talschlinge etwa ab 485 mNN einsetzen. Der „Schwarze Kamin“ kann also bis in das Riss-Würm-Interglazial (Eem) hinein gewachsen sein.

### 3 Folgerungen

Ziel der Kartierung von Kleinformen und Unterwassertropfsteinen in der Blautopfhöhle ist die Rekonstruktion, bis zu welcher Tiefe die rezent wassererfüllte Höhle in der Vergangenheit zeitweise luffertfüllt war. Als sichere und unstrittige Marker kommen hierfür Unterwassertropfsteine in Frage. Sie sind bis 5 m unter der rezenten Karstwasser Oberfläche nachgewiesen. Sofern die Ansprache des „Schwarzen Kamins“ als Sinter akzeptiert wird, sind es 22 m.

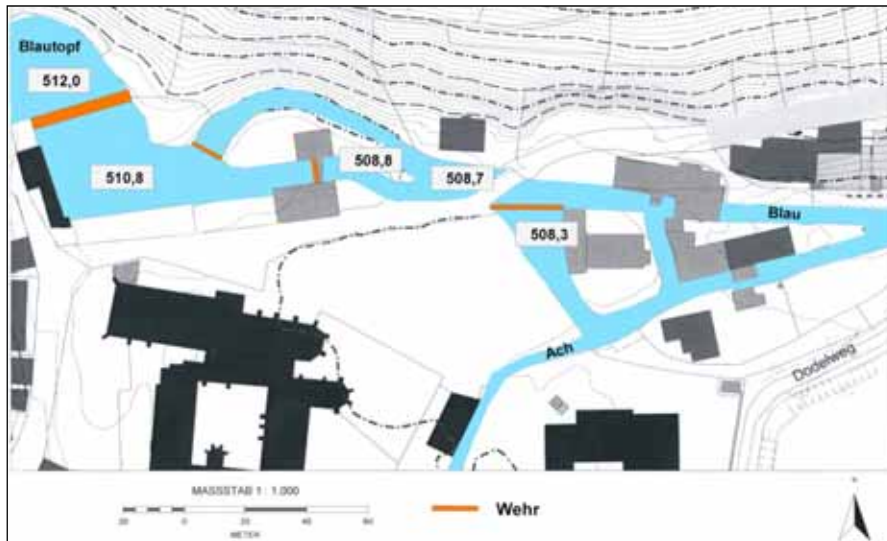


Abb. 13: Höhenlage des Blautopfsiegels und des Flussspiegels der Blau an den Wehren unterhalb des Blautopfs.

Bei den Kleinformen ist deren Genese maßgeblich. Fließfacetten und der größte Teil der Bodenkolke werden als Korrosionsbildungen im phreatischen Milieu angesehen und scheiden daher als Marker für die genannte Fragestellung aus. Als eindeutige Bildung für den Nachweis luftgefüllter Räume gelten Rillenkarran, die nicht nur im Blautopf selbst, sondern an weiteren Stellen in der Höhle nachgewiesen sind. Sie konzentrieren sich auf Tiefen von 19 bis 28 m unter dem Wasserspiegel, nur in der Karrenschlucht reichen sie bis auf 34 m hinab. Daraus können Wasserspiegelabsenkungen gefolgert werden, die ehemals auf maximal 478 mNN herabreichten. Die maximal nachweisbare Tiefenlage der Karstwasseroberfläche entspricht etwa der Talsohle in der Blaubeurer Urdonauschlinge (ELLWANGER et al. 2009). Weder die vertikale Verbreitung der vados gebildeten Kleinformen noch die Unterwassertropfsteine bestätigen eine Karstwasserspiegelabsenkung, die signifikant unter die Höhenlage der Talsohle der Urdonau hinausgeht.

Der datierte Stalagmit im Äonendom zeigt, dass im Holozän der Wasserspiegel gegenüber heute noch mindestens 4 m tiefer gelegen haben muss. Der nach der Sinterbildung erfolgte Wasseraufstau bis über die Stalagmitenspitze hinaus ist vor allem auf die Eingriffe des Menschen zurückzuführen, der zur Nutzung des Wassers Stauwehre anlegte.

#### 4 Dank

Den Tauchkollegen Dr. JÜRGEN BOHNERT, Dr. SALVATORE BUSCHE, ANDREAS KÜCHA, HENNING MEZGER und MICHAEL SCHOPPER danken wir für die guten Unterwasseraufnahmen der Kleinformen. MICHAEL SCHOPPER fertigte die Montage der Bildfolgen im Bereich des Kolkbachbetts.

Dr. LUKAS PLAN, Dr. MARCO FILIPPONI und Dr. PHILIPP HÄUSELMANN danken wir für Anregungen und Diskussion.

THOMAS WIEGAND fertigte das Digitale Geländemodell der Blaubeurer Talschlinge.

### Schriftenverzeichnis

- ARGE BLAUTOPF (2009): Faszination Blautopf – Vorstoß in unbekannte Höhlenwelten. – 136 S.; Ostfildern (Jan Thorbecke).
- BARTH, G., HASENMAYER, B., HERRIG, R., SCHNEIDER, J. & HASENMAYER, J. (o.J.): Die Entdeckung der Blauhöhle und der Süddeutschen Höhlentherme. Tauchforschungen seit 1961 und erste U-Bootfahrten. – 14 S.; Selbstverlag.
- BLUMBERG, P.N. & CURL, R.L. (1974): Experimental and theoretical studies of dissolution roughness. – J. Fluid Mech., **65**(4): 735-751; Washington.



- BOHNERT, J. (2002): Ergebnisse der Tauchforschungen der Arbeitsgemeinschaft Blautopf in der Blautopfhöhle (7524/34) von 1997 bis 2001. – Mitt. Verb. Dt. Höhlen- u. Karstforsch., **48**(1): 10-17; München.
- ELLWANGER, D., UFRICHT, W. & SIMON, T. (2009): Die Lockersediment-Füllung des Blautals: Ergebnisse der neuen Forschungs-Kernbohrung am Kindergarten in Blaubeuren. – Laichinger Höhlenfreund, **44**: 157 – 176; Laichingen (in diesem Heft).
- FILIPPONI, M. (2007): Speläomorphologische Erscheinungen im Zusammenhang mit stratigraphischen Initialfugen. – Laichinger Höhlenfreund, **42**: 21-32; Laichingen.
- HASENMAYER, J. (1986a): Die heiße Spur im kalten Blautopf. – Baden-Württemberg **1986**, Heft 4: 9-19; Stuttgart.
- (1986b): Das Geheimnis des Blautopfs. – Geo, **1986**, Heft 5: 10-38; Hamburg.
- (1986c): Blautopf – Blauhöhle. Schlüssel für ein neues Verkarstungsbild des Schwäbischen Juras. – In DECKER-HAUFF, H. & EBERL, I. (Hrsg.): Blaubeuren. Die Entwicklung einer Siedlung in Südwestdeutschland, 19-50; Sigmaringen (Thorbecke).
- KÜCHA, A., UFRICHT, W. & JANTSCHKE, H. (2009): Aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Blauhöhhlensystem. – Mitt. Verband dt. Höhlen- u. Karstforscher, **55**(4): 112-117; München.
- PALMER, A. N. (2007): Cave Geology. – 454 S.; Dayton/Ohio.
- SCHOPPER, M. & KÜCHA, A. (2007): Neueste Forschungsergebnisse im Blauhöhhlensystem 7524/30. – Mitt. Verband dt. Höhlen- Karstforscher, **53**(4): 100-105; München.
- SLABE, T. (1995): Cave Rocky Relief and its Speleogenetical Significance. – Znanstvenoraziskovalni Center Sazu, Zbirka ZRC, 10, 127 S.; Ljubljana.
- VILLINGER, E. (1978): Zur Karsthydrologie des Blautopfs und seines Einzugsgebiets (Schwäbische Alb). – Abh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, **8**: 59-127; Freiburg.
- WACKERBARTH, A., MANGINI, A., SPÖTL, C., UFRICHT, W. & SCHIMPF, D. (2009): Einordnung des Stalagmiten BT-1 aus dem Blauhöhhlensystem in einen klimatischen Kontext. – Laichinger Höhlenfreund, **44**: 195 – 208; Laichingen (in diesem Heft).



Seligengrundhöhle, Schwarzes Loch. Aufn. ARGE BLAUKARST, ANDREAS SCHÖBER.