

Beiträge zur Morphologie und Genese von Höhlen im zentralen Grünsandstein des Golfs von Regensburg

von Peter Gockel

Kurzfassung: Grünsandstein kann aufgrund seines karbonatischen Zements verkarsten und Hohlräume bilden. Mehrere Höhlen werden morphologisch beschrieben. Die Wirkungsfaktoren der Hohlraumbildung im Grünsandstein werden unter Berücksichtigung speläogenetischer Faktoren erarbeitet. Hohlräume entstehen im Regelfall entlang von Klüften oder Fugen, können aber auch ohne derartige Bindung als eingliedrige Röhren vorkommen. Die Höhlen im Elbsandstein und die Höhlen des Regensburger Grünsandsteins haben morphologische Gemeinsamkeiten, sind jedoch auf eine völlig unterschiedliche Entstehung zurückzuführen.

Abgrenzung des Untersuchungsraumes

Zur geologischen und tektonischen Situation

Höhlen im Grünsandstein im Spiegel der Literatur

Die Lösungsfähigkeit des Grünsandsteins

Grundlagen über Morphologie und Genese der Höhlen im Grünsandstein

Beschreibung der Fundstellen

Zusammenfassung zur Geologie der Höhlen

Morphologie der Höhlen

Zum Alter der Grünsandstein-Höhlen

Ausblick

Literatur

Abgrenzung des Untersuchungsraumes

Als Arbeitsgebiet wurde der Zentralbereich des Golfes von Regensburg gewählt. Dieser liegt geographisch innerhalb der topographischen Karten 1:25.000 von Kallmünz, Kelheim, Regensburg, Bad Abbach, Laaber und Regenstauf. Hier findet sich stark glaukonithaltiger Regensburger Grünsandstein.

Zur geologischen und tektonischen Situation

Die Cenoman-Transgression des Grünsandsteinmeeres erfolgte von Südosten her aus der Straubinger Bucht (LANGE & PAULUS 1971) über ein von Schutzfelsschichten versiegeltes Weißjura-Relief und schuf die ostbayerische Randbucht (Golf von Regensburg, HERM, 1979). Dabei wurde das vorhandene Kuppenrelief im Untersuchungsgebiet weitgehend eingeebnet (nach RUTTE 1962). Die obercenomane Transgression führte in den mehr zentralen Teilen (Regensburg) zu stark glaukonithaltigen Ablagerungen, dem Regensburger Grünsandstein (HERM 1981). Es handelt sich hierbei um einen kalkigen Glaukonitsandstein bzw. um einen glaukonitischen Kalksandstein, der im Untersuchungsraum als leicht faßlicher Schichtkomplex vorliegt. Seine Lage zwischen der Jura-Abrasionsfläche und dem Eibrunner Mergel erlaubt eine präzise Erfassung. Petrographisch teilt er sich scharf in den bankig bis massigen Unteren Grünsandstein sowie in den plattigen Oberen Grünsandstein. Die Mächtigkeiten im Untersuchungsgebiet liegen für die gesamte Fazies des Grünsandsteins bei maximal 15 m. Dieser weist ein beträchtliches Porenspeichervolumen auf, wobei der Wasserdurchsatz überwiegend über Schichtfugen und Klüfte erfolgt (APEL 1971: 279).

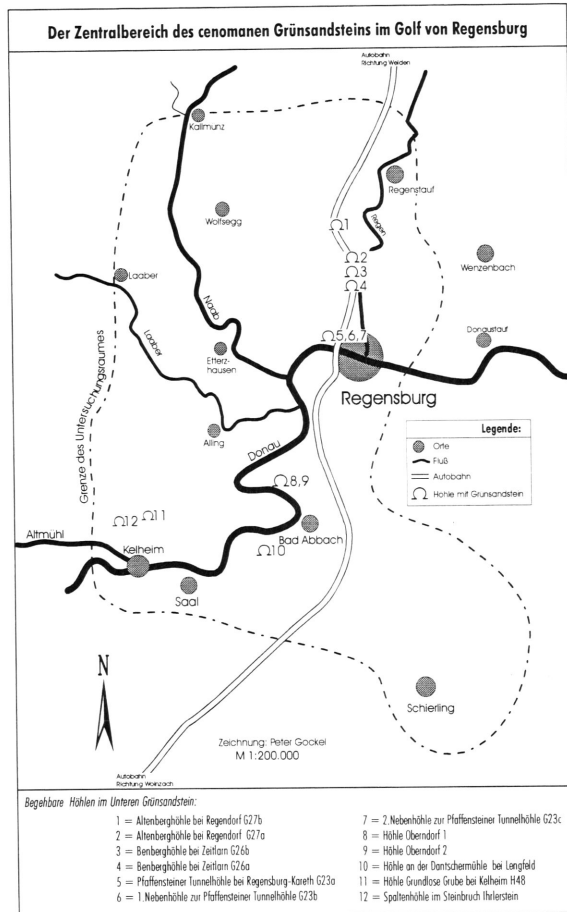


Abb. 1: "Der Zentralbereich des cenomanen Grünsandsteins im Golf von Regensburg" nach Angaben der Geologischen Karte Bayern, 3. Aufl. 1981.

OBER- KREIDE	TURONIUM	? CONIACIUM	Weilloher Mergel
		oberes	Großberger Sandstein
		mittleres	Eisbuckelschichten, Glaukonitmergel, Pulverturmschichten
	CENOMANIUM	unteres	Reinhausener Schichten, Knollen- und Hornsandstein
		oberes	Oberer Eibrunner Mergel
UNTER- KREIDE	WEISS- JURA		Unterer Eibrunner Mergel Oberer Regensburger Grünsandstein Unterer Regensburger Grünsandstein Schutzfelsschichten Platten-/Massenkalk

Geologische Schichten der Kreide im Raum Bad Abbach. Zusammengestellt nach Angaben von HERM (1982) und RÖPER (1997, in diesem Heft).

Die Frankenalb ist ein Teil der Süddeutschen Großscholle, innerhalb derer sich die Frankenjura-Scholle durch eine tektonisch recht einheitliche Vergangenheit auszeichnet. Relativ gleichmäßige Hebungs- und Senkungsvorgänge konnten im Arbeitsgebiet zu keiner Faltung der flach lagernden Jurakalke, sondern nur zu einer einheitlichen Verstellung mit generellem südöstlichen Einfallen führen. Die Frankenjura-Scholle taucht nach Süden zu an der Albrandflexur und an der "Schwarzwald-Bayerwald-Linie" (von FREYBERG 1969: 13) unter das Molassebecken. Durch den Sog der Geosynklinalen wurde die starre Albtafel während der starken postcenomanen Absenkung im Gebiet zwischen Kelheim-Bad Abbach-Regensburg-Laaber in eine Reihe von Bruchschollen zerlegt (MÜLLER 1980: 23).

Höhlen im Grünsandstein im Spiegel der Literatur

In der Literatur gibt es vereinzelte Hinweise auf Höhlen im Grünsandstein, eine morphologische oder genetische Bearbeitung fand bislang nicht statt. So berichtet BUCHNER (1966b) in einer geologischen Dokumentation des Straßenneubauamtes Regensburg über eine große, begehbare Höhle im Grünsandstein, die beim Bau des Pfaffensteiner Tunnels in Regensburg angefahren wurde (BAUBERGER 1969: 33 und 318). APEL (1971: 285) bringt eine Abbildung des Höhlenschachtes. BAUBERGER (1969: 33) versucht eine Altersbestimmung dieser Höhle. Er hält sie für "altkreidezeitlich angelegt" und quartär reaktiviert. BUCHNER (1966b) nimmt als mögliche Entstehungsursache Auswaschung an. OSCHMANN (1958: 73) erwähnt die Höhle Oberndorf 1 in einer Aufschlußbeschreibung. GOCKEL (1996) zeigt im Rahmen eines historischen Aufsatzes einen Längsschnitt durch den Grünsandstein und Weißjura der Grundlosen Grube bei Kelheim.

Darüber hinaus gibt es von Buchner (1981 und 1982) eine unveröffentlichte Bilddokumentation für das Straßenneubauamt Regensburg mit mehreren Höhlen, die entweder im Grenzbereich Massenkalk-Grünsandstein oder im Grünsandstein allein entwickelt sind und im Zuge der Bauarbeiten für die Autobahn Weiden-Regensburg zwischen Zeitlarn und Regendorf aufgeschlossen wurden. Ferdinand Leja, Röthenbach an der Pegnitz, vermißt 1966 mit dem Speläo-Club Sulzbach (SCS) die Höhle Grundlose Grube bei Kelheim und liefert dabei einen nicht weiter beschriebenen Höhenschnitt durch den Grünsandstein dieser Höhle.

Die Lösungsfähigkeit des Grünsandsteins

Nach MURAWSKI (1983) handelt es sich bei der Verkarstung um natürliche chemische Auflösungs- und Zersetzungsprozesse an Gesteinen (wie z.B. Kalk, Dolomit, Gips, Steinsalz usw.) durch Wasser. Diese chemischen Prozesse werden meist von mechanischen Vorgängen und Versturz begleitet.

Im Gegensatz zum Jura besteht der Grünsandstein aus einer Matrix, die sogar durch kleinräumig wechselnde Gehalte an Karbonat, Sand, Glaukonit, Fossilien und Brauneisenanlagerungen gekennzeichnet ist. Verkarstungsfähig ist der wasserlösliche Karbonatanteil der Matrix. Über ihn gibt es mehrere Untersuchungen. HASSELMANN (1892: 9) nennt für den Unteren Grünsandstein des Steinbruchs südwestlich Kapfelberg 58 % Kalkgehalt. OSCHMANN (1958: 71) bringt Karbonatbestimmungen für den Grünsandstein der Höhle "Oberndorf 2", nördlich Oberndorf, Blatt Bad Abbach, mit $\text{CaCO}_3 = 22,02 \%$, $\text{MgCO}_3 = 0 \%$. Im Steinbruch Kalk-

offen liegt der Karbonatanteil bei $\text{CaCO}_3 = 30,0 \%$, $\text{MgCO}_3 = 20,24 \%$ bzw. Calcit = 6%, Dolomit = 44,26 %.

Die Grundsätze der Verkarstung seien hier aufgeführt:

Die Korrosion von Karbonatgesteinen ist ein umkehrbarer chemischer Vorgang, der in relativ reinen Kalk- und Dolomitgesteinen zur Bildung des Karstes führt. Es sind zum einen chemisch-physikalische Faktoren, die die Lösung des Gesteins bewirken, während Art und Intensität durch die äußeren Bedingungen wie Temperatur, Fließgeschwindigkeit des Wassers und anderen bestimmt werden. Letztendlich bleibt die Anwesenheit von aggressivem CO_2 von Bedeutung. Es gibt zwei Arten der Korrosion, die besonders wirksam sind: Zum einen ist es die "normale" Zersetzung eines CO_2 -haltigen Wassers und zum anderen die Mischungskorrosion. Letztere tritt dann auf, wenn sich zwei Wässer unterschiedlicher Zusammensetzung an Calcium/Magnesium mischen. Dieser Vorgang kann im gesamten durchströmten Bereich des Gebirges auftreten. Die Normalkorrosion tritt nur auf, solange das Wasser das CO_2 -Gleichgewicht mit der Luft noch nicht erreicht hat. Sie ist daher begrenzt durch die Abwesenheit von Luft (im Grundwasserbereich) oder nach Erreichen des $\text{CO}_2/\text{CaCO}_3$ -Gleichgewichts (PRÖSL 1992: 129).

Grundlagen über Morphologie und Genese der Höhlen im Grünsandstein

Die Karbonatkomponente des Grünsandsteins läßt ähnliche Lösungsformen und Hohlraumbildungen wie im Jura erwarten (BÖGLI 1978), die Sandkomponente wiederum ähnliche Formen wie in Sandsteinhöhlen (STRIEBEL 1994). Dabei unterliegen neben der Kornbindung (Bindemittel ist hauptsächlich Kalk) auch die Härte, Verbands- bzw. Gefügefestigkeit sowie die Klüftigkeit des Gesteins schon kleinräumigen Varietäten. Außerdem sind die Anteile des Karbonats an der Gesamtmatrix schwankend (Oberndorf 1 = 22,02 % CaCO_3 , Kapfelberg = 58 % CaCO_3 siehe oben), was sich wiederum auf die Lösbarkeit auswirkt. Daher sind Spielformen zwischen der Morphologie des Karstes und des Sandsteins denkbar. Zur Genese: Bei Verkarstung im Jura werden überwiegend wässrige Lösungen transportiert. Durch Korrosion werden dort Primärfugen gedehnt und zu größeren Gerinnen ausgebildet (BÖGLI 1978: 217). Bei der Bildung von Höhlen im Grünsandstein muß zusätzlich zur wässrigen Lösung die nicht lösliche Sandkomponente abtransportiert werden. Kann diese Verfrachtung nicht erfolgen, verstopfen die Transportwege. Eine Hohlraumentstehung findet dann nicht statt. Somit ist das Vorhandensein ausreichend dimensionierter Beförderungswege Grundlage jeglicher Höhlenbildung im Grünsandstein.

Beschreibung der Fundstellen

Pfaffensteiner Tunnelhöhle (G 23a-c)

a) Haupthöhle (G 23a):

TK Regensburg 6938, RW 54 32 660, HW 45 06 120, Höhe = 352 m über NN

Der Pfaffensteiner Tunnel ist ein Autobahntunnel auf der Strecke Regensburg-Weiden zwischen den Anschlußstellen Regensburg-Pfaffenstein und Lappersdorf. Vor seinem Bau wurde ein Aufschlußstollen entlang der geplanten Trasse vorgetrieben. In diesem Stollen wurde die "Pfaffensteiner Tunnelhöhle bei Regensburg-Kareth" angefahren. Sie hat die Katasternummer

G 23a (Illmann). Die Höhle liegt zwischen Tunnelkilometer 659,70 und 664,30 m. Sie gliedert sich in folgende Komplexe (nach BUCHNER 1966a, b):

1. Flach einfallender, geknickter Gang im Unteren Grünsandstein

Der Höhenschnitt zeigt 1 m oberhalb des spaltenförmigen Schachtes einen Gang im Grünsandstein mit rundem Durchmesser, der schwach schräg und stufenförmig nach oben verläuft. Er kann auf eine Länge von etwa 4 m eingesehen werden. Von hier aus ist ein kleiner, flacher Hohlraum noch auf etwa 2-3 m zu verfolgen. Die Basis dieses Gangprofils ist mit lockeren, lehmigen Sanden bedeckt. Der mittlere Durchmesser des Ganges beträgt 0,75 m, die Breite schwankt zwischen 30-80 cm, die Höhe zwischen 60-100 cm.

2. Begehbare Kuppelhöhle im Kontaktbereich Juramassenkalk-Unterer Grünsandstein

Es handelt sich hierbei um einen nischenartigen, rundlichen Hohlraum (Länge 4,5 m, Tiefe 1,5-3,0 m, Höhe 2,5 m) mit kuppelförmiger Decke. Er vermittelt zwischen dem Gang aus Grünsandstein und dem darunterliegenden Schacht, wobei dieser Teil der Höhle vollständig im Grünsandstein liegt und lediglich die Sohle der Grenzschicht aufliegt. Der einmündende Gang liegt lediglich 1,0 m über dem Mund des Juraschachtes. Somit verbleiben über ihm noch ca. 1,5 m bis zur Decke. In der Schachttöffnung liegen einige Grünsandblöcke mit 0,5-1,5 m² eingeklemmt. Die Spalte im Jura paust sich nicht im Grünsandstein durch.

3. und 4. Der Juraschacht

Der ovale Juraschacht ist 2-3 m lang, 1-2 m breit und 8 m tief. Die Spalte enthält an der Sohle schwach bergfeuchte Sande, Kalkbrocken und Kalksplitter. Der übrige Teil ist leer.

5. Diagonale Fortsetzung am Ende des Schachtes (im Jura)

An der Basis des Schachtes verläuft ein dreieckigförmiger Gang mit 30 cm Breite und einer Höhe von 50 cm in Verlängerung des Spaltenverlaufes vom Schacht nach Nordosten. Der Gang war nicht befahrbar, jedoch auf einer Länge von 6 m zu beobachten.

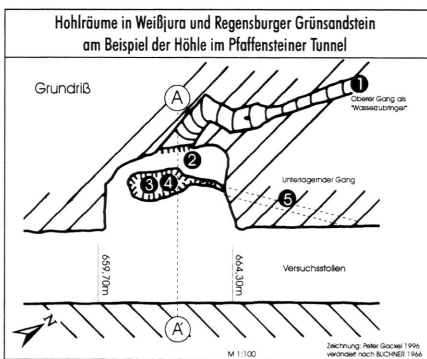


Abb.2: Hohlräume in Weißjura und Regensburger Grünsandstein am Beispiel der Höhle im Pfaffensteiner Tunnel bei Regensburg, verändert nach BUCHNER (1966)

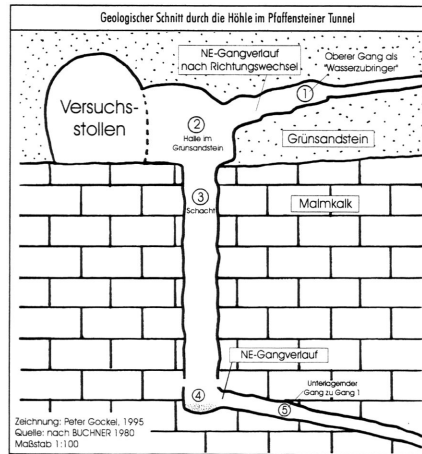


Abb. 3: Geologischer Schnitt durch die Höhle im Pfaffensteiner Tunnel bei Regensburg, verändert nach BUCHNER (1980)

b) Die Nebenhöhlen G 23b und c:

TK Regensburg 6938, G 23b: RW 54 32 667 HW 45 06 124, Höhe = 352 m über NN G 23c: RW 54 32 674 HW 45 06 120, Höhe = 352 m über NN

BUCHNER (1966a) dokumentiert bei der Abwicklung des Versuchsstollens im Abschnitt Nr. 34 vom 22.11.1966 die Stollensituation zwischen Station 641,70 m und 661,70 m. Hier verläuft die Grenze Jura-Grünsandstein an der Sohle des Stollens. Dieser Grenzbereich ist mürbe bis schwach brüchig. 1 m oberhalb der Grenzschicht ist der Fels jedoch fest. Diese Stollenabwicklung enthält zwei weitere Höhlen. Eine Skizze der Objekte existiert nicht. Höhle G 23b liegt an der Ostulme bei 644,5 m, ist 1x1 m groß und fällt durch ihre kugelige Form auf. Höhle G 23c liegt ebenfalls an der Ostulme bei 652,2 m und hat die gleichen Ausmaße und die gleiche Form wie Höhle G 23b. Beide liegen 10-14 m diagonal versetzt zur Haupthöhle.

Zusammenfassung: Die im Rahmen der Baumaßnahme gefundenen Höhlen befinden sich in unmittelbarer Nähe. Auffallend ist in allen drei Fällen die Ausbildung von kugeligen Räumen im Grünsandstein. Dabei wird die Basis dieser Höhlen stets vom Jura gebildet. Leider sind für die Nebenhöhlen G 23b und G 23c keine weiteren Daten dokumentiert. Aussagen zur Genese dieser Formen sind somit nicht möglich. Möglicherweise hat aber der im Höhlenbereich mürbe bis brüchige Grünsandstein eine Hohlraumbildung begünstigt.

Benberghöhlen bei Zeitlarn

Bei den Benberghöhlen handelt es sich um Höhlen entlang der Autobahn Regensburg-Weiden auf Ortshöhe von Zeitlarn in der TK Regensburg. Diese wurden im Rahmen des Autobahnbau- es angeschnitten. Nach photographischer Beweissicherung erfolgte ihre Verfüllung oder ihr Abtrag. Sie sind daher heute nicht mehr zugänglich.

Höhle G 26a:

Am Nordosthang des Benbergs lag die Höhle an der östlichen Fahrbahnseite, ca. 3 m über dem Erdplanum, bei Autobahnkilometer 189,206 in einer Höhe von 367,7 m über NN. Sie wurde im Rahmen der Baumaßnahme durch Abtragungsarbeiten am Benberg entfernt. Ihre größte Ganglänge betrug GGL = 6 m, die Tiefe lag bei $t = -3,3$ m. Die Höhle befand sich im Grenzbereich Massenkalk-Grünsandstein. Der Hauptteil lag im Massenkalk. Die Höhlendecke baute sich aus Unterem Grünsandstein auf. Buchner dokumentierte die lokale Situation bei Freilegung der Höhle mit sechs Bildern am 05.10.81. Dabei zeigt sich der Kontakt Jura-Grünsandstein als ebene Fläche ohne Transgressionskonglomerat. Untenstehendes Bild eines Teilbereichs der eingestürzten Höhle zeigt eine leicht gewölbte Grünsanddecke über hydrisch geformtem Massenkalk. Weitere Aussagen erlaubt das Bildmaterial nicht.

Höhle G 26b:

Die Höhle lag bei Autobahnkilometer 189,096 in einer Höhe von 370,6 m über NN am Nordosthang des Benbergs in Fahrtrichtung nach Regensburg, im Bereich der jetzigen Überholspur. Der Schachteinbruch wurde am 04.09.1981 von Buchner photographiert, sodann verfüllt und hydrologisch plombiert. Die größte Ganglänge der Höhle betrug GGL = 4 m, die bekannte Tiefe war bei $t = -2$ m. Sie lag im Massenkalk mit einer Überdeckung aus mürbem Grünsandstein. Weitere Aussagen erlaubt das Bildmaterial nicht.



Abb.4: Leicht gewölbte Decke aus dem Unterem Regensburger Grünsandstein über Massenkalk am Benberg bei Zeitlarn, Lkr. Regensburg. Belegaufnahme von BUCHNER (1981, Taf.10, Abb. 4).

Altenberghöhlen bei Regendorf

Die Altenberghöhlen liegen nördlich der Benberghöhlen. Auch sie befinden sich auf dem Autobahngelände Regensburg-Weiden, Ortshöhe Regendorf. Alle Höhlen wurden nach photographischer Dokumentation abgetragen oder verfüllt und sind daher heute nicht mehr zugänglich.

Höhle G 27a:

Am Südosthang des Altenberges lag die Höhle auf einem jetzt nicht mehr bestimmbar Punkt innerhalb der Autobahntrasse bei Kilometer 187,916 in einer Höhe von 373,96 m über NN. Es handelt sich um einen auf $t = -2,0$ m Tiefe geloteten, röhrenförmigen Deckeneinbruch von etwa 30 cm Durchmesser. Der schachtförmige, vollständig im Unteren Grünsandstein liegende Gang führt steil abwärts. Nach photographischen Aufnahmen am 25.06.82 (2 Bilder von Buchner) wurde der Durchbruch verfüllt und plombiert.

Höhle G 27b:

Sie lag am Südwesthang des Altenberges innerhalb der Autobahntrasse bei km 187,910 in 373,69 m über NN. Der genaue Standort ist nicht mehr feststellbar. Die größte Ganglänge war bei GGL = 15 m, die Vertikaldistanz ist unbekannt. Die Höhle baute sich aus Unterem Grünsandstein auf. Sie wurde am 06.07.82 durch Buchner aufgenommen (2 Bilder) und im Anschluß daran im Rahmen der Planungsarbeiten verfüllt und plombiert.

Höhle Oberndorf 1:

TK 7038 Bad Abbach RW 45 01 925, HW 54 23 380, Höhe = 407 m über NN.

Sie befindet sich bei "(337,5)" unter Ortsangabe "Oberndorf" in der TK. Nachfolgend wird sie kurz "Oberndorf 1" genannt. Die ost-west-ausgerichtete Hallenhöhle besteht aus einer kuppelförmigen, bis zu 1,6 m hohen, maximal 3 m breiten und 5 m langen Halle, an deren Ende nicht begehbare, kluft- als auch schichtgebundene Fortsetzungen anschließen. Durch Abbau von Grünsandstein im Rahmen des früheren Steinbruchbetriebes wurde die Überdeckung mit Grünsandstein an der Höhle bis auf 1 m abgebaut. Die Gesamtmächtigkeit des Unteren Grün-

sandsteins beträgt in diesem Steinbruch jedoch 5,5 m. Somit bleibt innerhalb der Fazies noch eine Restmächtigkeit von 3,9 m über Höhlenniveau. Die gesamte Ganglänge beträgt GGL = 9,5 m. Der Haupteingang verläuft mit 240° nahezu westlich. Als zweite Tagöffnung gibt es im Süden einen mit 60° schräg einfallenden Schacht von 2,5 m Tiefe. Das Sediment besteht im wesentlichen aus verwitterten, autochthonen Grünsanden unter gelegentlicher Einschaltung von Humus und sandigen Lehmen.

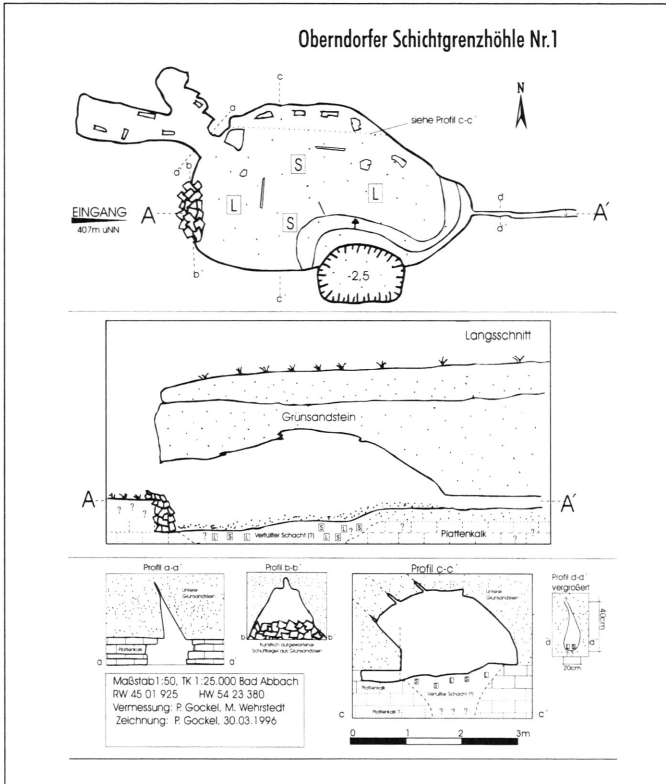


Abb.5: Die Oberndorfer Schichtgrenzhöhle Nr. 1 bei Oberndorf, Bad Abbach (Ostbayern).

Der auf 2 m Länge einsehbare, 10-25 cm breite und mindestens 20 cm hohe, canyonartige Gang im Osten der Höhle fällt durch seine glatten bis leicht welligen Seitenwände auf. Die absolute Ganghöhe ist nicht einsehbar, Messungen auf dem ersten Meter liefern mit Meßstab 20-30 cm. Das Top des Ganges ist mangels fehlender Einsicht nicht feststellbar (Profil d-d), Schätzungen des Autors belaufen sich auf 50 cm Gesamthöhe. Bruchzonen, Abschuppung oder Verwitterungsprozesse lassen sich nicht beobachten. Das umgebende Gestein besteht ausschließlich aus Unterem Grünsandstein, auch die Sohle (erst ca. 50 cm unter Gangniveau liegt Plattenkalk). Dem Betrachter erscheint dieser Gang wie ein gleichmäßig trockengefallener Fluß. Seine Sohle ist mit einer 1-3 cm hohen, autochthonen Sedimentschicht aus mittel- bis grobkörnigem Grünsand bedeckt. Der gegenüberliegende westliche Gang (Profil a-a') liegt unterhalb einer Hauptkluft und erschließt Plattenkalk. Der Boden dieses 2,5 m langen, maxi-

mal 1 m breiten Ganges mit einer Maximalhöhe von 50 cm weist eine Fülle kleinerer Bruchstücke aus Plattenkalk auf, dem wenig Schutt aus Grünsandstein beigemischt ist. Die Sohle der Höhle markiert in weiten Zügen die Transgressionsfläche des Grünsandsteins. Am Übergang von der Sohle zu den Seitenwänden steht söhlig, weißer kieseliger Plattenkalk der "Tiefen Ulmensis-Schichten" (OSCHMANN 1958) mit 0,5-10 cm Bankung an. Mit Grünsand verfüllte Bohrgänge finden sich im Top dieses Plattenkalkes. Die Seitenwände und die Höhlendecke bestehen aus einem mittel- bis grobkörnigen, grüngrauen massigen Glaukonit-Kalksandstein, der dem Unteren Grünsandstein zuzuordnen ist (OSCHMANN 1958). Schichtung ist an einzelnen Stellen vor dem Höhleneingang durch eingeregelt Muschelschalentrümmer angedeutet. Ein Transgressionskonglomerat liegt nicht vor. Der in Aufriß und Grundriß der Höhle erkennbare Steinhaufen (Profil b-b') bildete sich im Rahmen der Steinbrucharbeiten aus Restmaterial. Einen interessanten Einblick in die große Klüftigkeit des Grünsandsteins gewähren die Kluftverhältnisse in dieser Höhle. Die Profile a-a' und c-c' zeigen die calcitgefüllten Hauptklüfte mit ost-west-gerichtetem Streichen und 60° Einfallen. Die Kluftdicke liegt im Profil c-c' bei 50 cm. Diese cm-breiten Klüfte setzen sich in Richtung des Ost- und Westganges fort. Im Westgang erweitern sich die Kluftflächen zu einer 40 cm breiten, tektonisch bedingten Spalte, während die Spaltenbildung im Ostgang wohl auf Tiefenerosion infolge Auswaschung zurückzuführen ist.

Höhle Oberndorf 2

Lage: TK 7038 Bad Abbach , RW 45 01 955, HW 54 23 360, Höhe = 407 m über NN

Die Höhle liegt im Hauptteil des aufgelassenen Steinbruchs auf gleicher Höhe wie die Oberndorf 1 in der Transgressionsfläche des Grünsandsteins. Auch sie soll aus Vereinfachungsgründen nachfolgend kurz "Oberndorf 2" genannt werden. Die Transgressionsfläche erschließt sich im Eingangsbereich durch ein Paläorelief mit einem Durchmesser von 80 cm und einer Höhe von 70 cm, das als Härtling aus einem Gangprofil herauspräpariert wurde. Die unteren 40 cm dieses Reliefs bilden sich aus Riffschutt mit Korallen, Brachiopoden, Muscheln und Schnecken. Diese Fazies steht in Verzahnung mit kieseligen Plattenkalken und ist typisch für den Kelheimer Raum (BAUSCH & ZEISS 1966). Die oberen 30 cm des Härtlings bestehen aus Massenkalk. Die Schichtgrenze innerhalb des Reliefs verläuft unregelmäßig. Auf dem Härtling findet sich lokal scharf begrenzter Rotlehm, der als Rest von Schutzfellschichten oder als verwitterter Grünsandstein aufgefaßt werden kann. Da der Rotlehm jedoch überwiegend in feinsandiger Umgebung ohne Kiese lagert, handelt es sich wahrscheinlich nicht um Schutzfellschichten, sondern doch um verwitterten Grünsandstein. Es findet sich aber am Härtling an anderer Stelle sehr untergeordnet eine Beimischung von Lateritboden, der den Schutzfellschichten zugeordnet werden kann. Daher darf bei der derzeitigen Befundlage das Vorhandensein von Schutzfellschichten nicht ausgeschlossen werden.

Die 1,2 m hohe Höhle liegt an der Basis des 5,5 m mächtigen Unteren Grünsandsteins. Somit verbleibt eine Restmächtigkeit von 3,3 m ab Niveau der Höhlendecke. Das Profil b-b' erschließt das Transgressionsniveau, das bei Profilbeginn (b) um 15 cm tiefer liegt als am Profilende (b'). Das Liegende verzahnt sich intensiv mit dem Hangenden. Ein deutlich abgrenzbarer Kontaktbereich läßt sich im Gegensatz zu anderen Höhlen nicht feststellen. Die Sohle der Höhle besteht aus mittelbraunen bis grünlichen Fein- und Mittelsanden unter Beimischung

von etwas Schutt aus Grünsandstein. Der Längsschnitt A-A' verdeutlicht das Liefergebiet dieser Sande: Dem Gefälle entsprechend müssen sie über den obersten Nordwest-Nebengang verfrachtet worden sein.

Die 7,2 m lange, maximal 1,2 m breite und 1,2 m hohe Gang- und Hallenhöhle erstreckt sich linear in Ostwest-Richtung. Eine Fortsetzung findet sich im Westteil in Form eines kleinen, subparallelen Ganges sowie im Ostteil als Quergang aus nördlicher Richtung kommend. Die Deckenprofile der Halle als auch der Gänge sind durchgehend gewölbt. Eine Kluffbindung dieser Deckenformen ist nicht nachweisbar. Die Gänge sind wegen ihres Querschnitts (20x25 cm) nicht begehbar. Das Gangende ist deshalb auch nicht erfassbar. Der Eingang der Höhle liegt erst seit den Steinbrucharbeiten frei. Die tiefe Lage des Eingangs, der dichte Baumbestand an der Höhle sowie die relative Enge des Eingangs lassen Schnee hier nur stark verzögert auftauen. Im Beobachtungszeitraum März/April 1996 taute der Schnee im Eingang mit einer Verzögerung von 24 Tagen gegenüber der Schneeschmelze an der Oberfläche.



Abb.6: Höhle Oberndorf 2: Paläorelief aus Riffschutt in Verzahnung mit kieseligen Plattenkalken (= Härtling unter dem Hammer).

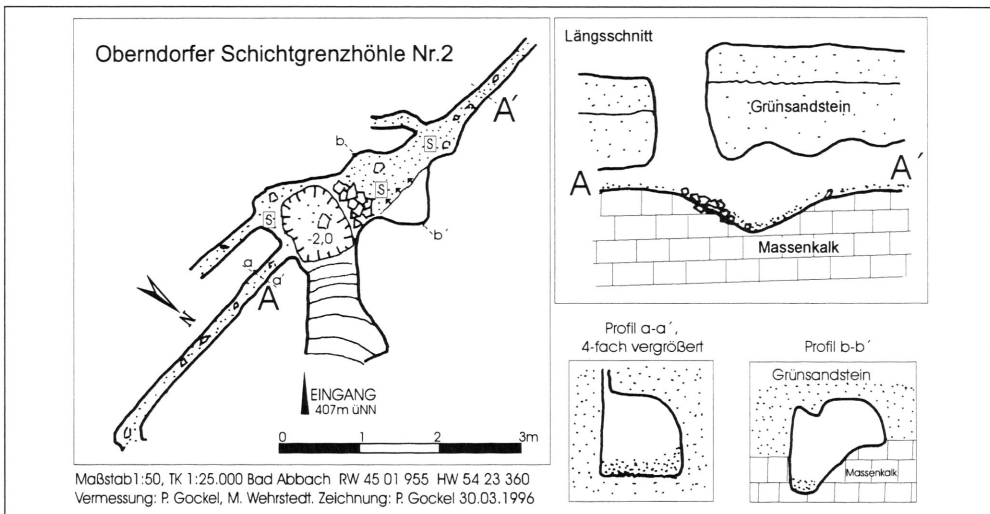


Abb.7: Die Oberndorfer Schichtgrenzhöhle Nr 2 bei Oberndorf, Bad Abbach (Ostbayern).

Höhle Grundlose Grube bei Kelheim

Lage: TK 7037 Kelheim, RW 54 23 525 HW 44 92 103, Höhe = 465 m über NN

Die nur mit Seil begehbare Schachthöhle liegt nordwestlich des Frauenhäusls bei Kelheim im Waldgebiet Braunschacht. Nachfolgend soll sie wie im Volksmund (GOCKEL 1996) nur kurz "Grundlose Grube" genannt werden. Es handelt sich hier um die größte, bekannte Höhle mit Grünsandstein: Der Eingangsschacht schließt Oberen Grünsandstein mit einer Mächtigkeit von etwa 5 m auf. Das Paket des Unteren Grünsandstein erreicht im Schachtbereich eine Mächtigkeit von 10 m. Die Gesamtmächtigkeit des Grünsandsteins beläuft sich daher auf 15 m. Die Höhlendecke markiert auf einer Fläche von durchschnittlich 30x10 m (maximal 30x30 m) die hier ebene Transgressionsfläche des Grünsandsteins, die als Abrasionsplattform ausgeprägt ist. Das Liegende unter diesem flachen Höhlendach baut sich aus Massenkalken auf und reicht meist großräumig über ein Spaltensystem bis 48 m Tiefe hinab. Das tieferführende System ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Raumhöhe schwankt außerhalb des Schachtbereiches zwischen 2 - 10 m. Eine sinnvolle Bearbeitung des hier interessierenden Grünsandsteines ist nur im relativ niedrigen Südteil der Höhle möglich. Dies liegt einerseits an den hier gut zugänglichen Grünsandteilen und andererseits an der Konzentration der Hohlformen innerhalb des Grünsandsteins auf den Südteil. So schwankt die Raumhöhe dort zwischen 0,5 - 5 m, die Raumbreite variiert von 4 - 7 m. Die Vertikaldistanz der Hohlformen reicht bis 4 m in den Grünsandstein. Die hier vorhandenen Formen haben somit die höchste Vertikalausdehnung des Untersuchungsraumes.

Dieser Grünsandstein zeigt sich petrographisch als ein inhomogen mittelsandiges Gestein mit geringen Mengen an Grobsand. Er ist gekennzeichnet durch erhöhten Quarzsandanteil, niedrige Dolomitgehalte und weist neben gröberkristallinem auch feinkristallinen Calcizement auf. Die mittleren Korndurchmesser des Karbonatsandsteins liegen ungefähr zwischen 0,4 und 0,6 mm. Der maximale Durchmesser beträgt je nach Probe 1,5 mm bis knapp über 2 mm. Die klastischen Komponenten sind Karbonatkörner, Quarz, Glaukonit, Feldspäte und sporadisch Glimmer und Schwerminerale. An Fossilien sind neben Foraminiferen auch große Fossilbruchstücke zu finden (ENDLICHER 1996).

Während ein Großteil des interessierenden Südteils aus bautechnisch festem Grünsandstein besteht, ist er im Südwestende der Höhle stark entfestigt und verbrochen, wodurch das Gestein hier lokal unter die Transgressionsfläche transportiert wird. Im Südteil findet sich eine enorme Vielfalt morphologischer Formen im Grünsandstein: Begehbare Hallen, runde Kuppeln, ein Paläorelief, ein Paläofluß, großräumige Auswaschungen, aktive Fließgerinne mit hydraulischer Verbindung zum Massenkalk, 1-2 cm lange Stalagmiten und 1-4 cm lange Stalagtiten im Grünsandstein, Sinterleisten und -bänder sowie oberflächliche Sinterüberzüge.

An der Grenzschicht zwischen Massenkalk und Unterem Grünsandstein finden sich im einsehbaren Südteil bis zu 5 cm mächtige, grünliche bis braune, glaukonithaltige Sande und Lehme. Sind derartige Sedimente vorhanden, dann liegt der Grünsandstein dem Jura nicht direkt auf.

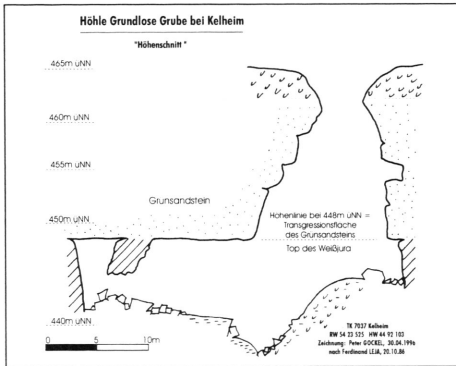


Abb.8: Höhenschnitt durch die Höhle "Grundlose Grube" am Frauenhäusl bei Kelheim, Niederbayern.

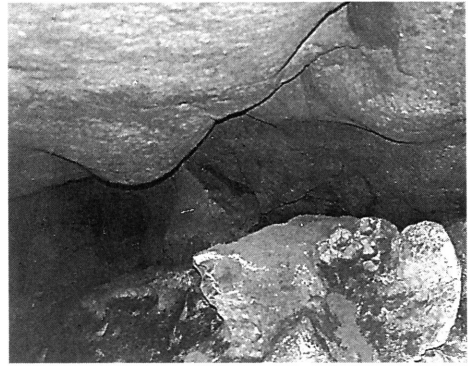


Abb.10: Grundlose Grube bei Kelheim: Blick zur Decke im Südteil neben einem Schacht. Großflächige Auswaschungen mit $h = 4,5 \text{ m}$, $b = 1,5 \text{ m}$, $l = 4 \text{ m}$.

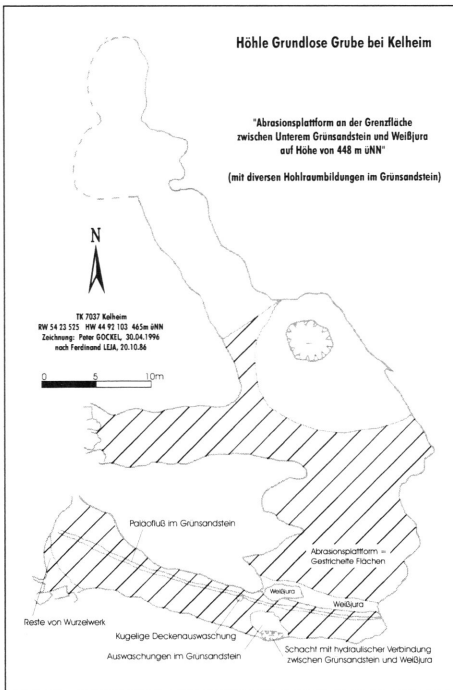


Abb.9: Abrasionsplattform an der Grenzfläche zwischen Unterem Grünsandstein und Weißjura am Beispiel der Grundlosen Grube bei Kelheim, Niederbayern.

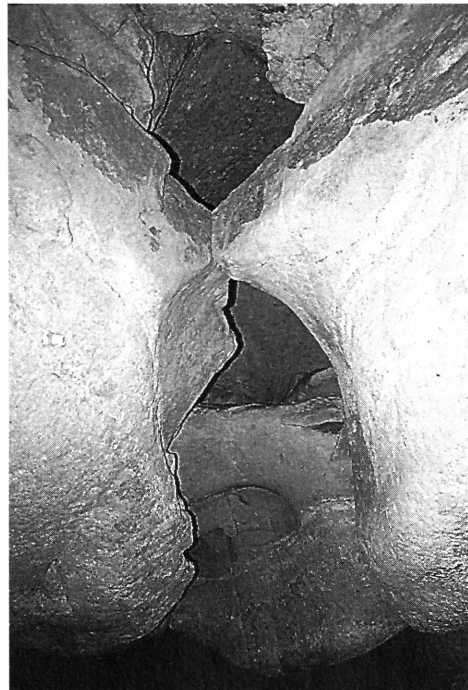


Abb.11: Blick zur Decke im Südteil neben einem Schacht; links ein Paläorelief. Bildmitte: In den Grünsandstein vorgedrungener Paläofluß, der ursprünglich zwischen Grünsandstein und Massenkalk entstanden ist.

Höhle an der Dantschermühle bei Lengfeld

TK 7038 Bad Abbach, HW 45 01 420, RW 54 20 720, Höhe = 385 m über NN. Die Höhle liegt an der Nordseite des aufgelassenen großen Steinbruchs am Mühlberg südwestlich von Bad Abbach, genau im "1" von "Kläranlage" in der TK, 30 m östlich des Wanderweges Lengfeld-Bad Abbach. Nachfolgend soll die Höhle kurz "Dantschermühle" genannt werden.

Sie befindet sich im obersten Teil des Unteren Grünsandsteins; 1,5 m über Höhlenniveau schließt der Obere Grünsandstein deutlich abgegrenzt an, das Liegende erschließt sich 6 m tiefer. Der Grünsandstein zeigt sich fein- bis mittelkörnig, seine Fossilführung besteht aus Exogyren, kleinen Austern und Brachiopodenschalen. Während er im Steinbruch auch auf gleichem Niveau ziemlich hart ist, tritt er in der Höhle bei mäßiger bis hoher Bergfeuchte mürbe bis völlig entfestigt auf.

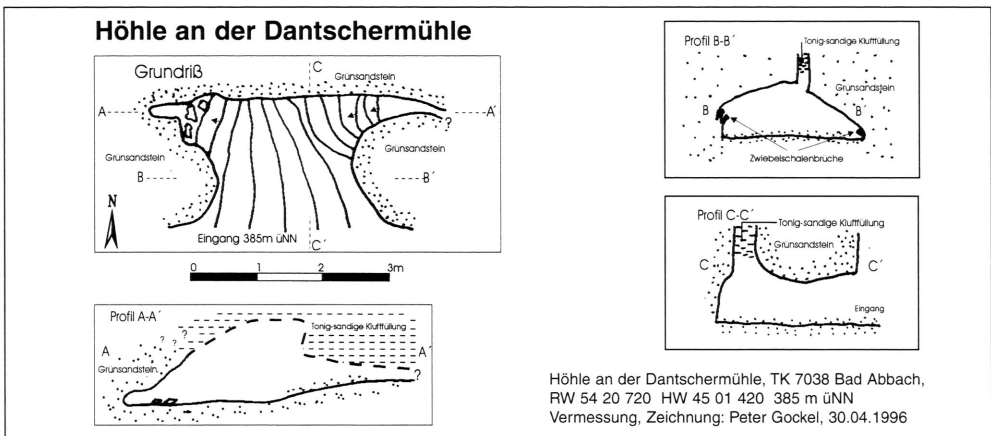


Abb.12: Geologische Aufnahme der Höhle an der Dantschermühle bei Lengfeld, Bad Abbach/Ostbay.

Die streng ostwest-orientierte Klufthöhle (siehe Grundriß) besteht aus einer 4,3 m langen, 2 m breiten und maximal 1,2 m hohen Halle, an die sich zwei nicht begehbare Kluffortsetzungen Richtung Ost mit 4 m und 3,5 m anschließen. Die eine Kluffortsetzung mit 3,5 m Länge zeigt am Ende einen Ausgang mit 10x10 cm. Die andere mit 4 m Länge ist in Wirklichkeit die Verlängerung der Ostwestachse der Höhle in östlicher Richtung. Obwohl sich dieser Gang in der Höhle nicht nachvollziehen läßt, gibt eine oberflächliche, 10 cm breite Geländedepression klare Hinweise auf den Verlauf dieser Kluft und somit auf den Verlauf der ursprünglich wohl größeren Höhle. Die Böden sind stark sandig und enthalten nur im Westen Blockschutt. Die Halle wird geprägt durch eine max. 40 cm breite und 2 m lange Kluft, die am Westende blind endet. Das Besondere daran ist ihre Füllung im Top aus verwitterten, grünlich-gelben Grünsanden unter starker Beimischung von mittelbraunen Tonen und Wurzelwerk. Der Längsschnitt a-a' bzw. c-c' verdeutlicht diese Kluffüllung und eine darunterliegende Ausräumung der Klufsedimente. Dies spricht für eine postkretazische Sedimentausräumung, die erst eintreten konnte, nachdem die Tone des Eibrunner Mergels bis in diese Kluft verfrachtet wurden. Das ausschwemmende Wasser muß dem Gefälle entsprechend von Osten über die beiden Kluffortsetzungen geflossen sein. Das Eingangportal der Höhle durchzieht in der östlichen Hälfte eine

nordnordwestliche Kluft, deren Flächen durch Wasser gelöst wurden. Diese im Portalbereich offenstehende Kluft läuft nach oben spitz zu. Es zeigt sich hier eine Verwerfung: Der Felsverband liegt westlich der Kluft in nahezu ursprünglicher Lagerung, im Osten kommt es zu einem Versatz von 32 cm. Die Lagerung im Westen wird durch ein zweitrangiges, aber junges und aktives Bruchliniengefüge gestört. Daraus ergeben sich im Eingangsbereich basale Druckbelastungen an den Auflagern, was zum Zwiebelschalenbruch führt (Exfoliation). Diese Druckbelastungen und die Bruchlinien stammen sicher nicht aus der Steinbrucharbeit, sondern wurden schon vorher angelegt. Sie sind ein Indiz für den beginnenden Einsturz des Westteils der Höhle.

Aufschlüsse im Steinbruch Ihrlerstein

TK Kelheim 7037, RW 44 89 520, HW 54 22 620, Höhe 465 m über NN

Aufgelassener Steinbruch südwestlich der alten Kirche von Ihrlerstein. Weder im Abbaubereich des Steinbruchs noch an den unzähligen Quadersteinen finden sich Hinweise auf hohlraumbildende Vorgänge im Unteren Grünsandstein. Herr Battermann (Firma Kiefer-Reul-Teich, Kelheim) und Prof. Rutte berichten auf telefonische Anfrage übereinstimmend vom Anschneiden einer begehbaren Spalte im Unteren Grünsandstein während der damaligen Steinbrucharbeiten. Das Gestein an dieser Spalte sei jedoch abgebaut worden. Im heutigen Landschaftsbild finden sich nur im lichten Wäldchen am Ostende des Bruchs (im ersten Wäldchen bei Zugang über den Geiger-Hof) einzelne exponierte Grünsandsteinblöcke an der Basis eines Hanges, die Hinweise auf Hohlraumbildungen liefern: So besteht hier eine Kluft von 1,8 m Länge und 40 cm Breite an der Basis. Sie ist anfänglich begehbare und endet blind in 1,2 m Höhe. Über den stark grünsand- und humusführenden Sedimenten bilden sich basale Hohlkehlen mit bis zu 40 cm Breite. Als örtliche Besonderheit findet sich eine Kluft, die am Top blind endet und in ihrem Verlauf deutliche Lösungserscheinungen zeigt. Die Form dehnt sich mit zunehmender Tiefe aus. In einem nur 4 m westlich gelegenen Grünsandblock finden sich röhrenartige Gänge mit 2-10 cm Durchmesser und maximal 60 cm Länge. Sie sind überwiegend horizontal und diagonal orientiert. Diese kleinen Gänge verbreitern sich am Austritt aus dem Felsen meist flachelliptisch.



Abb.13 (links): Kluft im Unteren Grünsandstein mit basalen Hohlkehlen am Rand des aufgelassenen Steinbruchs Ihrlerstein bei Kelheim, Niederbayern. Abb.14 (rechts): Röhrenartiges Gangprofil mit Lockersediment aus Grünsand und Humus.

Zusammenfassung zur Geologie der Höhlen

Die gefundenen Objekte liegen alle im Unteren Grünsandstein. Seine Mächtigkeit beträgt im Bereich der Höhlen bis zu 7,5 m. Die Hohlräume kommen innerhalb dieser Gesteinsfolge in jedem Niveau vor, wobei einige Höhlen die Grenzschicht zwischen dem Liegenden und dem Grünsandstein tangieren. Häufig setzen sich die Hohlräume im Liegenden bis in den Jura fort. Dann erreichen sie meist größere Ausmaße als im Grünsandstein (Beispiel: Pfaffensteiner Tunnel, Grundlose Grube, fraglich in Oberndorf 1). Die Mächtigkeit der gesamten Fazies des Grünsandsteins beträgt im Untersuchungsgebiet bis zu 15 m. Die größte Vertikalerstreckung haben die Höhle im Pfaffensteiner Tunnel sowie die Grundlose Grube mit maximal 4 m über dem Liegenden. Besteht es aus Gesteinen des Jura, so ist Plattenkalk (Oberndorf 1), Massenkalk (Grundlose Grube, Oberndorf 2, Pfaffensteiner Tunnel sowie in den Benberg- und Altenberghöhlen) oder Riffschutt (Oberndorf 2) aufgeschlossen. Das Liegende der beschriebenen Höhlen besteht aber teilweise auch aus Grünsandstein (Ihrlerstein-Kluft, Dantschermühle, Grundlose Grube in den oberen Teilen, Ostgang von Oberndorf 1, Oberer Gang im Pfaffensteiner Tunnel, Oberndorf 2). Ein Transgressionskonglomerat ist in keiner Höhle ausgebildet, in Oberndorf 2 finden sich spärliche Hinweise auf die Beteiligung von Schutzfelschichten. Trotz der recht inhomogenen Zusammensetzung des Grünsandsteins im Vergleich der einzelnen Fundstellen untereinander bleibt die petrographische Zuordnung der durchwegs psammitischen Fazies zum Unteren Grünsandstein ebenso unstrittig wie seine Klassifizierung als Zentralbereich des Regensburger Grünsandsteins. Besonders gute Einblicke in eine Abrasionsplattform des Grünsandsteinmeeres gewährt die Grundlose Grube, wobei der Zugang zur Höhle nur mit Seil möglich ist.

Morphologie der Höhlen

Röhrenstrukturen, Kennzeichen.

Die Röhren liegen vollständig im Unteren Grünsandstein, das Liegende wird nicht angeschnitten. Die Fundlage, die auf Oberndorf 1 und Oberndorf 2 begrenzt ist, erlaubt eine Unterscheidung von begehbaren Röhren und Kleinröhren. Dabei reicht ihr rundlicher bis ovaler Durchmesser von Zentimeter- bis Meterstärke. Während bei begehbaren Röhren eine Kluftbindung häufig ist, findet sie sich bei Kleinröhren nur vereinzelt.

Zu den begehbaren Röhren: Die östliche Röhre in Oberndorf 1 (Abb. 5, Profil d-d') ist als Ausläufer einer Kluft zu sehen, die sich durch die Halle dieser Höhle durchzieht. Die stark hydrisch geformten Wände in dem Gangprofil verbreitern sich mit Annäherung an die Sohle, was sich mit verstärkter Tiefenerosion erklären läßt. Als Sediment besteht nur eine zentimeterstarke Schicht aus autochthonem Grünsand. Dieser Gang ist (auch aufgrund seines leichten Gefälles) als ehemaliger Wasserzubringer zu bewerten. Die Entwässerung dieser Höhle erfolgte somit in Richtung des Vorfluters Donau. Die Höhle Oberndorf 2 ist im wesentlichen eine Röhrenhöhle, die sich lediglich im Mittelbereich zu einer Hallenhöhle erweitert. Die nahezu lineare Erstreckung des gesamten Komplexes in Ostwestrichtung läßt ebenfalls eine Orientierung zum Vorfluter erkennen. Große Mengen an psammitischem Sediment überdecken die ursprünglichen Sohlenverhältnisse, sodaß sich die ehemalige Neigung des Ganges nicht wahrnehmen läßt.

Zu den Kleinröhren zählen Gänge mit rundem bis schlauchförmigem Querschnitt, deren Gesamtlänge nur selten 50 cm überschreitet. Ihr Durchmesser liegt zwischen 1-7 cm, wobei ihre beliebige Lage im Raum weder eine Schicht- noch eine Kluffbindung erkennen läßt. Die Austrittsöffnung dieser Gebilde ist bei "steilen bis senkrecht" gestellten Röhren (Oberndorf 2) trichterförmig rund. Die Abtragung des Grünsandsteins erfolgt hier gravitativ und kann daher gleichmäßig an allen Seiten wirken, was rundliche Austrittsöffnungen verursacht. Die Bergfeuchte ist in den Röhren leicht erhöht, entsprechend auch die Entfestigung des Gesteins. In Oberndorf 2 konnten "senkrecht" verlaufende Röhren (auch mit verbundenen, gleichartigen Nebenröhren) ohne (!) Kluffbindung beobachtet werden. Als Sediment läßt sich in Taschen nur lockerer Grünsand nachweisen. In vielen dieser Röhren finden sich mm-große, herauspräparierte Brauneisenanlagerungen. Die senkrechten Röhren verlaufen mit zylindrischem Querschnitt. Ihr Ende ist entweder nicht einsehbar oder sie enden blind mit einer kuppenartigen Rundung. Gerade diese blind endenden Röhren, die keinerlei Kluffbindung aufweisen, lassen sich nur durch eine "aufwärtssteigende Hohlraumbildung" infolge von Auswaschung und/oder Absandung erklären. Grabgänge können als Bildungsursache ausgeschlossen werden, da viele Röhren für Grabgänge zu dick sind. Außerdem treten diese Röhren ohne Schichtbindung auf, was bei Grabgängen nicht der Fall ist. Die Genese dieser Bildungen ist bislang nicht erforscht.

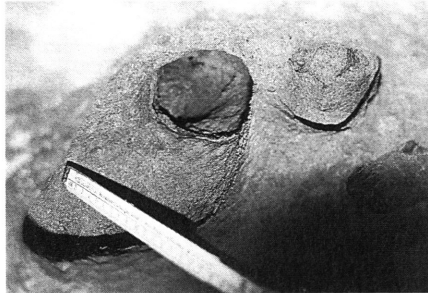


Abb.15: Zylindrische Röhren mit 8 cm Durchmesser, keine Kluffbindung. Die Röhren enden nach 8-25 cm blind. Höhle: Oberndorf 2, Bad Abbach, Ostbayern.

Bei geneigten bzw. horizontalen Röhren (Ihrlerstein, Oberndorf 1 und 2) erweitert sich die rundliche Röhre an der Austrittsöffnung zu einer flachen Ellipse. Hier erfolgt die Abtragung des Grünsandsteins durch Seiten- und Tiefenerosion. Die Seitenwände werden druckbedingt besonders beansprucht, was intensivere Abtragung bewirkt. Die Formen sind daher überwiegend elliptisch.

Die Bergfeuchte ist in den Röhren deutlich erhöht, der Grünsandstein daher mittel bis stark entfestigt, er sandet leicht ab. Auffällig mürbe sind der Boden und die Seitenwände dieses Röhrentyps infolge eines nie fehlenden sehr feuchten, sand-, humus- oder mooshaltigen Sediments. Ihr Liefergebiet aus dem Inneren des Berges zeigt einerseits, daß ein Feststofftransport (= Humus) von der Oberfläche möglich sein muß. Andererseits deuten die Sedimente darauf hin, daß die Abtragsphase und somit auch die Hohlraumbildung in den Röhren als derzeit aktiver Prozess anzusprechen sind. Dies wird besonders deutlich durch die Anwesenheit von

moosigen Flechten und Humus in den Röhren: Während Wurzeln eher ätzend oder sprengend (MURAWSKI 1983) und daher abtragend wirken können, erleichtert das CO₂-haltige Humusangebot die Auflösung des Karbonates und somit den Absandungsprozess in den Röhren. Insofern wirken Wurzeln und Humus als "Verstärker" bei dieser Art der Hohlraumbildung.



Abb.16: Steinbruch Ihrlerstein, östliches Ende: Rundlich-ellipsoides Röhrensystem ohne Kluft- oder Schichtbindung.

Diese Röhren haben eine ähnliche Formgebung wie die Röhrenstrukturen, die aus vielen Sandsteingebieten belegt sind (GAUDA et al. 1982). So finden sich dort Röhren mit fingerdickem Durchmesser als auch sehr große, begehbare Röhren. KNUST & WEBER (1987) berichten aus dem Buntsandsteingebiet der Pfalz von Röhren, die nicht an Klüften oder Schichtfugen orientiert sind. In diesen Punkten gleichen sich die Formen aus Sandstein und Grünsandstein. STRIEBEL (1994) hält eine Entstehung dieser Röhrenstrukturen für den Bayreuther Sandstein durch Sickerwasserkorrosion des (dort ferritischen bzw. silikatischen) Bindemittels mit anschließender Ausräumung des Sandes für wahrscheinlich. In diesem Punkt unterscheiden sich auch die Röhren des Elbsandsteins von denen im Grünsandstein bei Oberndorf. Das hier vorherrschende calcitische Bindemittel verhindert durch seine puffernde Wirkung das notwendige, reduzierende Milieu, das in den anderen Sandsteingebieten zur Lösung führt.

Fazit: Die Entstehung der Röhren ist durch Wassereinwirkung bedingt. Die Vergrößerung der Gangquerschnitte erfolgte sekundär durch ein Wechselspiel aus Absandung und Erosion.

Während im Weißjura Röhrenstrukturen als phreatisch entstanden (BÖGLI) bewertet werden, kann für den Grünsandstein eine Bildung unter vadosen Bedingungen nicht ausgeschlossen werden.

Die Rolle von Pflanzen bei der Gesteinsauflösung.

Wurzeln:

Der Einfluß auf die Gesteinsauflösung erfolgt in vielfältiger Weise. In jeder Grünsandsteinhöhle finden sich filigrane oder cm-starke Wurzeln. Sie wachsen entlang von verfüllten und unverfüllten Klüften im Gestein. Dabei scheint es keine Rolle zu spielen, ob die Klüfte verfüllt oder leer sind. 3 m westlich der Höhle Dantschermühle läßt sich im Aufschluß des Steinbruchs das Wurzelwerk eines im Fels wachsenden Baumes verfolgen. Es folgt vorhandenen Klüften

und erzeugt Druckbelastungen im Fels. In den lehmig verfüllten Deckenklüften der Höhle Dantschermühle ist viel Wurzelwerk vorhanden, das aber wegen der großen Klufbreite von 10-30 cm im Felsverband keine Druckbeanspruchungen erzeugt. Wurzeln sind nicht auf oberflächennahe Bereiche wie in Oberndorf 1 oder Dantschermühle beschränkt. Sie finden sich sogar bei 12 m Überdeckung in Form von 3-7 cm dicken Wurzeln in der Grundlose Grube. Diese (teilweise noch aktiven) Wurzeln entfalten sich am westlichsten Ende vom Südteil der Höhle.

Fazit: Wurzeln können durch ihr Wachstum Druckbeanspruchungen im Fels erzeugen, was Inkasion in einer späteren Phase der Hohlraumbildung zur Folge hat. Es sei angefügt, daß der Beitrag der Wurzeln an der Hohlraumerweiterung nur sekundäre Bedeutung haben kann.

Moose:

Moose gedeihen naturgemäß nur in eingangsnahen Höhlenbereichen (= Oberndorf 2, Grundlose Grube). Die portalnahe Decke von Oberndorf 2 zeigt Moosgeflechte mit abgestorbenen und aktiven Teilen, die stark mit aufgearbeitetem Grünsand vermischt sind. Im Kontaktbereich des Wurzelgeflechts mit dem anstehenden Grünsandstein ist das Gestein an den Moosen deutlich feuchter als im moosfreien Grünsandstein, was auf die Wasserspeicherkapazität der Moose zurückzuführen ist. Die Wurzeln greifen den Grünsandstein oberflächlich an, das Wasser löst das Karbonat heraus, was zur Absandung führt.

Die weiter oben besprochenen Kleinröhren von Oberndorf 2 führen viel abgestorbene Moose mit sich. Dies erhöht lokal den Anteil an biogenem CO_2 , was den Grünsandstein in Verbindung mit Wasser leichter auflösen kann.

Fazit: Moose dienen als lokale Wasserspeicher. Einerseits wird durch das so erhöhte Wasserangebot die Auflösung von Karbonaten im Grünsandstein in bescheidener Weise begünstigt. Andererseits kommt es unter solchen Bedingungen zur vermehrten Abgabe von biogenem CO_2 . Beide Faktoren tragen sekundär zur Hohlraumbildung bei. Dieser Vorgang ist bei aktiven Moosen auf die tagnahen Bereiche einer Höhle begrenzt.

Organische Stoffe:

Über Klüfte und Gänge werden organische Substanzen (Laub, Holzstückchen, wenig Detritus usw.) in die Höhlen eingeschwemmt, nur Oberndorf 1 bleibt fundleer. "Durch Oxydation dieser Substanzen, insbesondere der Humusstoffe, wird biogenes CO_2 frei. Dort, wo Höhlenlehme und Spaltenfüllungen von Wasser durchsetzt werden, kann der biogene CO_2 -Anteil erheblich anwachsen. Es besteht also ein echter Zusammenhang zwischen der Lösungsfähigkeit des Wassers und dem Vorhandensein von organischen Substanzen, deren Oxydierbarkeit von der Wassertemperatur und dem Gehalt an freiem, gelöstem Sauerstoff abhängt" (APEL 1971: 284). In Ihrlenstein bildet sich an der Basis der (weiter oben) beschriebenen Kluft eine 20 cm lange Hohlkehle unmittelbar über dem Niveau der Humusschicht. Der Grünsandstein unter Böden mit Humusstoffen zeigt erhöhte Bergfeuchte und ist deutlich stärker entfestigt als bei geringer Feuchte. APEL erkannte obigen Zusammenhang für den Jura. Im Falle der Grünsandsteinhöhlen läßt sich die Beziehung zwischen der biogenen Aktivität von Humusstoffen und Wasser (Bergfeuchte) bestätigen.

Fazit: Humusstoffe fördern in Verbindung mit Wasser oder erhöhter Bergfeuchte die Entfestigung des Gesteins und erleichtern somit das Absanden bzw. eine Eintiefung des Bodens. Der

vorliegende Formenschatz (vgl. Kleinröhren) spricht dafür, daß es im Rahmen der Eintiefung zugleich auch zu einer seitlichen Ausdehnung kommt. In einem Spätstadium resultieren hieraus sich nach unten verbreiternde Formen, die am Top klufffrei sind.

Die Rolle des Brauneisens bei der Gesteinsauflösung.

Brauneisen findet sich als sekundäre Imprägnation im Grünsandstein gern in Form von Knollen, Taschen, Bändern, Fahnen oder Leisten. Es kommt erwartungsgemäß in allen Höhlen vor, wobei Leisten und Knollen am häufigsten zu beobachten sind. Die genannten Formen präparieren sich in Grünsandsteinhöhlen bevorzugt aus dem Felsverband heraus (Grundlose Grube, Ihrlerstein, Oberndorf 1 und 2). Ihr Erscheinungsbild reicht von mm-großen Härtlingen (Oberndorf 1 und 2) bis zu freistehenden Fahnen zwischen 10x2 cm (Ihrlerstein) und 100x8 cm (Grundlose Grube, hier mit einem Restmantel von Grünsandstein). Die Lösungsfähigkeit des Brauneisens wird im sauren, reduzierten Milieu sehr stark erhöht. Grundsätzlich ist dieser Vorgang auch für den Grünsandstein zu erwarten. Die Härtlinge sprechen aber dafür, daß sich das saure, reduzierende Milieu nicht einstellt und somit dem Karbonat eine derart puffernde Wirkung zukommt, daß die Auflösung des Brauneisens verhindert wird.

LÄSSER & FEIZLMAYR (1994) fanden bei den Arbeiten am Tunnel von Bad Abbach im Hangenden und Liegenden der Eibrunner Mergel die Kontaktbereiche grau verfärbt, was auf reduzierendes Milieu in den Mergeln hinweist. Im Liegenden traten feine Pyritanflüge auf. Das Liegende ist dem Oberen Grünsandstein zuzurechnen.

Während sich im Bad Abbacher Tunnel an der Grenze zwischen Eibrunner Mergel-Oberer Grünsandstein Hinweise für ein reduzierendes Milieu ergeben, sprechen die Härtlinge in den Höhlen gegen ein reduzierendes Milieu im Unteren Grünsandstein. Diese unterschiedliche Ausprägung erklärt sich durch die Pufferwirkung des Karbonats im Grünsandstein: Saure Wässer gelangen über den Eibrunner Mergel in den Oberen Grünsandstein. Im Laufe der Tiefenverfrachtung dieser Wässer wirkt das im Grünsandstein vorhandene Karbonat neutralisierend. Die Lösung von Brauneisen wird gestoppt. Es kommt zur Härtlingsbildung.

Fazit: Brauneisenanlagerungen können daher nicht als Mitwirkende bei der Hohlraumbildung angesprochen werden. Hieraus ergibt sich ein grundlegender Unterschied zu den reinen Sandsteinhöhlen (STRIEBEL 1994), in denen sie als wichtiger hohlraumbildender Faktor eingestuft werden.

Kuppelförmige Räume.

Innerhalb des Grünsandsteins finden sich kuppelförmige Räume. Die Formenvielfalt beginnt bei mehrfach gewölbten Deckenkuppeln in Oberndorf 2. In Oberndorf 1 ist die zentrale Halle im Eingangsbereich deutlich elliptisch geformt. Diese Deckenkuppel verläuft größtenteils auch unabhängig von vorhandenen Klüften. In der Höhle am Pfaffensteiner Tunnel ragt die Deckenkuppel im Grünsandstein sogar 1,5 m über den ursprünglichen Wasserzubringer hinaus. Die Grundlose Grube zeigt als Besonderheit in der Grünsanddecke eine fast kugelige Kuppel mit 1,5 m Durchmesser und einer Austrittsöffnung von 80 cm an der Basis dieser Kuppel. In der nur untergeordnet mürben Kuppel, die im untersten Teil des hier grobkörnigen, Unteren Grünsandsteins liegt, finden sich keine Klüfte und Schichtfugen. Nach den derzeitigen Erkenntnissen kann die Kuppel nur durch Wasserdruck entstanden sein. Speziell im Falle der Grundlosen Grube spricht vieles für diese Wasserdrucktheorie. So finden sich nur 2 m neben

der Kuppel auf gleicher Höhe mehrere, markante Auswaschungen im Gestein von 4 m Höhe und 1,5 m Breite (Abb.10). Außerdem zeichnet sich nur wenige Zentimeter neben der Kuppel im Grünsandstein ein ostwest-gerichteter Paläofluß (Abb.11) nach, der als Wasserzubringer in Frage kommt. Am Südostende dieses Flusses ist das ursprüngliche Profil noch erhalten. Danach floß das Wasser postkretazisch auf dem Top des Weißjura. Das Profil zeigt ferner, daß dieser Fluß den Grünsandstein an der Decke weiter abtrug. Über die Tiefenerosion dieses Flusses können keine Aussagen mehr gemacht werden, da das Liegende aus Massenkalk durch Verkarstung auf mehrere Meter abgetragen wurde.

In Oberndorf 1, Oberndorf 2 und im Pfaffensteiner Tunnel findet sich ein ursprüngliches Fließgerinne nurmehr als Rudiment an der Höhlensohle. Die Ausweitung zur Kuppelform entstand dort allmählich durch ein Wechselspiel aus Absandung und Erosion. Dabei kann es durch den Einfluß von biogenem CO₂ lokal zur Verstärkung des Effekts gekommen sein. Die Existenz dieser kluftlosen Hohlräume zeigt, daß gelöste Grünsande nicht nur entlang von Klüften verfrachtet werden können. Die kluftübergreifende Kuppel in Oberndorf 1 (Abb.5) zeigt, daß die Hallenbildung dort erst nach der Zerklüftung des Grünsandsteinpakets begonnen haben kann. Die Höhle im Pfaffensteiner Tunnel (Abb.3) zeigt durch ihre um 1,5 m über dem Wasserzubringer liegende Kuppeldecke, daß dieser Aushöhlungsprozess nicht nur unter phreatischen Bedingungen, also unter Wasserdruck, fortschreiten kann. Die hier vorliegenden Ergebnisse sprechen im Einklang mit den Ergebnissen zur Entstehung von Röhrenstrukturen für die Möglichkeit vadoser Hohlraumbildung im Grünsandstein. Zugleich zeigen die Kuppeln, daß Hohlraumerweiterungen im Grünsandstein auch ohne Klüfte möglich sind, sofern ein entsprechend dimensionierter Weg zum Abtransport des gelösten Grünsandsteins zur Verfügung steht.

Schächte im Juragestein.

Die nachfolgend beschriebenen Juraschächte, die unterschiedlich zu solchen im Grünsandstein ausgebildet sind, stehen mit diesem hydraulisch in unmittelbarer Verbindung. Über die Morphologie der Schächte ergeben sich Kenntnisse über die Fließrichtung des Wassers. Diese wiederum ist von großer Bedeutung zur Klärung der Genese der Hohlraumformen im Grünsandstein. Eine Beschreibung der Schächte ist daher ein wichtiger und unverzichtbarer Baustein dieser Arbeit.

Abwärts gerichtete Wässer erzeugen im Juragestein grundsätzlich andere Hohlraumformen wie aufwärts gerichtete. Da die Hohlräume im Laufe ihrer Entwicklung oft überformt werden, ist eine klare Grundlage zur Bewertung ihres Urzustandes nötig. Aus dieser Erkenntnis systematisierte BÖGLI (1978) verschiedene Leitformen der Höhlenentstehung.

Im Untersuchungsraum finden sich in zwei Höhlen Schächte mit hydraulischer Verbindung zwischen dem Grünsandstein und dem Jura:

a) Pfaffensteiner Tunnel:

Der Juraschacht stößt mit seiner Oberkante unmittelbar an eine kuppelförmige Halle im Grünsandstein an. Der mittlere Durchmesser des Grünsandsteinganges beträgt 75 cm .

b) Grundlose Grube:

Das Top des Juraschachtes liegt frei zugänglich im Südteil der Höhle. Im Hangenden des Unteren Grünsandsteins bestehen direkt oberhalb dieses Schachtes 3-5 m lange und bis zu 4 m hohe Hohlräume. Geringe Tropfwasserbildung (1 Tropfen/sec) findet sich in den Hohlräumen,

die direkt über dem Juraschacht liegen. Die Entstehung dieses Schachtes läßt sich einfach erklären: Sickerwasser gelangen über Klüfte in die Tiefe. An lokal begünstigter Stelle kam es durch diese tropfenden Sickerwässer zur Vergrößerung einer Spalte im Jura. Dabei konnten gelöste Grünsande ebenfalls tiefer verfrachtet werden. Das erklärt die Hohlräume oberhalb des Juraschachtes.

Seine Entstehung im Pfaffensteiner Tunnel läßt sich vordergründig auch mit der Bildung des Schachtes in der Grundlosen Grube erklären. Jedoch bedürfen die komplexen Schacht- und Gangverhältnisse einer besonderen Würdigung:

Schächte mit abwärtsgerichtetem Wasserlauf werden nach GEZE (1953: 11-23) unterschieden in:

1. Einsturzschächte. Sie entstehen durch den Einsturz unterirdischer Hohlräume.

Pfaffenstein: Der vorliegende Schacht zeigt sich jedoch nicht mit Versturzmateriale, sondern mit einer glatten, trockenen Wand. Das Vorhandensein von Kalkbrocken und Kalksplintern am tiefsten Punkt der Spalte weist zwar auf inkasive Ereignisse hin. Diese sind aber nur von untergeordneter Bedeutung gewesen, da der gesamte Gesteinsverband des Schachtes in primärer Lagerung vorliegt. Die Bezeichnung dieses Schachtes als Einsturzschacht ist darum abzulehnen.

2. Tektonische Schächte. Sie bilden sich durch die Erweiterung von Klüften und steilstehenden Schichtfugen.

Pfaffenstein: Der vorliegende Schacht weitet sich entlang einer südsüdost-gerichteten Kluft infolge von Verkarstung oval-ellipsoid aus. Daher ist er als tektonisch verursacht einzustufen.

3. Schluckschächte sind durch einfließendes oder einsickerndes Wasser entstanden.

Pfaffenstein: Diese Bedingung ist im vorliegenden Fall sicher erfüllt. Die Wässer drangen über den Gang im Grünsandstein in den Juraschacht ein und erweiterten ihn korrosiv.

Die Schächte mit aufwärtsgerichtetem Wasserlauf unterscheidet er in:

1. Quellschächte. Sie haben sich durch aufquellendes Wasser gebildet.

Pfaffenstein: Die direkt über dem Schachtmund liegende, rundliche Höhle im Grünsandstein könnte durch Auswaschung mit einem darunterliegenden Quellschacht leicht erklärt werden. Dies setzt voraus, daß sich unter dem Schacht ein geschlossener Karstwasserpegel befindet. Die Zuläufe zu diesem Quellschacht müßten dann hydrisch geformt sein. Wird die hydrische Formung bestätigt, ließe sich die Höhle als von unten nach oben erweitert betrachten. Zur Klärung der Frage bedarf es der ergänzenden Untersuchung am basalen Gang dieses Schachtes, siehe untenstehend. Der Gang im Grünsandstein der Höhle wäre dann als sekundäres Ereignis nach Tieferfallen des Vorfluters zu erklären.

2. Piezometerschächte. Sie werden durch das Auf und Ab des Wasserspiegels in der Hochwasserzone geschaffen (Druckspiegel). Hier findet das unter "Quellschächte" Gesagte ebenso Anwendung.

Der basale Horizontalgang des Schachtes:

Dieser Gang hat Schlüsselfunktion für die Bewertung der Genese der gesamten Höhle. Es seien die Zusammenhänge daher kurz dargestellt.

Für die speläogenetische Bewertung der Höhle bzw. der Gänge ist es notwendig, den ursprünglichen Weg des Wassers zu erkennen sowie die vorhandenen karsthydrographischen Zonen

richtig zu erfassen.

So gibt es zwei Möglichkeiten:

1) Das Wasser fließt über ein Gerinne abwärts. Das setzt ein nicht mit Wasser erfülltes Hohlraumssystem voraus. BÖGLI (1978: 213) nennt diesen Bereich vados.

2) Das Wasser steigt durch Druck auf (z.B. Piezometerflächen). Dies setzt ein mit Wasser erfülltes System voraus. BÖGLI (1978: 213) nennt diesen Bereich phreatisch.

Vadose als auch phreatische Systeme erzeugen spezielle Formen, die typisch für ihre Entstehung sind. Als Leitformen der phreatischen Entstehung für Gänge bezeichnet BÖGLI in diesem Zusammenhang:

a) Schichtfugengänge. Wäre die Höhlenbildung im Grenzbereich Jura-Grünsandstein unter phreatischen Bedingungen entstanden, hätte sich in dieser 2-5 cm dicken Schicht mit sandig-lehmigen Sedimenten ein Schichtfugengang bilden müssen. Das ist aber nicht der Fall. Darum kann es sich hierbei nicht um einen Schichtfugengang handeln.

b) Symmetrische, elliptische Querschnitte in Gängen. Der kleine dreieckige Gang im Jura unterhalb des Schachtes läßt keine Merkmale früherer hydrischer Formung erkennen. Es fehlt völlig der Ansatz einer gerundeten Decke. Darum kann dieser Gang nur vados, also ohne Wasser, entstanden sein. Tektonisch bedingte Zerrungen sind nicht auszuschließen.

Zusammenfassung zur Fließrichtung des Wassers in Schacht und basalen Gang in der Pfaffensteiner Höhle:

Der Gang im Grünsandstein verläuft in einer überformten Kluft. Er mündet in einen rundlichen Hohlraum, dessen Größe sich weitgehend durch das Wechselspiel von Versturz-Auflösung-Abtransport der Versturzkomponenten erklären läßt. Der Juraschacht verläuft entlang einer Kluft, die sich nicht im Grünsandstein fortsetzt. Die Genese von Grünsandstein-Gang und Schacht sind daher als zeitlich getrennt abfolgende Ereignisse anzusehen. Wenngleich für die Entstehung des Juraschachtes phreatische als auch vadose Verhältnisse denkbar sind, so zeigt der basal anschließende Gang, daß auch der Schacht vados entstanden ist und Wässer nur von einem höheren Niveau kommen konnten. Darum wird seine Klassifizierung als tektonisch vorgezeichneter Schluckschacht vorgeschlagen.

Nachdem der Grünsandstein hydrologisch mit dem Jura verbunden ist, legt dies den Schluß nahe, daß auch die weiter oben gelegenen Hohlräume im Grünsandstein vados entstanden sind. Die dort gefundenen Hohlformen sind rundlich bis ellipsoid. Während solche Formen im Jura als phreatische, unter Wasser entstandene Formen beschrieben werden, ist die vorliegende Höhle unter vadosen Bedingungen vergrößert worden.

Weitere Untersuchungen an diesem Objekt sind nicht mehr möglich, da es im Rahmen der Baumaßnahme mit Schotter verfüllt wurde.

Klüfte.

Klüfte sind für die Hohlraumbildung in Grünsandsteinhöhlen von großer Bedeutung. Sie bilden einen möglichen Weg für den Abtransport von gelöstem Grünsand. Plombierte Klüfte scheiden als aktiver Transportweg aus.

Klüfte treten in Höhlen aus Grünsandstein in verschiedenen Formen auf. In Oberndorf 1 finden sich einerseits calcitgefüllte Klüfte mit 3-10 mm Breite und andererseits unverfüllte Klüfte mit

1-80 cm Breite. In der Dantschermühle ist die 20 cm breite Hauptkluft innerhalb der Höhle mit verfrachteten Oberflächensedimenten verfüllt. Die unverfüllte Eingangskluft in der Höhle Dantschermühle zeigt im Gegensatz zur Fundlage in Oberndorf 1 deutliche Lösungserscheinungen an den Kluftflächen, die durch Auswaschung und Absandung entstanden sind. Solche Lösungsformen wurden von LÄSSER & FEIZLMAYR (1994) auch für den Tunnel Bad Abbach beschrieben. In der Grundlosen Grube sind die 10-15 m langen Hauptklüfte unverfüllt und nicht breiter als 1 cm. Über die Kluftbreiten in der Höhle im Pfaffensteiner Tunnel liegen keine Angaben vor.

Im Gegensatz zu obigem Befund fanden LÄSSER & FEIZLMAYR (1994: 16) beim Tunnelbau von Bad Abbach ab Station 425 m eine große Fülle an Klüften mit einer mittleren Kluftlänge von 3-5 m bei einem mittleren Durchmesser von 0,5 m. Außerdem war praktisch jede Großkluft verkarstet.

Oberndorf 1 zeigt eindrucksvoll die kleinräumige Koexistenz von Klüften mit Lösungserscheinungen (Abb.5, Profil d-d') und Zerrklüften (Abb.5, Profil a-a'). In dieser Höhle streichen drei Hauptklüfte innerhalb eines Kreuzkluftgefüges ostwestlich mit 50° Neigung. Diese 3-7 mm breiten und 2-20 mm tiefen Klüfte sind fast durchgehend mit weißem Calcit plombiert. Die Klüfte liegen alle im Unteren Grünsandstein; in Abb.5/ Profil c-c' wird diese Situation verdeutlicht. Das Profil d-d' in Abb.5 liegt genau in der Verlängerung einer dieser Kluftlinien. Ein genetischer Zusammenhang zwischen beiden Klüften muß jedoch nicht bestehen. Das genannte Profil d-d' entstand jedoch nicht durch Abschiebung, weil Seitenwände und Gangsohle primär gelagert sind. Gerade das canyonartige Profil spricht für ein langsames Eingraben des Ganges, das wiederum nur durch erosive oder korrosive Abtragung denkbar ist.

Das Kluftbild in obigem Profil a-a', das im Grünsandstein liegt und durch eine Spalte ohne Lösungsformen geprägt wird, ändert sich im darunterliegenden Plattenkalk zu schichtfugengebundener Verkarstung. Der unmittelbare Übergang von Grünsandstein zu Plattenkalk führte zu einem allmählichen Abtrag des Liegenden. Im Profil d-d' jedoch kam es nicht zu diesem Abtrag, da der Plattenkalk noch nicht angeschnitten wurde. Hier entwickelte sich das Profil innerhalb des Grünsandsteins und erzeugte eine sich vertikal leicht verbreiternde muldenförmige Eintiefung.

Einfluß von Schichtfugen auf die Gefügesteifigkeit.

Die Grundlose Grube ist ein hervorragendes Beispiel einer Abrasionsplattform. Hier findet sich eine nahezu tischebene Decke aus Unterem Grünsandstein, die in Teilabschnitten zwischen 15x15 m bzw. 30x5 m völlig frei tragend ist. Hinweise auf Spannungen im Gestein, die die Decke zum Einstürzen bringen könnten, finden sich nicht. Im Dezember und Januar 1995 befuhr die Forstverwaltung Kelheim im Rahmen von Waldarbeiten mit schwerem Gerät den Waldboden über der Höhle. Eine Kontrollbegehung der Höhle im Juni 1996 durch die Gruppe Karst- und Höhlenforschung, Regensburg, brachte keine Erkenntnisse über neue Spannungsrisse. Die vorliegenden Beobachtungen weisen auf eine hohe, baustatische Festigkeit dieser Decken aus Grünsandstein hin. Andererseits muß aber angefügt werden, daß bei der geologischen Beschreibung der Höhle Dantschermühle neben einer Verwerfung von 32 cm auch ein junges Bruchliniengefüge beschrieben wird, so daß diese Höhle als "mittelfristig einsturzgefährdet" zu bezeichnen ist. Außerdem befindet sich am höchsten Punkt der Höhlendecke von

Oberndorf 1 eine 10 cm tiefgehende, fast kreisförmige Deckenverwitterung. Innerhalb dieser Form besteht eine horizontal ausgerichtete Abschuppung mit Plättchen von max. 5x2 cm Ausdehnung. Die Bildung dieser Deckenverwitterung läßt sich weniger mit Druckveränderungen begründen, da die kuppelförmige Hallenhöhle an allen Seiten ein solides Auflager hat und am Top noch mindestens einen Meter Überdeckung aufweist. Die Entstehung dieser Deckenverwitterung läßt sich eher durch Schwächezonen innerhalb des horizontal geschichteten Grünsandsteins begründen: So finden sich innerhalb dieses Verwitterungsbereiches mehrere horizontale Schichtfugen. An diesen Fugen orientieren sich die vielzähligen Abschuppungen. Ergänzend sei noch erwähnt, daß in der gesamten Decke - auch innerhalb der Schichtfugen - kleine Löcher von 1-3 cm Tiefe und maximal 2 cm Breite zu finden sind. In einigen dieser Löcher finden sich diverse Kellerasseln, Tausendfüßler und Spinnen. Diese sich nahezu widersprechenden Belege erlauben beim heutigen Kenntnisstand keine klaren Aussagen über die Tragfähigkeiten von Grünsandsteindecken in Höhlen, zeigen jedoch sehr wohl, daß der Grünsandstein - erwartungsgemäß - lokal unterschiedliche Festigkeiten aufweist.

Inkasion.

Inkasion umfaßt alle Begriffe, welche das natürliche Nachbrechen aus Decken eines unterirdischen Hohlraumes bezeichnen. Dies Nachbrechen ist nur möglich, wenn der Gebirgsdruck oder das Gewicht von Gesteinsanteilen in der Decke die örtliche Festigkeit des Gesteins überschreitet (BÖGLI 1978: 147). Beispiele für Inkasion finden sich

- a) in Oberndorf 1: Im Höhleneingang gibt es kreuzkluftgebundene Inkasion mit eckig-kantigen Ausbrüchen,
- b) in der Grundlose Grube: Inkasionsschutt aus Grünsandstein versperrt im westlichsten Abschnitt des Südteils eine weitere Begehung,
- c) im Pfaffensteiner Tunnel: Auf dem Schachtmund des Juraschachtes lagen bei der Entdeckung des Objektes bis zu m³-große Inkasionstrümmer aus Grünsandstein.

Inkasion richtet sich beim Losbrechen nach vorhandenen Fugen oder Spaltbarkeiten. Sie ist nicht karsthydrographisch von Bedeutung. Die gefundenen Trümmer reichen von cm-großen Stücken bis zu Kubikmetervolumina. Gerade diese großen Stücke zeigen, daß Hohlraumveränderungen im Grünsandstein nicht nur durch Absandung erfolgen können, sondern auch spontan durch Inkasion. Wie der tiefste Punkt der Höhle Grundlose Grube aufweist, können diese Inkasionstrümmer im Laufe der Jahre gelöst und verfrachtet werden. So finden sich in den Gängen des untersten Stockwerks dieser Höhle in einer Tiefe von $t = -31$ m unter der Grünsandsteinbasis ca. 25 m³ an gelöstem Grünsand als Reste eines Verfrachtungsprozesses.

Exfoliation (Zwiebelschalenbruch).

Bei der Exfoliation, dem Zwiebelschalenbruch, handelt es sich um Druckspannungen im Gestein, die zu schalig gebogenen Inkasionstrümmern führen. Diese Bruchformen lassen sich für den Grünsandstein an der Dantschermühle nachweisen. Hier finden sich Zwiebelschalenbrüche an beiden Seiten des Höhleneingangs. Die stärksten Brüche sind unmittelbar über dem Boden zu beobachten. Sie tragen Grünsandstein in einer Mächtigkeit von bis zu 10 cm schalig ab. Die gefundenen Brüche sind in einem Gesamtzusammenhang zu betrachten. Wie erwähnt findet sich der Eingang in mehrfach gestörter Lagerung mit Versatz um 32 cm im Osten. Diese Störungen beanspruchen die Seitenwände des Höhleneingangs, also besonders die Auflager.

Dabei kommt es zur Exfoliation und somit zur weiteren Schwächung der Auflager. Die Höhle an der Dantschermühle befindet sich somit im Greisenstadium (BÖGLI 1978), ihr Einsturz kann nicht ausgeschlossen werden.

Zum Alter der Grünsandstein-Höhlen

Die Situation in der Höhle im Pfaffensteiner Tunnel erlaubt eine Bewertung:

BAUBERGER (1969: 33) sieht am Pfaffensteiner Tunnel einen "doch wohl altkreidezeitlich angelegten Karst, (wobei sich im Quartär) die Hohlformen des Unterkreide-Karstes postum, jedenfalls nachkretazisch, wieder aktiv bemerkbar machten". Dem Verfasser ist recht zu geben, wenn es sich bei diesem "altkreidezeitlichen Karst" lediglich um das Initialstadium der Höhlenbildung im Liegenden des Jura handelt und der Schacht selber in der Kreidezeit noch nicht bis zum Hangenden des Grünsandsteins reichte.

Der Juraschacht stößt unvermittelt auf den Grünsandstein, der Spaltenverlauf des Schachtes endet abrupt an der Grenzschicht Jura-Grünsandstein. Er zeichnet sich nicht im Grünsandstein fort. Dies spricht für eine tektonisch bedingte, postcenomane Kluft als Erzeugende des Juraschachtes. Außerdem beschreibt BUCHNER im Schacht keine Spuren ehemaliger Verfüllung und erneuter Reaktivierung. Nach MEYER (1972: Erläuterung zur Geologischen Karte 25, Nr.6033) ging im anschließenden Tertiär die Verkarstung des Malm auch unter der Kreidedecke weiter. In der Folge kam es zum Nachsacken von Kreidesedimenten. Da die vorliegende Hohlform jedoch unverfüllt ist, kann Tertiär ausgeschlossen werden. Es wird vorgeschlagen, die Genese dieser Höhle erst in das Quartär zu stellen. Gegen eine Erweiterung der Höhle in Kreide/Tertiär spricht ergänzend der Hinweis für eine Höhlenentstehung unter - zumindest überwiegend - vadosen Bedingungen. Diese herrschten aber erst nach Absenkung des Karstwasserpegels auf ein niedrigeres Vorflutniveau der Donau. Bei dem geringen Niveauunterschied zwischen heutiger Donau (= 332 m üNN in Regensburg) und der Höhle (352 m üNN) von nur 20 m spricht dies für ein nicht zu früh im Quartär beginnendes Ereignis. In der Zusammenschau der Einzelerkenntnisse betrachtet der Verfasser den wesentlichen Teil der Hohlraumbildung als quartäres, wahrscheinlich pleistozänes Ereignis.

Ausblick

Zur Ausbildung von Hohlräumen bedarf es im Grünsandstein diverser Faktoren wie z.B. Klüftigkeit des Gesteins, Absanden, Auswaschung, Lösungsvorgänge und Versturz. Diese Faktoren können einzeln oder auch in Wechselwirkung miteinander auftreten.

Höhlen im Grünsandstein finden sich als Hallenhöhle, Ganghöhle, Klufthöhle oder bestehen aus einer Mischung dieser drei Typen.

Während sich Höhlen im Juragestein bevorzugt "klassisch" entlang von erzeugenden Spalten bilden und daher die Form eines umgedrehten Trichters aufweisen, sind die Hallen, kleinen Decken oder Gänge der Grünsandsteinhöhlen bevorzugt ellipsoid. Während diese Formen in Weißjura-Höhlen als phreatisch - also unter Wasserdruck - entstandene Druckformen angesehen werden können, können sich im Regensburger Grünsandstein diese Formen phreatisch als auch vados entwickeln: Der geologische Höhenschnitt durch die Höhle im Pfaffensteiner Tunnel (Abb.3) veranschaulicht die dabei entstehende Kuppelform. Gleichzeitig zeigt er aber

auch, daß sich die Kuppel über den ehemaligen Wasserzubringer ("oberer Gang") vertikal nach oben vergrößert hat. Darüberhinaus vergrößern sich die Kuppeln seit vielen Jahren in allen Höhlen auch ohne steten Wasserdruck durch Abschuppung und Absandung. Die ursprünglich angelegte Kuppelform wird dabei offensichtlich erhalten. Zusammenfassend entstanden die behandelten Höhlen im Grünsandstein wahrscheinlich durch ein phreatisches Initialstadium. Ihre Weiterentwicklung ging dann unter hochwasserähnlichen Bedingungen (phreatisch-vados) weiter und erlag an einigen exponierten Stellen nach dem endgültigen Trockenfallen (= vados). Die Entwicklung der Grünsandsteinhöhlen schreitet durch Absandung, Abschuppung, Inkasion, Wassereinwirkung, Einwirkung von Pflanzen und Tieren, Erosion, Korrosion auch gegenwärtig noch fort.

Es kann nicht nur durch Auflösen von Karbonat zum Absanden kommen, sondern auch durch Auswaschung. Eine Kombinationswirkung zwischen Auswaschung und Absanden ist denkbar und wurde in der Grundlosen Grube belegt (erst Auswaschung, dann Absanden).

Klüfte sind ein ideales Medium für die Verfrachtung gelöster Grünsande. Das zeigt sich besonders im Falle der Grundlosen Grube. In anderen Höhlen wie Dantschermühle, Oberndorf 1 und Oberndorf 2 erfolgte jedoch der Abtransport der gelösten Grünsande über nur sehr geringe Neigungen in Gängen. Klüfte spielten hier nur eine untergeordnete oder gar keine Rolle. Höhlen im Grünsandstein entwickeln sich nicht nur entlang von Klüften, sondern auch entlang von schwach geneigten Fugen. Dabei kann es zur Angliederung von kleineren, zylindrischen, blind endenden Röhren kommen, die weder Kluft- noch Fugenbindung aufweisen. Das Vorhandensein eines primären offenen Transportweges für den Abtransport des gelösten Grünsandes ist Voraussetzung für jegliche Art der Gang- oder Höhlenausweitung. Für die Vergrößerung eines Hohlraumes und auch für den weiteren Abtransport in tiefere Schichten sind mehrere Faktoren verantwortlich. Sie können einzeln oder synergetisch wirken. Hier sind zu nennen: Alle Zwischenstufen zwischen Absanden, Abschuppung, Inkasion, Erosion, Korrosion und Mischungskorrosion.

Der Verfasser bedankt sich für die freundliche Unterstützung an dieser Arbeit bei den Herren Dr. Buchner von der Autobahndirektion Regensburg, Dr. Endlicher vom Mineralogischen Institut Regensburg, Ferdinand Leja, Landesamt für Denkmalpflege Nürnberg, Dr. Striebel vom Geoökologischen Institut der Universität Bayreuth. Besonderer Dank gebührt an dieser Stelle Herrn Dr. Martin Röper sowie der Gruppe Höhlenforschung Regensburg (Christoph Blöchl, Horst Heckel, Michael Wehrstedt) für die unermüdliche Unterstützung bei den unzähligen Exkursionen und Höhlenbesuchen.

Literaturverzeichnis

- APEL, R. (1971): Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der Südlichen und Mittleren Frankenalb.- Geol.Bav.64: S.268-354; München (GLA)
- BAUBERGER, W. et al. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt Nr. 6938 Regensburg, 414S; München (GLA)
- BAUSCH, W. & A.ZEISS (1966): Zur Zusammensetzung des Kelheimer Riffkalks.- Geol.Bl.NO-Bayern, 16, S.240-242; Erlangen
- BÖGLI, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie; Berlin, Heidelberg, New York, Springer
- BUCHNER, A. (1966 a): "Stollenabwicklung des Versuchsstollens Pfaffenstein", Lfd.Nr.34 vom 22.11.1966, Straßenneubauamt Regensburg, Bauleitung, 1 Zeichnung, Manuskript, Regensburg; unveröffentlicht, 22.11.1966

- (1966 b): Geologische Dokumentation "Versuchsstollen Pfaffenstein: Angefahrene Hohlräume im Malmkalkstein und Grünsandstein bei km 7 + 171,25", 2 S., Manuskript, Straßen-Neubauamt Regensburg, Bauleitung, 1 Grundriß, Regensburg; unveröffentlicht, 24.11.1966
- ENDLICHER, G. (1996): Petrographische Kurzbeschreibung der Grünsandsteinproben, briefliche Mitteilung a.d. Verfasser, Staatl. Forschungsinst. f. angewandte Mineralogie, Regensburg; unveröffentlicht, 22.01.96
- FERSTL, H. (1950): Die geologischen Verhältnisse des Laber-Gebietes westlich Velburg. Dipl. Arbeit, Erlangen, (Manuskript) (mit tektonischer Karte, zitiert in Müller, S.24)
- FREYBERG, v. B. (1969): Tektonische Karte der Fränkischen Alb und ihrer Umgebung.- Erl.geol. Abh., 77; Erlangen
- GAUDA, M. et al. (1982): Röhrenstrukturen und röhrenförmige Höhlen im pfälzischen Buntsandstein.- Abh.z.Karst-u. Höhlenkunde, Reihe A Heft 20
- GEZE, B. (1953): La genèse des gouffres.- Ier Congr. Int. Spéléol. 1952; Paris
- GOCKEL, P. (1996): Geschichte und Geschichten der Höhle Grundlose Grube bei Kelheim, in: Die Oberpfalz, März/April 1996; Verlag Laßleben, Kallmünz
- HASSELMANN, F. (1892): Vortrag über geologische und geognostische Verhältnisse der Steinbrüche zu Kapfelberg und Poikam, 16 S., S.9; Regensburg
- HERM, D. (1978): Die süddeutsche Kreide - ein Überblick, in: Aspekte der Kreide Europas. IUGS Series A, No 6, Seite 85-106; Stuttgart
- (1981): Die Kreide des Regensburger Golfes, in: Geologica Bavarica, 82, S.53-55, 70 Abb., 7 Tab, 13 Taf.; München
- (1982): Die süddeutsche Kreide - ein Überblick, 2. Kreidesymposium München; Juni 1982, Manuskriptdruck, 22 Seiten, 2 Abb.
- KNUST & WEBER (1987): Röhrenförmige Strukturen und Röhrenhöhlen im Sandstein.- Karst u. Höhle 1986/87, 102-110
- LANGE H. & PAULUS B. (1971): Stratigraphie und Fazies des Gault und Cenoman der Wasserburger Senke im Bayerischen Molasse-Untergrund.- Erdöl-Erdgas-Z., 87: 150-173, 11 Textfig; Hamburg
- LÄSSER & FEIZLMAYR, Ingenieurgesellschaft (1994): Baugeologischer Schlußbericht, Tunnel Bad Abbach, Markt Bad Abbach, Manuskriptdruck, Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr, Innsbruck, unveröffentlicht, 1994
- MÜLLER, W. (1980): Zur morphologischen Entwicklung der Fränkischen Alb im Bereich der Laber-Flüsse.- Abh.Karst-u.Höhlenkunde, Reihe A, Heft 18; München
- MURAWSKI, H. (1983): Geologisches Wörterbuch, 281 S., 8. Auflage, 1.Aufl. 1937; Enke, Stuttgart
- OSCHMANN, F. (1958): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 7038 Bad Abbach, Erl.z.Geologische Karte, 184 S.; München
- PRÖSSL, K.-H. (1992): Hydrogeologische Systemanalyse der Trinkwassereinzugsgebiete im südlichen Jura-Karst der Oberpfalz, Studie d. Sachverständigenbüros f. Grundwasser Prösl, Erding und Watec, Markt Schwaben für ARGE Wasserversorger Jura-Karst Oberpfalz, unveröffentl. Manuskript.; Erding
- RIEGEL, W. (1958): Erläuterungen zur geologischen Teilkartierung auf dem Gradabteilungsblatt Laaber 6937 der topographischen Karte 1:25.000; Diplomarb. Würzburg
- RÖPER, M. (1997): Eine neue Fundsituation in den Eibrunner Mergeln von Bad Abbach (Regensburger Oberkreide/Oberes Cenomanium bis Unteres Turonium).- Acta Albertina, in diesem Heft
- RUTTE, E. (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000, Blatt Nr. 7037, Kelheim, 243 S., 25 Abb., 3 Beil.; München
- STREIM, W. (1961): Malm und Oberkreide auf Blatt Laaber, Erl.geol.Abh., H.39, 26 S.; Erlangen
- STRIEBEL, T. (1994): Zur Genese der Sandsteinhöhlen in der Umgebung von Bayreuth/Oberfranken (Bayern, Deutschland).- Proc.5th Pseudokarst Symposium with Internat. Participation, Szczyrk, Bielsko-Biala, Poland, 17-19

Höhlenkataster:

ILLMANN: Höhlenkataster Frankenalb, Renate Illmann, Pfälzerstr. 26 a, 91052 Erlangen

Verfasser: Peter Gockel, Am Südhang 29b, 84107 Weihmichl

