

Die Wetterführung der Salzgrabenhöhle (1331/29) bei Berchtesgaden

Roger Schuster & Gerhard Novak*

18. Juni 1999

Zusammenfassung

In den Jahren 1982–1987 wurde die Salzgrabenhöhle speläometeologisch untersucht, wobei besondere Aufmerksamkeit der Wetterführung galt. Nach thermodynamischen Gesichtspunkten kann zwischen exogenen und endogenen Faktoren der Bewetterung unterschieden werden.

Dabei überwiegen in ihrer Wirkung die exogenen Faktoren, zu denen hauptsächlich Temperatur- und Druckdifferenzen zwischen Höhlenwetter und Tagluft zählen. Sie besitzen einen ausgeprägten jahreszeitlichen Rhythmus und gehorchen den Gesetzen für offene Systeme.

Die endogenen Faktoren sind in ihrer räumlichen Wirkung begrenzt, haben jedoch andere Entstehungsursachen und eine andere Charakteristik. In diesem Fall ist die Höhle als geschlossenes System zu interpretieren.

Messungen und theoretische Überlegungen zeigen, daß die Salzgrabenhöhle kein isoliertes System darstellen kann, da ansonsten die Wetterführung nicht funktionieren und das beobachtbare Temperaturprofil nicht auftreten könnte. Die Zustandsänderungen des Höhlenwetters erfolgen isotherm.

Eisbildung und Eisdegeneration können anhand des Temperaturprofils und der Wetterverhältnisse gedeutet werden.

Summary

Between the years 1982 and 1987 the Salzgrabenhöhle has been examined in speleometeorology with the emphasis on the circulation of cave weather. In thermo-dynamic points of view it is possible to differentiate between exodynamic and endodynamic factors of the cave weathering.

In this processes the exodynamic factors, which are in the main differences of temperature and pressure between cave weather and atmospheric air, predominate. They have a strong seasonal rhythm and are subject to the rules of open systems.

*Anschriften der Verfasser: R. Schuster, G. Novak, Arge Rosenstein e.V., Postfach 1345, 73540 Heubach, eMail roger-schuster@gmx.de

The endodynamic factors are shorter of space in their effects, however they have other causes of development and other characteristics. In this case the cave has to be interpreted as a closed system.

Measurements and theoretical considerations show that the Salzgrabenhöhle cannot be an isolated system, because otherwise the cave weathering will not operate and the noticeable section of temperature could not arise. Alteration of the condition of the caveweather are isotherm.

Ice development and ice degeneration can be interpreted with the section of temperature and the weather conditions.

Résumé

Pendant les années de 1982 à 1987 la Salzgrabenhöhle fut examinée sous son aspect spéléométéorologique, en particulier celui de la circulation de l'air. Sous de points de vue thermodynamiques on peut distinguer les facteurs du dehors et du dedans de la circulation de l'air.

Les facteurs du dehors dont surtout les différences température et de pression entre la circulation de l'air dans la grotte et à ciel ouvert, sont en effet prépondérants. Elles ont un rythme saisonal marqué et obéissent aux lois pour les systèmes ouverts.

Les facteurs du dedans sont plus limités dans leurs dimensions mais ils sont d'une autre origine et d'une autre caractéristique. En l'espèce, la grotte se classifie comme un système fermé.

Des mesurages et des réflexions théoretiques démontrent que la Salzgrabenhöhle ne peut pas être regardée comme un système isolé parce que autrement la circulation de l'air ne pourrait pas fonctionner et le profil de la température observée ne pourrait pas s'expliquer. Le changement de l'état de la circulation de l'air correspond à l'isotherme. La formation et dégénération de glace sont fonction du profil de la température et des conditions météorologiques.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Die Ganganlage der Höhle	5
3	Hydrologie	7
4	Die Wetterführung	8
4.1	Allgemeines	8
4.2	Exogene Faktoren	9
4.3	Endogene Faktoren	16
5	Eisbildungen	19
6	Thermodynamik	20
6.1	Grundbegriffe	20
6.2	Zustandsänderung der Höhlenwetter	21
7	Ausblick	23
8	Wertetabellen	23
8.1	Meßgeräte	23
8.2	Meßwerte	24

Abbildungsverzeichnis

1	Lage der Salzgrabenhöhle im Nationalpark Berchtesgaden . .	27
2	Grundriß der Salzgrabenhöhle	28
3	Aufriß der Salzgrabenhöhle	29
4	Jährlicher Temperaturverlauf für die Außenatmosphäre	30
5	Lageplan der bewetterten Schächte auf dem Simetsbergplateau	31
6	Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und $-Dichte$	32
7	Das Achenal bei erhöhter Schüttung (Foto: G. Novak)	33
8	Die Strömungssysteme im Achenal und der Wasserfallkluft .	34
9	Jährliche Verteilung der Niederschläge	35
10	Der „Richters Rutsch“ im Sommer (Foto: G. Novak)	36
11	Der „Richters Rutsch“ im Winter mit mächtiger Vereisung (Fo- to: G. Novak)	37

Tabellenverzeichnis

1	Außentemperaturen	24
2	Lufttemperaturen	38

3	Lufttemperaturen (<i>Fortsetzung</i>)	39
4	relative Luftfeuchtigkeiten	40
5	Windgeschwindigkeiten	41

1 Einleitung

1982 wurde die Salzgrabenhöhle erstmals von der Höhlenkundlichen Arbeitsgemeinschaft Rosenstein/Heubach e.V. aufgesucht und bis 1987 folgten insgesamt 14 weitere Befahrungen.¹

Die meteorologischen Phänomene sind in der Salzgrabenhöhle sehr ausgeprägt; so läßt sich der im Sommer bergauswärts gerichtete Höhlenwind schon 20 m vom Portal entfernt als kühler Hauch verspüren, ohne daß etwa der Nachweis nur mit empfindlichen Thermometern möglich wäre. In Engstellen nimmt der Wind eine unangenehme Intensität an, der sich im Gaudischluf fast zum Sturm steigern kann und durch aufgewirbelten Staub und ausgelöschte Lampen die Befahrung erschwert. Und im Winter enthalten die ersten hundert Höhlenmeter ausgedehnte Eislager. In diesem Zusammenhang verwundert es nicht mehr, daß sich schon ab 1984 bei den meisten Befahrungen der Salzgrabenhöhle meteorologische Meßgeräte im Gepäck der Arge Rosenstein befanden und die Aufsammlung von Daten begonnen wurde.

Die Speläometeorologie ist ein wenig beliebter Zweig der physischen Höhlenkunde, was durch die wenigen Titel, die pro Jahr in internationale Bibliographien einfließen, belegt wird. Ein anderer Indikator hierfür ist das jedem Höhlenforscher bekannte Werk „Höhlenkunde“ von H. TRIMMEL (1968), das im entsprechenden Kapitel im wesentlichen nur eine Kompilation einer mehr als vierzig Jahre älteren Arbeit von KYRLE (1923: 203-229) anführt, die ohnehin in einigen Punkten nicht unwidersprochen bleiben kann.

Dies werten die Autoren als unmißverständlichen Hinweis darauf, daß grundlegende Kenntnisse über die Bewetterung von Höhlen nicht von allen Höhlenforschern auf Anhieb erwartet werden können. Es erschien daher sinnvoll, nicht einfach eine Wertetabelle und eine kurze Diskussion über das Zustandekommen der betrachteten Effekte zu veröffentlichen, sondern auch plausible Erklärungen zu liefern, die auf den elementarsten Grundlagen der Physik beruhen.

Auch die Autoren hatten ursprünglich mit den genannten Schwierigkeiten zu kämpfen, weshalb die Messungen in der Höhle anfangs mehr ein wildes Datensammeln als ein geplantes Meßprogramm waren! Vieles muß vorerst unvollständig bleiben, da das verfügbare Material quantitativ und qualitativ nicht ausreichend ist, doch können die Wissenslücken hoffentlich in Zukunft geschlossen werden.

Darum halten es die Verfasser für das oberste Gebot, den zahlreichen Personen und Institutionen, die die Forschungen in der Salzgrabenhöhle auf vielfältige Weise unterstützt haben, den herzlichsten Dank auszusprechen! In zwangloser Reihenfolge genannt werden müssen:

¹Die Daten einer erneuten Meßbefahrung im Juni 1993 konnten noch nicht genauer ausgewertet werden, stützen aber nach der ersten Durchsicht die hier genannten Aussagen.

- Die Kollegen von der HAG SCHWÄBISCH GMÜND, der HFG NÜRTINGEN und der OSTSCHWEIZER GESELLSCHAFT FÜR HÖHLENFORSCHUNG, die vor Ort mit dabei waren.
- Das WETTERAMT MÜNCHEN, das statistisches Material unentgeltlich zur Verfügung stellte.
- Die NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN, die die Forschung in der Salzgrabenhöhle bereitwillig genehmigt hat.
- Herr C. GRUBERT, Speleogruppe '86, der wichtige Informationen beisteuerte und die Erlaubnis zum Abdruck des Lageplans mit den bewetterten Schächten auf dem Simetsberg erteilte.
- Herr R. H. SHAW (damals Gastprofessor am Research Institute for Bioresources at Okayama University, Japan) für die zahlreichen Diskussionen.
- Herr M. FETH, der das Manuskript kritisch durchgesehen hat.

Sie alle haben die Realisierung des Forschungsprogramms Wetterführung Salzgrabenhöhle erst ermöglicht, so bescheiden dieses auch in der vorliegenden Form ausfiel.

Vom Dank ausdrücklich ausgeklammert werden muß die Karstspeläologische Arbeitsgemeinschaft Karlsruhe e. V., in deren Schriftenreihe „Wissenschaftliche Berichte“ diese Abhandlung bereits 1992 hätte publiziert werden sollen. Nachdem die Autoren im Frühjahr 1998 endlich ihr Material zurückforderten, stellte sich heraus, daß die Schriftleitung der Wissenschaftlichen Berichte sämtliche Abbildungen und Teile der Datenblätter verloren hatte! Die Abbildungen konnten von den Verfassern mühsam rekonstruiert werden, wohingegen die Resultate von vier Jahren Meßarbeit in der Höhle größtenteils endgültig vernichtet sind. Mögen die Leser diesen Verlust bei der Beurteilung dieses Dokuments berücksichtigen!

2 Die Ganganlage der Höhle

Die Höhle, die im Dachsteinkalk verläuft, ist in zwei deutlich unterscheidbaren Niveaus angelegt.

Von der großen Eingangshalle (960 m ü. NN) führt ein niedriger Durchschlupf zu einer engen Klamm, die leicht abfallend nach wenigen Metern in eine etwa 2 m tiefe Wandstufe übergeht und dort in die *Eiskapelle* einmündet. Nach dem anschließenden *Richters Rutsch*, der eine ca. 5 m tiefe Steilstufe darstellt, auf deren Sohle ein kleines Rinnsal fließt, weitet sich der Raum, wird aber zunehmend niedriger. Der anschließende Gangabschnitt ist etwa 10 m breit, 40 m lang und teilweise nur 1 m hoch, der sogenannte *Gaudischluf*.

Am Ende dieser Strecke, die fast mit Flußgeröllen aufgefüllt ist, weitet sich der Raum zum *Grand Salon*. Hier ist der tiefste Punkt der Höhle erreicht (-90 m). Der mächtige, etwa 5 m hohe Hauptgang leitet leicht ansteigend zu einer 3 m hohen Wandstufe, die den Einstieg in den *Satteldom* darstellt. In dieser ungefähr 70 m langen und 30 m hohen Halle befindet sich der Trichter, in den 20 m tief zum *Schwarzsee* abgeklettert werden kann. Nach dem Satteldom besteht in der *Verzweigungshalle* die Möglichkeit, entweder über die *Pyramidenhalle* in das untere Stockwerk der Höhle zu gelangen, oder den *Riesenkamin* und die oberen Teile zu erklettern.

Von der Pyramidenhalle führt ein fast senkrechter Abbruch zur *Nabelkluft*. In etwa 30 m Tiefe fließt der Höhlenbach vom Wasserfall kommend dem Schwarzsee im Trichter zu. An dieser Stelle öffnet sich auch der *Mühlengang*, der nach ca. 250 m in einer Spalte endet. Da Luftzug vorhanden ist, muß er aber eine Verbindung ins Freie besitzen.

Oberhalb der Nabelkluft führt ein Gang weiter zur *Wasserfallkluft* und zum Wasserfall. Dieser stürzt etwa 30 m tief vor einem Gangfenster in einen Schacht hinab. Oberhalb des Wasserfalles erreicht man den *Grünsee*, von dem das Wasser in Richtung Wasserfall abläuft.

Von der Pyramidenhalle aus gelangt man von der anderen Seite der Nabelkluft in einen mehrere hundert Meter langen Gang, der schließlich verstimmt endet, den *Antreibergang*.

Von der Verzweigungshalle aus, betritt man den steil ansteigenden, teils von Sand, teils von kleinen Felsbrocken übersäten Weg zum Riesenkamin. Diese riesige Schlucht zieht etwa 200 m steil nach oben. An einigen Stellen ist sie mehr als fünf oder sechs Meter breit, zum First hin verbreitet sie sich V-förmig. Dabei ist der Riesenkamin 10–20 m hoch. Am oberen Ende des Riesenkamins befindet sich ein 70 m-Schacht, der hinter dem *Rohrnu-delsiphon* in den Hauptgang mündet. Doch vorher, bei etwa 120 m, verläßt man den Kamin mittels einer eingebauten Eisenleiter, um dann steil bergab durch einen „Druckstollen“ (ehemals phreatischer Gang mit Röhrenprofil) den Rohrnu-delsiphon zu erreichen. Diesen überwindend, gelangt man nach etwa hundert Metern zur *Biwakschachtel*. Von dieser aus führt nun der Hauptgang in eine kleine Halle, an deren Raumbegrenzung sich der Zustieg zum *Notausgang* befindet, der das obere mit dem unteren Stockwerk verbindet. Rechtwinklig nach links klettert man über sehr große Versturzböcke bis zum *Kanonenrohr*. Vom Kanonenrohr gelangt man in die *Mitternachtshalle*. Diese wohl größte Halle (100 x 40 x 80 m) der Höhle durchquert man ständig über sehr große Versturzböcke kletternd.

An ihrem hinteren Ende ziehen teilweise senkrechte Kamine nach oben, die in schwieriger Kletterei erschlossen werden mußten. Diese Kamine leiten zum höchsten Punkt der Höhle hin (+324 m). Hinter der Mitternachtshalle schließt sich der *Sandkasten* an, wo sich die Höhle verzweigt. Über die *Märchenwiese* führt der breite und niedere Hauptgang hinab zum *Kristallsee*. Gleich am Anfang des Sandkastens, zweigt ein niederer Gang nach links ab,

der nach 100 m Abstieg zum *Achental* führt. Dort fließt ein kleiner Bach, der von einem Siphon gespeist wird und nach ca. 70 m in einen anderen Siphon wieder verschwindet. Bei Schneeschmelze wird der Gang vom Hochwasser fast ausgefüllt.

3 Hydrologie

Wenigstens einfache Kenntnisse über die Hydrologie aktiv–vadoser Höhlensysteme sollten zur Beurteilung der meteorologischen Verhältnisse vorhanden sein, da das Wasser ein nicht zu unterschätzender Faktor als Ursache der Luftbewegungen in Höhlen ist. Es überträgt bei turbulentem Fließen seinen Bewegungsimpuls auf die Luft, überflutet Räume und wirkt so verdrängend auf die Gasphase und erniedrigt in Form von Feuchtigkeit die Dichte und damit schließlich auch den hydrostatischen Druck der Luft.

Tracerexperimente, Schüttungsmessungen u.ä. fanden im Einzugsgebiet der Salzgrabenhöhle bisher nicht statt², doch hat GRUBERT (1990) in seiner Arbeit einige Überlegungen zur hydrologischen Situation angestellt, die nachfolgend angegeben werden.

Aufgrund der errechneten Niederschlagsmenge pro Flächeneinheit, der geschätzten Schüttungen der Höhlengewässer und der synchronen Pegelschwankungen, glaubt GRUBERT (1990) drei verschiedene Bachsysteme mit den dazugehörigen Einzugsgebieten unterscheiden zu können—die Salzgrabenhöhle wäre demnach hydrologisch ternär.

Der Hauptabfluß ist der Bach, der vom Grünseesiphon gespeist wird, dann wieder in der Wasserfallkluft in Erscheinung tritt und über die Nabelkluft dem Schwarzsee im Satteldom zufließt. Möglicherweise ist der Kristallsee ebenso wie das Achental eine weitere Station noch vor dem Grünsee. Der Unterlauf schließlich ist unbekannt, aber es ist zu vermuten, daß das Wasser in einigen Quellen (*Schradl-Loch*, *Grünseebrunnen*) unmittelbar über und unter dem Wasserspiegel des Königsees (ca. 600 m ü. NN) den Aquifer verläßt. Die Schüttung schwankt zwischen einigen Sekundenlitern im Winter und mehreren Kubikmetern pro Sekunde bei Schneeschmelze (KLAPPACHER & KNAPCZYK 1977: 201).

Das Einzugsgebiet müßte bei den gegebenen Niederschlagsmengen deshalb mindestens dreimal so groß sein, wie die Fläche des Simetsberges. Die Wasserschlinger an der Hochfläche beim Funtensee (Abflußrichtung nicht bekannt) dürften das Defizit nicht begleichen können, weshalb das Einzugsgebiet des Hauptbaches weit bis in das Zentralmassiv des Steinernen Meeres reichen muß, dessen Durchschnittshöhe etwa 1800 m ü. NN beträgt. Daß das Einzugsgebiet des Hauptbachs in etwas größerer Höhe liegen muß, wird durch die im Juli 1989 beobachtete Oszillation des Wasserspiegels unter-

²1997 wurden von der Speleogruppe '86 Traceruntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse die bisherigen Vermutungen bestätigen (PAPENDICK 1998).

mauert. Diese wurde vermutlich durch die tagsüber einsetzende (und nachts wieder abklingende) Schneeschmelze angeregt, wobei das tiefer gelegene Gelände über der Höhe aber schon längst schneefrei war. Das Wasser konnte daher nur aus Schneefeldern in höherer Lage, etwa dem Steinernen Meer selbst, stammen (GRUBERT 1990: 44).

Die zahlreichen kleineren Bäche, die etwa die Wasserstelle bei der Biwakschachtel speisen, die Gumpen im Antreibergang nachfüllen etc., scheinen ihr Wasser ausschließlich vom Simetsbergplateau zu beziehen (ca. 1600 m ü. NN). Auch ein Abfluß vom Funtensee–Schlinger her wäre eventuell denkbar. Die Schüttung dieser Gewässer bleibt hinter jener des Hauptbachs weit zurück.

Ein weiterer kleiner Bach beginnt schon fast in der Eingangshalle und fließt bergwärts —Fließrichtung entgegengesetzt zu den anderen Bächen— über die Eiskapelle und den Richters Rutsch zum Gaudischluf, wo er in der Regel im Kies und Geröll versickert. Nur bei hoher Schüttung dringt er weiter vor und bewirkt eine Wasseransammlung im Bereich des Grand Salon, der in seltenen Extremfällen (August 1959) zum Siphon werden kann. Das Wasser dieses Bachs stammt sehr wahrscheinlich aus der Simetsberg–Nordwand, von wo es durch eine ausgeprägte Störung in den Anfangsteil der Höhle gelenkt wird.

4 Die Wetterführung

4.1 Allgemeines

In Anlehnung an die Definition durch KYRLE (1923: 203) wird als *Höhlenwetter* der gesamte gasförmige, fluktuierende Höhleninhalt bezeichnet.

Definition: Die *Wetterführung*³ ist die zu beobachtende Fluktuation des *Höhlenwetters*, wobei unter diesem Oberbegriff jedoch nicht nur der Höhlenwind verstanden werden soll, sondern auch die auslösenden Momente der Luftbewegung sind in die Betrachtung mit einbezogen.

Die Wetterführung hängt ursächlich mit der Morphologie der betrachteten Höhle und den klimatologischen Kenngrößen *Temperatur*, *Feuchte* und *Druck* zusammen. Natürlich beeinflusst der Luftaustausch wiederum diese Zustandsvariablen der Höhlenatmosphäre, weshalb eine sorgfältige Trennung zwischen Ursache und Wirkung bei der Beobachtung speläometeorologischer

³KYRLE (1923: 218) belegt die Bewegung der Höhlenwetter mit dem Begriff *Wetterwechsel* im Sinne von *Wetteraustausch*. Leider birgt diese Definition die Gefahr in sich, daß eine sinngemäße Verwechslung mit dem Terminus *Wetterumkehr* (Wechsel der Bewegungsrichtung) nicht ausgeschlossen werden kann. Diese Bezeichnung sollte daher nicht mehr verwendet und durch *Wetterführung* ersetzt werden.

Effekte gewährleistet sein muß, bzw. es ist ins Bewußtsein zu rücken, daß der Wind und die übrigen Faktoren miteinander im Gleichgewicht stehen (Rückkoppelung).

Temperatur, Feuchte und *Druck* sind die Zustandsvariablen der Höhlenatmosphäre, deren kurzfristige Änderung (Zustandsänderung) durch die Speläometeorologie untersucht und beschrieben wird. Hiervon abgetrennt werden müßte die Speläoklimatologie, die sich mit der statistischen Verteilung der Kenngrößen und ihren langfristigen Änderungen befaßt:

„Strictly speaking, the term meteorology applies to the dynamic and rapidly changing aspects of the atmospheric variables, while climatology is concerned with their average values and long-term changes in these averages“ (WIGLEY & BROWN 1976: 330).

Jedoch erfolgen sowohl die raschen als auch die langzeitigen Zustandsänderungen in der Höhle gleichermaßen moderat, weshalb eine strikte Trennung nicht möglich und sinnvoll ist:

„Inside caves, where the variables remain more nearly constant than in the outside atmosphere, this distinction is less valuable“ (WIGLEY & BROWN 1976: 330).

Schon hier macht sich der wesentliche Motor aller Luftbewegungen in Höhlen bemerkbar: Während sich die Höhlenwetter weitgehend im internen Gleichgewicht befinden (geringe Variabilität der Kenngrößen), weicht der Zustand der freien Atmosphäre meist stark ab, wobei aber Höhlen- und Außenluft über die Tagöffnungen der Höhle miteinander korrespondieren und daher bestrebt sind, ein neues Gleichgewicht einzustellen. Diese Gleichgewichtseinstellung initiiert, vereinfacht gesprochen, den Höhlenwind.

Es ist jedoch ein Unterschied, wo diese Induktion der Wetterführung stattfindet, weshalb die Ursachen zweckmäßig in exogene Faktoren (Anregung unmittelbar durch die äußeren Verhältnisse) und endogene Faktoren (Anregung durch Kräfte in der Höhle selbst) separiert werden. Die Grenzziehung ist von Prämissen, die der Thermodynamik entlehnt sind, abhängig. Die exakten Definitionen der beiden unterschiedlichen Abteilungen werden in den nachfolgenden Unterkapiteln entwickelt.

4.2 Exogene Faktoren

Für die Induktion der Luftbewegungen in der Atmosphäre sind Druckänderungen oder –Unterschiede verantwortlich, wobei sich die zwischen zwei verschiedenen Druckgebieten ausgetauschten Luftvolumina und die resultierenden Windgeschwindigkeiten leicht berechnen lassen.

Gase sind innerhalb weiter Grenzen kompressibel; daher müßte die höhenabhängige Druckverteilung in einer gedachten Luftsäule durch die Benutzung der barometrischen Höhenformel berücksichtigt werden. Bei den relativ

kleinen Höhenunterschieden in der Höhle jedoch und vor allem im Hinblick auf die realisierbare Meßgenauigkeit, kann Luft in erster Näherung als inkompressibel betrachtet werden. Um den Auflastdruck (Hydrostatischer Druck) einer ruhenden Luftsäule auf den Untergrund zu ermitteln, reicht in diesem Falle die hydrostatische Grundgleichung aus:

$$P_h = \rho \cdot h \cdot g$$

P_h : Hydrostatischer Druck [Pa]

ρ : Luftdichte [$kg \cdot m^{-3}$]

h : Höhe der Luftsäule [m]

g : Fallbeschleunigung [$m \cdot s^{-2}$]

Die Salzgrabenhöhle ist dynamisch bewettert, d.h. das Höhlenwetter korrespondiert über mindestens zwei Tagöffnungen in unterschiedlicher Höhenlage mit der freien Atmosphäre. Der untere Eingang in das Höhlensystem liegt bei 960 m ü. NN, hinter dem der Hauptgang um ca. 90–100 m abfällt. Über geneigte Gänge und Kamine steigt der Wetterweg wieder auf bis zu einer erforschten Höhe von 1284 m ü. NN (A.A. 1988; BÄUMLER 1987); die obere(n) Tagöffnung(en) sind bisher nicht entdeckt worden. Aus dem Verlauf der Hochfläche ergibt sich jedoch, daß die Ausstichpunkte der Höhle bei ca. 1600 m ü. NN liegen müssen (vgl. Abb. 3, S. 29).

Daraus folgt die Existenz eines durchgehenden Wetterweges vom Simetsbergplateau zum Eingang der Salzgrabenhöhle mit einem Höhenunterschied von ca. 640 m. Daß diese Luftsäule durch Stufen unterbrochen wird und auch nicht senkrecht steht, spielt gemäß den Gesetzen der Hydrostatik keine Rolle, da irreguläre Säulen den gleichen Auflagedruck ausüben wie eine regelmäßige, senkrechte Säule gleicher Höhe. Es ist auch nur der reine Höhenunterschied zwischen der oberen und unteren Tagöffnung entscheidend, da der 90 m hohen, abfallenden Luftsäule (Eingang bis tiefster Punkt) eine gleich hohe aufsteigende Säule (tiefster Punkt bis Eingangsniveau) entgegenwirkt und so für Gleichgewicht sorgt, unter der Voraussetzung, daß die Luftdichte in beiden Schenkeln dieses gedachten U- Rohres gleich groß ist. Die Temperatur und Feuchtemessungen belegen, daß dies tatsächlich der Fall ist. Die Höhlenatmosphäre ist somit als 640 m hohe Luftsäule mit bestimmten Eigenschaften beschreibbar, die über den Eingang der Höhle mit dem Außenwetter in Verbindung steht. Im Freien wiederum ist über dem Eingang eine zweite Luftsäule zu denken, die ebenfalls 640 m hoch ist⁴. Sofern

⁴Natürlich endet die innere Luftsäule nicht an der oberen Tagöffnung bei 1600 m ü. NN, sondern sie setzt sich mit erheblich anderen Eigenschaften bis zur *fließenden Grenze* der Erdatmosphäre fort. Das gleiche gilt für die äußere Säule. Daraus folgt, daß die überstehenden Teile beider Säulen (weitestgehend) gleiche Eigenschaften haben und sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben. Folglich sind sie nicht zu berücksichtigen, zumal nur die Druckdifferenzen eine Rolle spielen (vgl. WIGLEY & BROWN 1976: 331).

deren übrige Eigenschaften ebenfalls identisch sind, kann die hydrostatische Grundgleichung wie folgt umgeformt werden:

$$\rho_{ext} \cdot h \cdot g = \rho_{int} \cdot h \cdot g$$

ρ_{ext} : Luftdichte der freien Atmosphäre

ρ_{int} : Luftdichte der Höhlenatmosphäre

Da $h = 640 \text{ m}$ und $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ Konstanten sind, stellen ρ_{ext} und ρ_{int} die einzigen Variablen dar. Ist $\rho_{ext} = \rho_{int}$, verhalten sich die innere und die äußere Luftsäule wie der Inhalt zweier kommunizierender Röhren, d.h. es herrscht ein Gleichgewicht.

Ist nun $\rho_{ext} \neq \rho_{int}$, wird die dichtere Luft aufgrund des größeren hydrostatischen Drucks das Bestreben zeigen, die andere Luftsäule anzuheben, d.h. die Luft fließt durch den Verbindungskanal, in diesem Falle den Höhleneingang, und verursacht eine Wetterbewegung.

Wenn das Volumen des Verbindungskanals (Gaudischluf) im Vergleich zu den verbundenen Luftvolumina infinitesimal klein ist, was bei dieser Höhle annähernd vorausgesetzt werden darf, kann die Windgeschwindigkeit mit dem THEOREM VON TORRICELLI berechnet werden:

$$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

v : Windgeschwindigkeit [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

g : Fallbeschleunigung [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Δh : Druckhöhe [m]

Die Druckhöhe ist jener Betrag, um den die schwerere Luftsäule verlängert gedacht werden muß, wenn die Dichte gleich wäre. Er errechnet sich aus der Druckdifferenz zwischen den beiden Luftvolumina nach der Formel

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{g \cdot \rho}$$

Δp : Druckdifferenz [Pa]

g : Fallbeschleunigung [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

ρ : Dichte der schwereren Luftsäule [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

(WESTPHAL 1970: 158).

Mit Hilfe der bisher genannten Formalismen läßt sich die aus den Dichteunterschieden zu erwartende Windgeschwindigkeit abschätzen.

Um die Ursachen der Druckänderungen analysieren zu können, gilt es zunächst, die Eigenschaften von Luft zu berücksichtigen. Die Temperaturen an

der Erdoberfläche liegen weit über den Siedepunkten der Luftkomponenten und nahe der Boyle-Temperatur, so daß sich das reale Verhalten der Luft weitgehend dem idealen Zustand nähert. Es ist deshalb zulässig, Luft als ideales Gas zu betrachten. Es gilt die ideale Gaszustandsgleichung

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Da in den anderen Gleichungen mit der Dichte operiert wird, kann die obige Beziehung unter Berücksichtigung der Feuchtigkeit wie folgt umgeformt werden:

$$\rho = \left(\frac{(P_L - e) \cdot M_L}{R \cdot (273,15 + \vartheta)} + a \right) \cdot 10^{-3}$$

ρ : Luftdichte [$kg \cdot m^{-3}$]

P_L : aktueller Luftdruck [Pa]

e : aktueller Wasserdampfdruck [Pa]

M_L : mittlere Molekülmasse von Luft [$28,96 g \cdot mol^{-1}$]

R : universelle Gaskonstante [$8,31 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]

ϑ : aktuelle Lufttemperatur [$^{\circ}C$]

a : absolute Luftfeuchte [$g \cdot m^{-3}$]

Die Formelzeichen entsprechen den Vorschlägen von BLÜTHGEN & WEISCHET (1980: 187). Aus der Gleichung ist der Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern Dichte, Feuchtigkeit, Temperatur und Druck ersichtlich.

Von den die Dichte beeinflussenden Größen wurde der Luftdruck bisher in der Salzgrabenhöhle leider nicht gemessen; er wird bei den Berechnungen mit 101300 Pa eingesetzt.

Zunächst wird der Einfluß der Lufttemperatur untersucht, wobei die Bestimmung für die Außenatmosphäre und für das Höhlenwetter erfolgen muß. Der jahreszeitliche Temperaturverlauf der Außenluft ist aus Abb. 4 zu entnehmen. Das Diagramm gibt für jeden Monat die mittlere Temperatur, die durchschnittliche Höchst-(Tages-) Temperatur und ebenso die gemittelte Tiefst- (Nacht-) Temperatur an. Es ist jedoch nicht statthaft, diese Werte direkt mit der Höhle zu vergleichen, da sie in geschützter Tallage (542 m ü. NN) gewonnen wurden. Die Temperaturabnahme mit der Höhe, der geometrische Temperaturgradient, muß berücksichtigt werden. Dieser beträgt weltweit 0,5–0,8 °C/100 m (BLÜTHGEN & WEISCHET 1980: 161), den genauen Wert für den Alpenpark Berchtesgaden bestimmte ENDERS (1979: 39) mit 0,47 °C/100 m. Es ist naheliegend, die Temperatur zu benutzen, die

auf halber Höhe der betrachteten Luftsäule wirksam ist (Mittelwert), d.h. bei der Salzgrabenhöhle jene bei 1280 m ü. NN. Die einzelnen Temperaturen von Abb. 4 sind somit um 3,5 °C zu reduzieren, damit diese einen repräsentativen Charakter erhalten.

Während die mittlere Außentemperatur (auf Höhlenniveau korrigiert) zwischen -6,2 °C im Januar und +12,5 °C im Juli variiert, bleibt die Innentemperatur im Mittel fast konstant bei ca. 4 °C. Dies entspricht fast genau der Jahresmitteltemperatur der Außenluft auf Höhlenniveau (3,3 °C), was nicht weiter verwunderlich ist, da Erdreich und Gestein die Temperaturextreme nur zögernd mitmachen und somit dämpfend wirken (BLÜTHGEN & WEISCHET 1980: 121).

Im März 1984 wurden folgende Temperaturen gemessen: An der Traufkante betrug die Temperatur gegen Mitternacht -11 °C und am oberen Ende des Riesenkamins +2,6 °C (zu einem anderen Zeitpunkt!). Wenn man jetzt die Luftfeuchte vernachlässigt (gleich Null) und den Luftdruck mit 101300 Pa ansetzt, lassen sich die jeweiligen Dichten für Innen und Außen berechnen.

$$\begin{aligned}\rho_{int} &= 1,2802 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ \rho_{ext} &= 1,3466 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}\end{aligned}$$

Mit der hydrostatischen Grundgleichung ergeben sich für die oben genannten Dichten bei $h = 640 \text{ m}$ folgende Auflastdrücke:

$$\begin{aligned}P_{int} &= 8037 \text{ Pa} \\ P_{ext} &= 8454 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Die Druckhöhe beträgt dementsprechend 31,5 m, was nach dem Theorem von Torricelli einer Windgeschwindigkeit von $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ entspricht. Tatsächlich gemessen wurden $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Gaudischluf)⁵.

Diese Diskrepanz erklärt sich damit, daß die beiden benutzten Temperaturen nicht synchron gemessen worden sind. Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgte wiederum zu einem ganz anderen Zeitpunkt, da nur eine Meßgruppe mit einem Gerätesatz anwesend war. Die Messung wurde nämlich bei Tage durchgeführt, wo logischerweise der Temperaturgegensatz (Mittagstemperatur nur noch -5 °C) kleiner ist. Anbetracht dieser Zugeständnisse ist die Abschätzung der Wetterbewegung durchaus in ihrer Genauigkeit akzeptabel!

Im Juni 1984 wurden Temperaturen gemessen, aus denen sich theoretisch eine Windgeschwindigkeit von $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ errechnen läßt, wenn auch praktisch nur $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ gemessen wurden. Mehr als nur die reinen Zahlenwerte interessiert jedoch die Tatsache, daß die Richtung des Windes im Vergleich zur Wintermessung genau umgekehrt verläuft.

Dieser Wetterumkehr oder Wetterinversion kommt größere Bedeutung zu. Es wurde bereits explizit vermerkt, daß bei gleicher Dichte (also gleicher Temperatur) Innen und Außen ein Gleichgewicht herrscht, d.h. der

⁵Bezogen auf den Gangquerschnitt entspricht dies einem Luftdurchsatz von $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Wetterfluß reißt ab und es kommt zur Wetterstockung. Betrachtet man die Höhle zunächst im Winter, wo die Innentemperatur deutlich höher ist als die Außentemperatur, erfolgt die Bewetterung bergwärts. Die dünnere Höhlenluft steigt auf und entweicht durch Schächte und Spalten im Simetsbergplateau, was natürlich eine Ansaugung von Kaltluft um unteren Eingang bewirkt. Diese Kaltluft nimmt am Höhengestein die im Sommer gespeicherte Wärme auf und akklimatisiert sich auf die Jahresmitteltemperatur von ca. 4 °C. Damit ist sie ebenfalls zum Entweichen nach oben befähigt, was die Wetterbewegung am Laufen hält.

Im Frühjahr nimmt die Windstärke ab, da der Temperaturgegensatz verflacht. Sobald beide Werte gleich groß sind, tritt die Wetterstockung auf. Im Sommer schließlich übertrifft die Außentemperatur die Temperatur des Höhlenwetters, was nun zur Bewetterung bergauswärts führt, d.h. die dichtere Höhlenluft fließt zum unteren Eingang aus und saugt von oben Warmluft nach, die sich in der Höhle abkühlt.

Auf Abb. 5 ist die Lage von Höhlen auf dem Simetsberg neben den darin herrschenden Bewetterungsrichtungen vermerkt. Jene Höhlen, die im Sommer einen Luftzug einwärts aufweisen, müssen einen Ausgang nach unten besitzen, wie aus dem bisher Gesagten hervorgeht. Es wäre nun theoretisch denkbar, daß es sich bei diesen Objekten um die gesuchten oberen Eingänge der Salzgrabenhöhle handelt.

Die Höhlen- oder Gesteinstemperatur beträgt etwa 4 °C. Im Vergleich mit dem jährlichen Temperaturverlauf, der in Abb. 4 dargestellt ist, (geometrischen Temperaturgradienten beachten!), wird die Temperaturgleichheit gegen Ende April erreicht; es kommt also zur Wetterinversion. In der ersten Oktoberhälfte sinkt die Außen- wieder unter die Innentemperatur, eine weitere Wetterinversion ist die Folge.

Diese einfache Betrachtungsweise, nach der es im Frühjahr und im Herbst zu jeweils einer Wetterumkehr kommt, setzt einen gemittelten Temperaturverlauf voraus. Es ist jedoch leicht zu ersehen, daß die tägliche Minimaltemperatur noch bis Ende Mai/Anfang Juni auf die Höhlentemperatur abfällt, bzw. die Maximaltemperatur schon im März größer als 4 °C sein kann. Mit einer täglichen Inversion während der Monate März bis Mai kann also gerechnet werden, wobei tagsüber schon die sommerliche Wetterrichtung vorherrscht und bei Nacht noch Winterbedingungen anzutreffen sind. Umgekehrtes gilt für den Herbst. Aber auch im Hochsommer sind einzelne Inversionen in Frostnächten nicht auszuschließen. Dieses rasche Umschlagen der Wetterrichtung wurde aus der Salzgrabenhöhle bisher nicht berichtet, wohl aber aus der meteorologisch ähnlichen Eisriesenwelt (HAUSER & OEDL 1926: 79, 84, 86).

Wie die Formel für die Luftdichte zeigt, wird diese Größe nicht nur vom Druck und der Temperatur beeinflusst, sondern auch von der Feuchte.

Es ist ein Irrtum anzunehmen, daß die Dichte mit zunehmender Feuchte wächst (Luft plus Wasserdampf), sondern das Gegenteil ist vielmehr richtig.

Wasserdampf verdrängt einen Teil der Luft, der eine höhere Masse als der Dampf selbst hat, da auch die „Molmasse“ der Luft ($28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) größer als jene des Wassers ($18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) ist. Feuchte Luft ist somit leichter als trockene; dieser Zusammenhang ist in Abb. 6 graphisch dargestellt.

Zwischen der Feuchte und der Temperatur besteht ein enger Zusammenhang, da der Dampfdruck bekanntlich mit der Temperatur (exponentiell) wächst. Warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte (bzw. es steht einfach mehr Dampf zur Verfügung).

Der Sättigungsdampfdruck [E] kann aus Tabellen (z.B. LÜCK 1964: 28–31) entnommen werden. Es ist jener Druck, angegeben in Pa (bzw. in mbar = 100 Pa), den der Dampf bei einer Feuchte von 100 % ausübt, d.h. wenn die Luft keinen weiteren Dampf mehr aufnehmen kann. Davon unterschieden wird der (aktuelle) Dampfdruck [e], der herrscht, wenn keine Sättigung vorliegt und der ebenfalls in Pa angegeben wird. [a] ist die absolute Feuchte, gemessen in $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter Luft). [U] ist schließlich die relative Feuchte in Prozent⁶. Die Luftfeuchte in der Höhle liegt bei 95–100 %; nur an sehr trockenen Stellen, etwa dem Satteldom, kann sie auch kleiner sein. Die Tagluft ist nicht viel trockener, was aus den Tabellen bei ENDERS (1979: 84) zu ersehen ist, der 73 % als kleinsten Wert angibt. Der Durchschnitt liegt bei etwa 80 %. Bei einer Temperatur von 4 °C, einem Druck von 101300 Pa und 70 % außen und 100 % innen beträgt die zu erwartende Windgeschwindigkeit $3,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Bisher wurde von einer Gleichgewichtseinstellung mit der damit verbundenen Wetterstockung ausgegangen, wenn die Temperaturen gleich groß sind. Sobald aber, wie im obigen Beispiel, die Feuchte differiert, bleibt die Wetterführung trotzdem bestehen. Bei 4 °C im Frühjahr würde die Luft immer noch bergewärts strömen. Um eine Stockung zu bewirken, müßte die Außentemperatur geringfügig höher sein (4,8 °C), um auf diese Weise den Dichteunterschied zu kompensieren. Genau genommen ist es erforderlich, die virtuellen Temperaturen zu vergleichen; dies sind jene Temperaturen, die Luftvolumina verschiedener Feuchte haben müßten, um die gleiche Dichte aufzuweisen. (LILJEQUIST 1974: 43).

Abschließend sei noch bemerkt, daß die durch die Feuchte induzierte Wetterführung immer in die gleiche Richtung weist, nämlich nach innen (Die Feuchte außen kann maximal so groß sein, wie die Feuchte innen). Sie verstärkt die temperaturbedingte Bewetterung im Winter und bremst sie im

⁶Zwischen e, E und U besteht der Zusammenhang $e = \frac{U}{100} \cdot E$. Es wurde mit einem Thermometer die Temperatur $\vartheta = 20 \text{ °C}$ und mit einem Hygrometer die relative Feuchte $U = 70 \text{ %}$ gemessen. Aus einer Tabelle läßt sich entnehmen, daß [E] bei 20 °C 2337 Pa beträgt. [e], der tatsächlich herrschende Dampfdruck, beträgt nur 70 % von [E], d.h. 1635 Pa. [a] ist ebenfalls nur 70 % des tabellarischen Wertes von $17,29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, d.h. $12,1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Daraus folgt aber auch, daß bei der Abkühlung der zunächst 20 °C warmen Luft eine Temperatur erreicht wird, bei der die relative Feuchte [U] 100 % beträgt, d.h. [e] = [E] = 1636 Pa. Dies ist bei etwa 14,2 °C der Fall.

Sommer.

Auf das Fehlen von Meßwerten zum aktuellen Luftdruck, der eine weitere klimatologische Kenngröße ist, wurde schon hingewiesen. Deshalb sind über die Druckverhältnisse und ihre Auswirkung nur theoretische Überlegungen möglich.

Die größten Druckänderungen werden vermutlich durch Luv- und Lee-Effekte verursacht. Wenn der Wind den Höhleneingang anbläst, verursacht er dort einen Staudruck, der die Wetterführung im Winter verstärkt und im Sommer abschwächt.

Der die zu vermutenden Schachtöffnungen im Simetsbergplateau überstreichende Wind führt dort zu einem Sog (GESETZ VON BERNOULLI), welcher den Höhlenwind im Winter beschleunigt und im Sommer bremst. Dieser Sogeffekt kann bei jeder Windrichtung auftreten, der der Berg ausgesetzt ist, doch die Verstärkung durch den Staudruck ist nur gewährleistet, wenn der Wind gleichzeitig den unteren Eingang anbläst, was bei Wind von Norden der Fall sein kann.

Die Druckverhältnisse in den durchströmten Gängen der Höhle sind ebenfalls eine Betrachtung wert. Besonders hohe Windgeschwindigkeiten sind im Gaudischluf zu messen ($15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, Düseneffekt), was an der angeblasenen Seite, aus der der Wind kommt, zu einem Überdruck führt. Der Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz und der Windgeschwindigkeit wird durch das AUSSTRÖMUNGSGESETZ VON BUNSEN beschrieben:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho}}$$

bzw.

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v^2$$

(nach WESTPHAL 1970: 159)

P_1 und P_2 sind die Drücke am Anfang bzw. Ende des Gaudischlufs. Bei der genannten Windgeschwindigkeit von $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, läßt sich eine Druckdifferenz von ca. 150 Pa erwarten⁷.

4.3 Endogene Faktoren

So wie unterschiedliche Größen für ϑ , P, a und e beim Höhlenwetter im Vergleich zur Tagluft eine Bewegung auslösen, können auch derartige Differenzen zwischen einzelnen Höhlenräumen einen Austausch von Luft bewirken. So ist die Luft im Satteldom in der Regel etwas trockener als dies für die übrigen Höhlenteile der Fall ist. Ein Abfluß der Luft nach unten wäre denkbar, doch ist mit einer Überlagerung des Effekts durch den Höhlenwind zu rechnen.

⁷Nach der hydrostatischen Grundgleichung entspricht diese Druckdifferenz einem (vorgetäuschten) Höhenunterschied von rund 12 m, d.h. der Höhlenwind ist in der Lage, barometrische Höhenbestimmungen zu verfälschen!

Die theoretisch zu erwartende Strömungsgeschwindigkeit ist sehr klein und mit einem normalen Schalenkreuzanemometer fast nicht mehr meßbar.

Die Zustandsänderung des Höhlenwetters kommt als Auslöser einer endogenen Wetterbewegung praktisch nicht in Frage, da die Differenzen der Zustandsvariablen zwischen den einzelnen Höhlenteilen zu klein sind.

Die wichtigste Triebfeder der endogenen Luftzirkulation ist die Kraftübertragung von turbulent fließendem Wasser auf die Höhlenatmosphäre. Sie kann durch alle größeren Fließgewässer bzw. bei Hochwasser stattfinden. Solche lokalen Luftströmungen finden sich vor allem am Achantal (Abb. 7) und ganz signifikant in der Wasserfallkluft.

Ruhig strömendes Wasser weist eine ganz bestimmte Geschwindigkeitsverteilung auf. Die Strömung ist in der Mitte immer am größten, nimmt zu den Rändern ab und ist innerhalb des dünnen Wasserfilms, der unmittelbar auf der Begrenzungswand aufsitzt, gleich Null. Ursachen sind die Reibung des Wassers mit der Felswand und die Viskosität (innere Reibung) des Wassers. Dieses parabelförmige Strömungsprofil läßt sich mit dem HAGEN-POISEUILLE'SCHEN GESETZ (vgl. BARROW 1979: III./50 ff) analytisch beschreiben. Hierauf wird an dieser Stelle verzichtet, denn viel wichtiger ist der Umstand, daß dieses laminare (gleichmäßige) Fließen bei einer bestimmten Geschwindigkeit spontan in turbulentes Fließen umschlägt (WESTPHAL 1970: 165). Das nahe der Felswand fließende Wasser wird durch die Reibung abgebremst, das oberflächennahe jedoch weniger. Bei der kritischen Geschwindigkeit ist der Strömungsverlauf in diesen beiden gedachten Schichtpaketen so stark abweichend, daß sich die oberflächennahe, schnelle Schicht auf der langsamen Unterschicht überschlägt und Wirbel bzw. Luftvakuolen bildet.

Die Intensität der Kraftübertragung auf die Luft hängt noch davon ab, ob das Wasser durch einen Gang abwärts fließt (Achantal) oder ob es in einen Schacht stürzt (Wasserfallkluft). Die initiierten Strömungssysteme der Luft in den beiden Fällen sind in Abb. 8 dargestellt.

Das Wasser des Achantals wird nach einer kurzen vadosen Fließstrecke von einem Siphon aufgenommen und dem Wasserfall zugeführt. Die Impulsübertragung der Wasserwirbel auf die Atmosphäre erfolgt in Fließrichtung, d.h. es wird nahe des Wasserspiegels ein Luftstrom erzeugt, der sich gleichsinnig zur Abflußbahn des Baches bewegt. Am Endsiphon wird ein Teil der Luft (zumindest bei Hochwasser) unter den Wasserspiegel gerissen (wobei die Luftblasen an der Höhlendecke das bekannte „phreatische Deckenmäander“ auskorrodieren), der größte Teil wird jedoch an der Wand nach oben gelenkt und fließt an der Höhlendecke zurück. Es wird also eine geschlossene, interne Luftzirkulation innerhalb des Ganges erzeugt.

In der Wasserfallkluft sind die Verhältnisse abweichend. Die Turbulenz ist natürlich viel größer und die eingeschlossenen Luftblasen können gegen ihren starken Auftrieb vom Wasser mit in die Tiefe gerissen werden. Die Luft wird von dem Gangfenster aus abgesaugt, wodurch ein deutlicher Wind

erzeugt wird (Flackern der Karbidlampen!). Bei relativ kleiner Schüttung kann ein Teil der Luft nahe der Schachtwände wieder hochsteigen, doch bei Maximalschüttung werden die Luftblasen ganz mit dem Wasser mitgerissen und erst in der Nabelkluft wieder freigesetzt, was dort wiederum an dem starken Blubbern des Höhlenbachs erkenntlich ist. Es liegt diesmal ein Austausch zwischen verschiedenen Höhlenteilen vor.

Die vom Wasser verursachten Windsysteme sind von lokaler Reichweite und in ihrer Intensität jenen temperaturgenerierten exogenen Luftströmungen unterlegen. Ihre Besonderheit liegt in der abweichenden Entstehung, der gleichbleibenden Richtung und dem anderen jahreszeitlichen Rhythmus.

Daß die Richtung der Luftströmung immer gleich bleibt, ist nur zu logisch, da sich ja auch die Fließrichtung des Wassers nie umkehrt. Das ist ein wesentliches Kriterium im Vergleich mit den exogenen Faktoren.

Allerdings ist die Windstärke Schwankungen unterworfen, die mit der Änderung der Schüttung konform geht. In Abb. 9 sind die Niederschlagshöhen für die einzelnen Monate angegeben. Die Zunahme des Niederschlags mit der Höhe (BLÜTHGEN & WEISCHET 1980: 306; ENDERS 1979: 49) kann unberücksichtigt bleiben, da es nicht auf die absoluten Zahlenwerte ankommt, wichtiger ist vielmehr die zeitliche Verteilung.

Prinzipiell ist Juli der feuchteste Monat und Februar der trockenste. Durch die Temperaturverhältnisse auf der Höhe des Einzugsgebietes (ca. 1800 m ü. NN) allerdings, fallen die Niederschläge zwischen der zweiten Oktoberhälfte und der ersten Aprilhälfte hauptsächlich als Schnee an. Es tritt kaum Wasser in den Aquifer ein und erfahrungsgemäß fallen die Höhlenbäche im Winter fast trocken. Die Niederschläge werden also an der Oberfläche akkumuliert und erst ab Mitte April freigesetzt. Dies sind immerhin ungefähr 500 mm, wobei die flüssigen Niederschläge des Sommers noch dazu kommen. Zur Hauptzeit der Schneeschmelze (April bis Juni) stehen demnach große Wassermassen zur Verfügung und infolge dessen sind dann auch die Windstärken am größten!

Auf die Oszillation der Schüttung durch Schmelztemperatur bei Tage und Nachtfrost wurde auf Seite 8 hingewiesen, weshalb auch eine interdiurne Periodizität der Wetterführung plausibel ist.

Es gilt nun zu überprüfen, warum die Ursachen der Luftzirkulation überhaupt in exogene und endogene Faktoren geschieden wurden, denn es zeigt sich doch auch bei den sog. endogenen Gesichtspunkten eine Korrelation mit dem Wettergeschehen in der Außenwelt.

Diese Trennung muß jedoch vom Standpunkt des Thermodynamikers aus vollzogen werden. Die Höhlenwetter (der gesamte gasförmige Höhleninhalt, also auch Wasserdampf) sind dabei das System und die freie Atmosphäre, das Deckgebirge, der feste und der flüssige (also auch in der Atmosphäre fein verteilte Wassertröpfchen) Höhleninhalt stellen die Umgebung dar.

Bei den exogenen Faktoren erfolgt immer ein (Wärme-) Energie- und ein Massentransfer gleichzeitig. Die Höhlenwetter korrespondieren direkt mit

der Außenwelt.

Definition: Exogen verursachte Wetterführung setzt grundsätzlich ein offenes thermodynamisches System voraus.

Die endogenen Faktoren erfordern nur eine mechanische Energieübertragung (Wasserkraft), während eine Massenänderung nicht stattfindet.

Definition: Endogen verursachte Wetterführung setzt grundsätzlich ein geschlossenes thermodynamisches System voraus.

5 Eisbildungen

Im Winter ist die Bewetterung bergewärts gerichtet, wobei Tagluft, deren Temperatur den Erstarrungspunkt des Wassers unterschreitet, in die unteren Teile der Höhle eindringt. Die in die Höhle einsickernden meteorischen Wässer gefrieren also und es kommt zur Bildung von ausgedehnten Eislagern.

Es wurde bereits festgestellt, daß die herbstliche Wetterinversion etwa Anfang Oktober erfolgt. Ab Anfang November liegt die mittlere Temperatur des Außenwetters unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, womit die Eisbildung beginnen kann.

Bis in welcher Entfernung vom Eingang Eisgebilde anzutreffen sind, bzw. wie weit die $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Isotherme eindringt, hängt von der Außentemperatur ab und wie lange die Kälteextreme anhalten. Je kälter es draußen ist, um so intensiver wird die Wetterführung und um so mehr Kaltluft gelangt in die Höhle. Die kalte Tagluft nimmt im Kontakt mit dem Gestein Wärme auf und kühlt damit das Gestein ab. Da die Wärmeleitfähigkeit des Kalkgesteins klein ist, bildet sich ein relativ dünner Mantel kühlen Gesteins zwischen der Höhlenwand und dem unbeeinflussten Deckgebirge. Die Dicke dieses Mantels hängt von der Gleichgewichtseinstellung zwischen der Kühlung durch die Luft und dem Wärmenachfluß aus dem Deckgebirge ab. Schließlich wird ein Punkt erreicht, ab dem es nicht mehr zur Kühlung des Gesteins bzw. Erwärmung der Luft kommt. Ab dieser Stelle werden konstant $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luft- und Gesteinstemperatur herrschen. Dementsprechend liegt die $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Isotherme etwas weiter zum Eingang hin.

Auf jeden Fall ergibt sich ein typisches Temperaturprofil, in dem die Wärme vom Tiefpunkt am Eingang bis zur Zone der konstanten Temperatur zunimmt und dann gleich bleibt. Sehr schön ist dies aus der Meßreihe für den 23.–25. März 1984 zu ersehen, wo die Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Eingang) auf $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Riesenkamin) zunimmt. Die Zone der konstanten Temperatur wurde nicht erreicht. Die $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Isotherme liegt kurz vor dem Gaudischluf. An dieser Stelle sei noch ein kurzer Hinweis über die durchschnittliche Temperatur der Höhle erlaubt, die bisher mit $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (genau: $3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) angegeben wurde. Innerhalb der durchgemessenen Strecke liegt sie jedoch im Winter erheblich darunter. Die vorgenannte mittlere Temperatur bezieht sich allerdings auf

die mittlere Höhe des Wetterwegs, die bei 1280 m ü. NN liegt. Der erforschte Teil der Salzgrabenhöhle endet genau dort, weshalb nur ein sehr begrenzter Ausschnitt aus dem Temperaturprofil der direkten Messung zugänglich ist!

Die Eisdegeneration beginnt mit dem Eindringen warmer Luft. Bereits im Februar steigt die Tageshöchsttemperatur zeitweise über den Schmelzpunkt und spätestens Anfang April liegt auch die mittlere Temperatur ständig darüber. Die Wetterführung weist zu diesem Zeitpunkt aber noch bergwärts und setzt somit das Eis einem „warmen Hauch“ aus. Nach der Inversion ist ein ständiger Zutritt von mit 4 °C vergleichsweise warmer Luft aus dem Höhleninneren gewährleistet, der ab April die Eisdegeneration rasch vorantreibt. Auch das Wasser spielt eine Rolle als Wärmelieferant. Das kleine Rinnsal, das von der Eingangshalle nach innen fließt, übermittelt Wärmeenergie von außen, unterhöhlt die mächtigen Eisgebilde und zerstört sie schließlich. Dabei dauert die Degeneration selbstverständlich um so länger, je mehr Eis zu schmelzen ist („Kältereservoir“). Im Juni 1984 war in der Eiskapelle noch ein einzelner Eisblock von 110 cm Länge, 40 cm Breite und 20 cm Dicke anzutreffen, der einen Überrest aus dem Winter darstellte.

Die Reichweite des Eisvorstoßes ist unterschiedlich. Durchgehende Vereisung ist im Winter bis etwa zum Gaudischluf immer anzutreffen, wobei sich in der Eiskapelle bis zu 8 m hohe Eisstalagmiten bilden und der Höhlenbach am Richters Rutsch erstarrt zu einem gut 1 m mächtigen Sohleislager, das den Einstieg in die Steilstufe erheblich verengt (Abb. 10 u. 11)! Einzelne Eisfiguren sind in jedem Winter bis zum Satteldom beobachtbar. Nur bei extremer Kälte sind gegen Ende des Winters auch in noch tagferneren Bereichen einzelne Eisformationen anzutreffen. Der weiteste Vorstoß wurde am 24.3.1962 beobachtet– er reichte bis hinter die Mitternachtshalle (briefl. Mittl. GRUBERT 2.2.1992)!

Über die Morphologie des Höhleneises und die Nomenklatur berichtet ausführlich KYRLE (1923: 110–163).

6 Thermodynamik

6.1 Grundbegriffe

Die Bedeutung der Thermodynamik als Unterscheidungskriterium zur Trennung exogener und endogener Größen wurde bereits erkannt. Die Konsequenzen sind allerdings erheblich weiterreichend, weshalb eine kurze und einfache Erklärung der Grundbegriffe anschließt.

Zunächst das *System*, das einen beliebigen, aber genau definierten Ausschnitt aus der Natur darstellt. Es ist durch eine gedachte oder reale *Grenze* vom restlichen Universum getrennt, das *Umgebung* genannt wird. Die Art des Systems hängt von der Qualität der Grenze ab, d.h. inwiefern eine Korrespondenz mit der Umgebung stattfinden kann:

- Isoliertes System, kein Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung ist möglich.
- Geschlossenes System, kein Stoff-, jedoch Energieaustausch ist möglich.
- Offenes System, Masse und Energie beliebig austauschbar.

In einem engen Zusammenhang hiermit steht die Frage, ob die Zustandsänderungen der Höhlenwetter adiabatisch oder isotherm verläuft.

Wird Luft komprimiert, wird Energie zugeführt und Arbeit am System verrichtet (man muß sich anstrengen, um den Kolben einer Pumpe gegen den zunehmenden Luftdruck zu bewegen), von der ein Teil in Wärme umgewandelt wird (die Pumpe wird heiß). Umgekehrt führt die Expansion zur Abgabe von Energie und das System kühlt sich ab (leerströmende Preßluftflaschen vereisen).

Die Entscheidung ist nun, ob die zu- oder abgeführte Energie tatsächlich die Temperatur des Systems verändern kann. Im isolierten System ist kein Wärmeaustausch mit der Umgebung möglich, woraus folgt, daß die Zustandsänderung adiabatisch sein muß. Das bei der Kompression oder Expansion auftretende Wärmedefizit kann nicht mit der Umgebung ausgeglichen werden, das System verändert seine Temperatur also.

Im geschlossenen oder offenen System wird die aus der geleisteten Arbeit freigesetzte Wärme sofort an die Umgebung abgegeben, die Temperatur des Systems bleibt konstant (isotherm).

Die Grenzen zwischen beiden Typen sind fließend und hängen u.a. von der Geschwindigkeit der Zustandsänderung ab. Erfolgt die Änderung langsam, hat in der Praxis auch ein in erster Näherung isoliertes System Zeit genug, den Temperatenausgleich zu vollziehen.

Genauere Angaben finden sich z.B. bei WESTPHAL (1970: 221ff, 248ff).

6.2 Zustandsänderung der Höhlenwetter

Die Entscheidung, ob die Zustandsänderung adiabatisch oder isotherm erfolgt, ist von großer Bedeutung für den Energiehaushalt der Höhle und damit auch für das Höhlenwetter. Es ist schließlich ein Unterschied, ob die Wärme in der Luft gespeichert bleibt (adiabatisch) oder ob sie an die Umgebung abgeführt wird (Eisdegeneration!).

Als System wird nach wie vor das Höhlenwetter, und als Umgebung die freie Atmosphäre, das Deckgebirge sowie der feste und flüssige Höhleninhalt angesehen.

Im Winter dringt die Kaltluft in die Höhle und steigt auf, wobei sie mit zunehmenden Höhe eine Druckentlastung erfährt. Die dabei von der Luft verrichtete Arbeit und die dazu erforderliche Wärme, die umgesetzt werden

muß, läßt sich berechnen und wird als *trockenadiabatischer Temperaturgradient* bezeichnet. Er beträgt $-0,98\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, d.h. Luft kühlt sich beim Aufstieg um 100 m um knapp ein Grad ab (nicht mit dem geometrischen Temperaturgradienten verwechseln) (LILJEUQUIST 1970: 85ff). Im Winter müßte die Luft am Ende des Riesenkamins um rund $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ kälter sein als am Eingang. Das Gegenteil ist jedoch der Fall, da nämlich Wärme vom Gestein an die Höhlenwetter abgegeben wird. Die Zustandsänderung ist somit isotherm und die Höhle keinesfalls ein isoliertes System.

Wäre sie adiabatisch, könnte die Wetterführung nicht funktionieren! Würde sich die Tagluft im Winter in der Höhle weiter abkühlen, was die trockenadiabatische Expansion fordert, käme praktisch eine Dichtezunahme und infolge dessen auch keine Wetterführung zustande! Im Sommer oben angesaugte Luft würde sich adiabatisch komprimiert erwärmen (statt abzukühlen!) und der Ansaugung durch die geringe Dichte Widerstand leisten.

Bei der Meßreihe vom 24.3.1984 wurde eine Windgeschwindigkeit im Gaudischluf von $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ermittelt, was bezogen auf den Gangquerschnitt einem Luftdurchsatz von rund $120\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ entspricht. Bei 101300 Pa Luftdruck, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 0% relativer Feuchte folgt daraus ein Massendurchsatz von $152,9\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Die Luft wird dabei von $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei Erreichen der temperaturkonstanten Zone erwärmt. Die spezifische Wärmekapazität von Luft beträgt $C = 1009\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (KUSCH 1989: 13), d.h. die Höhlenatmosphäre nimmt vom umgebenden Deckgebirge eine thermische Leistung von 2314 kW auf.

Mit den vorhandenen Zahlen ist es sehr schwierig, abzuschätzen, welche Rolle der terrestrische Wärmestrom für den Energiehaushalt eines Riesenhöhle systems spielt. Der Wärmestrom beträgt im globalen Schnitt $67\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (KAPPELMEYER 1985: 435), in den Nördlichen Kalkalpen der Schweiz liegt er bei $70\text{--}80\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ und gegen Österreich nimmt er auf $100\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ zu (pers. Mittl. M. LUETHI, ETH Zürich). Wenn man für das Deckgebirge um die Salzgrabenhöhle einen Wärmefluß von $80\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ annimmt und man sich den Wetterweg durch die Höhle als perfekt zylindrische Röhre von 3 m Durchmesser vorstellt, werden rein konduktiv pro Gangmeter $0,7536\text{ W}$ an die Höhlenatmosphäre abgegeben. Um die genannte Erwärmung um $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ hervorrufen zu können, müßte der Wetterweg über 3000 km lang sein! Das darf getrost als utopisch betrachtet werden. Für ein Bergwerk fand KAPPELMEYER (1985: 455) eine lineare Wärmeübertragung vom Gebirge an das Wetter in der Größenordnung von $0,1\text{ kW}$ pro Meter Streckenlänge. Auch hier müßte der Wetterweg immer noch über 20 km lang sein.

In der Höhle muß also eine um drei Zehnerpotenzen stärkere Energiequelle vorhanden sein, als die Erdwärme sie darstellt. Naheliegender ist, daß das Wasser, dessen spezifische Wärmekapazität mehr als viermal größer als jene von Luft ist, Wärme aus dem Aquifer in die durchlüfteten Höhlenteile abführt. Nicht vergessen werden darf auch, daß Wasser beim Gefrieren eine beträchtliche Erstarrungswärme ($332\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) abgibt, die sowohl vom

Gestein als auch direkt vom Höhlenwetter aufgenommen wird. Natürlich kann auch die Erstarrungswärme allein den Energiehaushalt nicht aufrecht erhalten, da täglich mehr als 600 Tonnen Eis neu gebildet werden müßten. Dagegen genügt es bereits, rund 140 Liter Wasser pro Sekunde von 4 °C auf 0 °C herunterzukühlen, um allein dadurch die Wärmezufuhr an die Luft zu erklären. Die Schüttung ist im Winter zwar recht niedrig, aber die drei Effekte –terrestrischer Wärmefluß, Abkühlung von Wasser, Erstarrungswärme des Eises– addieren sich ja auf.

Im Sommer kehrt sich das Spiel um: Die warme Außenluft wird in der Höhle abgekühlt, d.h. der Höhle wird Energie zugeführt. Diese heizt das Karstwasser auf bzw. dient zum Schmelzen des Höhleneises. Die derzeit verfügbaren Klimadaten aus der Salzgrabenhöhle sind jedoch viel zu knapp, als daß überprüft werden könnte, ob die im Winter aus der Höhle abgeführte Energie von der Energiezufuhr im Sommer vollständig ausgeglichen wird oder ob ein langfristiger Abkühlungs– oder Erwärmungstrend vorliegt.

7 Ausblick

Um die Wetterverhältnisse und den Energiehaushalt besser zu begreifen, sind weiterreichende Untersuchungen notwendig:

- Genaue Temperatur- und Feuchtemessungen innen und außen synchron, um die Intensität des Windes zu bestimmen.
- Windgeschwindigkeitsmessungen in allen Höhlenteilen, um Zahl und Lage der unbekanntenen Tagöffnungen zu ermitteln.
- Gesteinstemperaturen und Temperaturprofile Sommer/Winter, um Bedingungen des Eisvorstoßes und der Energiebilanz zu analysieren.

8 Wertetabellen

8.1 Meßgeräte

Für die Messungen kamen die folgenden Instrumente zum Einsatz:

Wingeschwindigkeit Schalenkreuz–Anemometer der Fa. Deuta mit Skalierung m/s

Temperatur Digital–Thermometer mit externem Fühler und LC–Display, Genauigkeit 0,1 °C, Fa. Clock

Luftfeuchte Kondensator–Hygrometer, Meßbereich 10–100 %, Modell EB 7802, Fa. Philips

Die Verfasser machen auf die fehlerhaften Feuchtemessungen aufmerksam, die in der Regel viel zu kleine Werte ergaben. Sie beruhen auf der mangelnden Kalibrierung des kapazitiven Hygrometers, das für hohe Feuchten nicht geeignet ist.

8.2 Meßwerte

Tabelle 1: Außentemperaturen

Datum	Uhrzeit	Ort	Temperatur [°C]
23.3.84	16:00	Traufk.	-10
24.3.84	12:00	Traufk.	-5
24.3.84	00:00	Traufk.	-11
2.6.84	15:00	Traufk.	12
2.6.84	15:00	35 m entfernt	17
3.6.84	7:45	Traufk.	9
3.6.84	7:45	35 m entfernt	13
17.5.85	14:30	Traufk.	10
17.5.85	14:30	35 m entfernt	14
18.5.85	16:00	Traufk.	10
18.5.85	16:00	35 m entfernt	13
19.5.85	7:00	Traufk.	6
19.5.85	7:00	35 m entfernt	9

Abbildungsnachweis

Abb. 2 und 3 wurden KLAPPACHER & KNAPCZYK (1977) entnommen, von den Verfassern umgezeichnet und nach Angaben aus der Topographischen Karte sowie von A.A. (1988) und BÄUMLER (1987) ergänzt. Die Vorlage für Abb. 5 stellte freundlicherweise CHRISTIAN GRUBERT zur Verfügung.

Literatur

- [1] A.A. (1988): Teilaufriss von der Mitternachtshalle mit hohen Raumteilen.—Abseiler, **8**: 4; Schwäbisch Gmünd.
- [2] BARROW, G.M. (1979): Physikalische Chemie.—3. Aufl., 916 S., 328 Abb., 119 Tab.; Braunschweig (Vieweg).
- [3] BÄUMLER, G. (1987): Neues aus der Salzgrabenhöhle.—Mitt. Verb. dt. Höhlen. u. Karstforsch., **33** (2): 43; München.

- [4] BLÜTHGEN, J. & WEISCHET, W. (1980): Allgemeine Klimageographie.—3. Aufl., 887 S.; Berlin (de Gruyter).
- [5] BÖGLI, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie.—292 S., 160 Abb., 12 Taf.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- [6] CIGNA, A.A. (1967): An Analytical Study of Air Circulation in Caves.—*Int. Journ. Speleo.*, **3** (1/2): 41; Bologna.
- [7] CIGNA, A.A. (1968): Air Circulations in Caves.—*Proc. 4th Int. Congr. Speleology.*, 43–49; Ljubljana.
- [8] CONN, H.W. (1966): Barometric Wind in Wind and Jewel Caves, South Dakota.—*Nat. Speleo. Soc. Bull.*, **28** (2): 55–69, 8 Abb.; Huntsville.
- [9] EICHLER, H. (1980): Höhlenklima und speläometeorologische Phänomene der Eberstadter Tropfsteinhöhle.—*Karst u. Höhle*, **1978/79**, 75–82, 5 Abb.; München.
- [10] ENDERS, G. (1979): Theoretische Topoklimatologie.—*Forschungsber.*, **1**, 92 S., 40 Abb., 22 Tab.; Berchtesgaden (Nationalpark Berchtesgaden).
- [11] ERASO, A. (1965): Tentative Nomogram for Cave Climate Calculations.—In: Štelcl, O. [Hrsg.]: *Problems of the Speleological Research*, 175–185, 4 Abb.; Prague (Academia).
- [12] GRUBERT, C. (1990): Überlegungen zur Hydrologie der Salzgrabenhöhle.—*Jahresbericht der Speleogruppe '86*, **1989**: 44–45, 2 Tab.; Hannover.
- [13] HAUSER, E. & OEDL, R. (1926): Eisbildungen und meteorologische Beobachtungen.—*Speläologische Monogr.*, **6**: 77–105, 15 Abb., 13 Tab.; Wien.
- [14] KAPPELMEYER, O. (1985): Geothermik.—In: BENDER, F. [Hrsg.]: *Angewandte Geowissenschaften*, Bd. 2: 435–490, 53 Abb., 14 Tab.; Stuttgart (Enke).
- [15] KLAPPACHER, W. & KNAPCZYK, H. [Hrsg.] (1977): *Salzburger Höhlenbuch*.—**2**: 1–348, 197 Abb.; Salzburg.
- [16] KUSCH, L. (1989): *Mathematische und naturwissenschaftliche Formeln und Tabellen*.—6. Aufl., 109 S.; Düsseldorf (Cornelsen).
- [17] KYRLE, G. (1923): *Theoretische Speläologie*.—*Speläologische Monogr.*, **1**, 353 S., 187 Abb., 10 Taf.; Wien.
- [18] LILJEQUIST, G.H. (1974): *Allgemeine Meteorologie*.—368 S., 336 Abb., 24 Tab., 30 Taf.; Braunschweig (Vieweg).

- [19] LÜCK, W. (1964): Feuchtigkeit. Grundlagen. Messen. Regeln.—296 S., 201 Abb., 41 Taf.; München, Wien (Oldenbourg).
- [20] PAPENDICK, M. (1998): Tracing in der Salzgrabenhöhle.—Mitt. Verb. dt. Höhlen. u. Karstforsch., **44** (2): 48; München.
- [21] TRIMMEL, H. (1968): Höhlenkunde.—300 S., 88 Abb.; Braunschweig (Vieweg).
- [22] WESTPHAL, W.H. (1970): Physik.—25./26. Aufl., 715 S., 139 Abb., 6 Tab.; Berlin (Springer).
- [23] WIGLEY, T.M.L. & BROWN, M.C. (1976): The Physics of Caves.—In: FORD, T.D. & CULLINGFORD, C.H.D. [Hrsg.]: The Science of Speleology, 329–358, 7 Abb.; London (Academic Press).

Übersichtskarte Lage der Salzgrabenhöhle

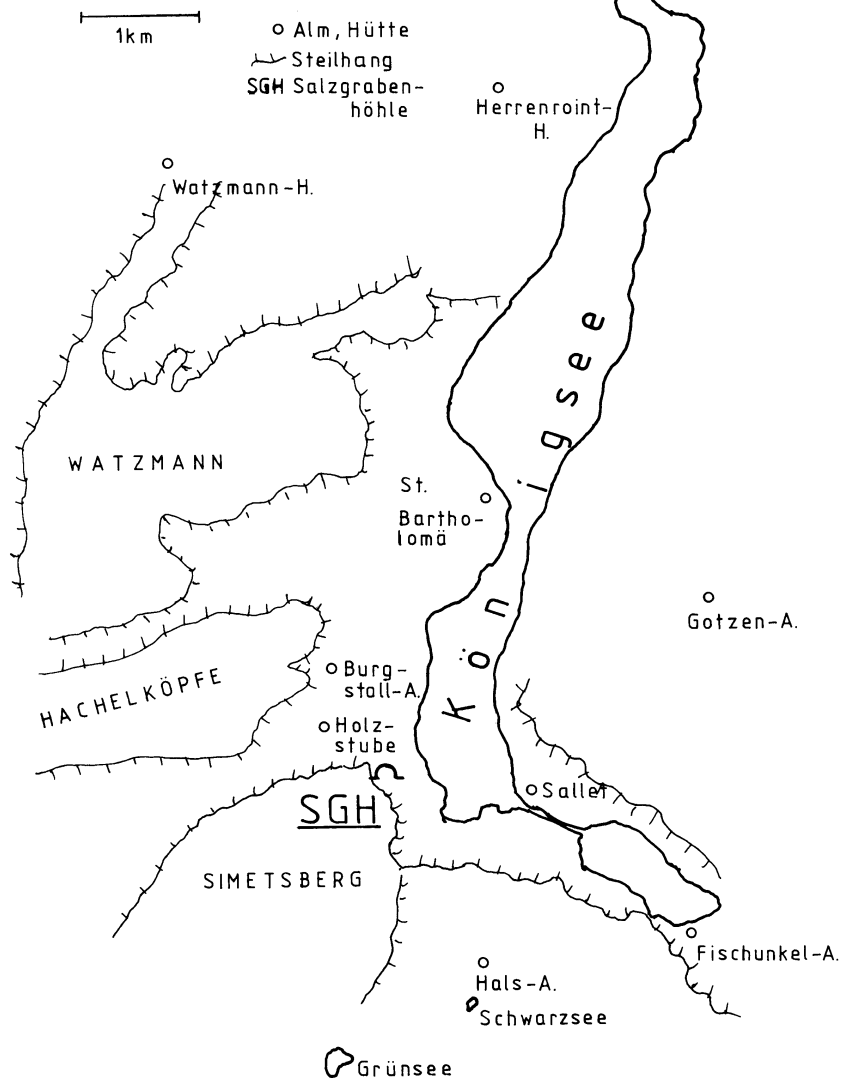


Abbildung 1: Lage der Salzgrabenhöhle im Nationalpark Berchtesgaden

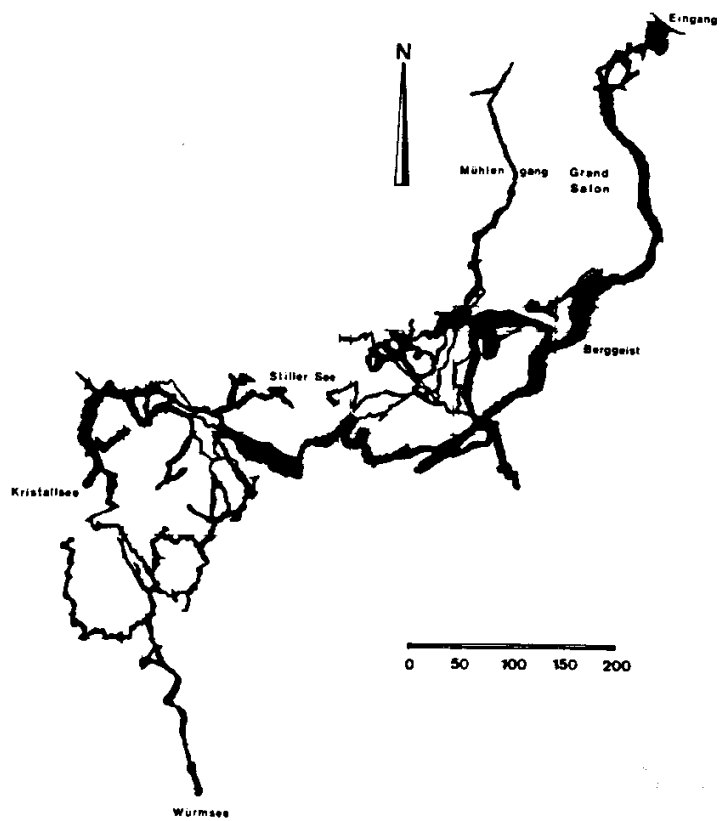
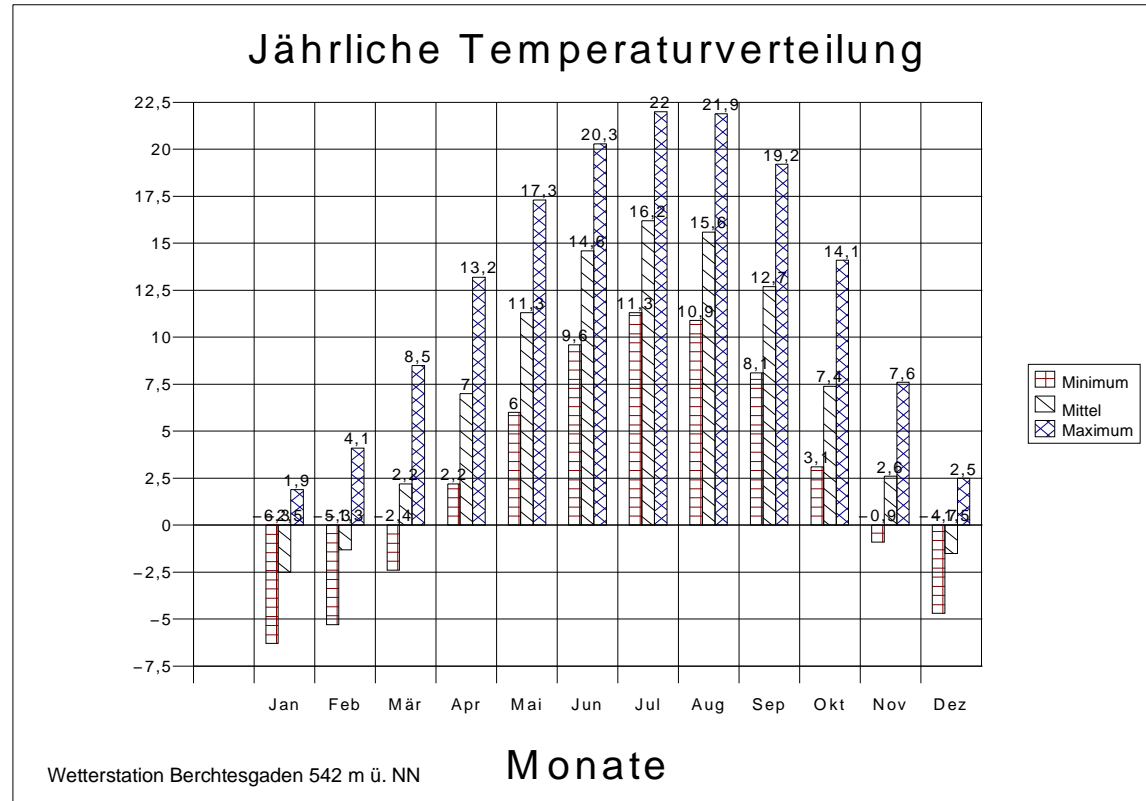


Abbildung 2: Grundriß der Salzgrabenhöhle



Abbildung 3: Aufriß der Salzgrabenhöhle

Abbildung 4: Jährlicher Temperaturverlauf für die Außenatmosphäre



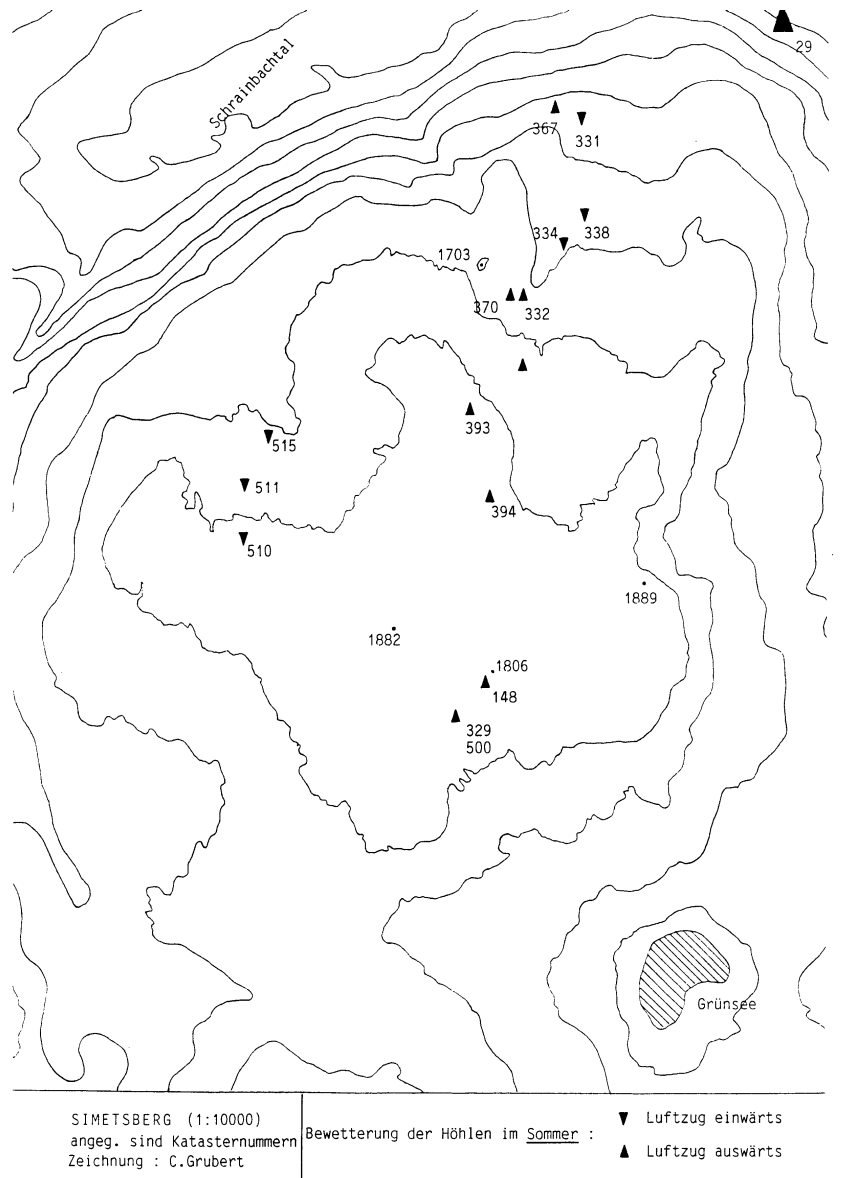


Abbildung 5: Lageplan der bewetterten Schächte auf dem Simetsbergplateau

Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und –Dichte

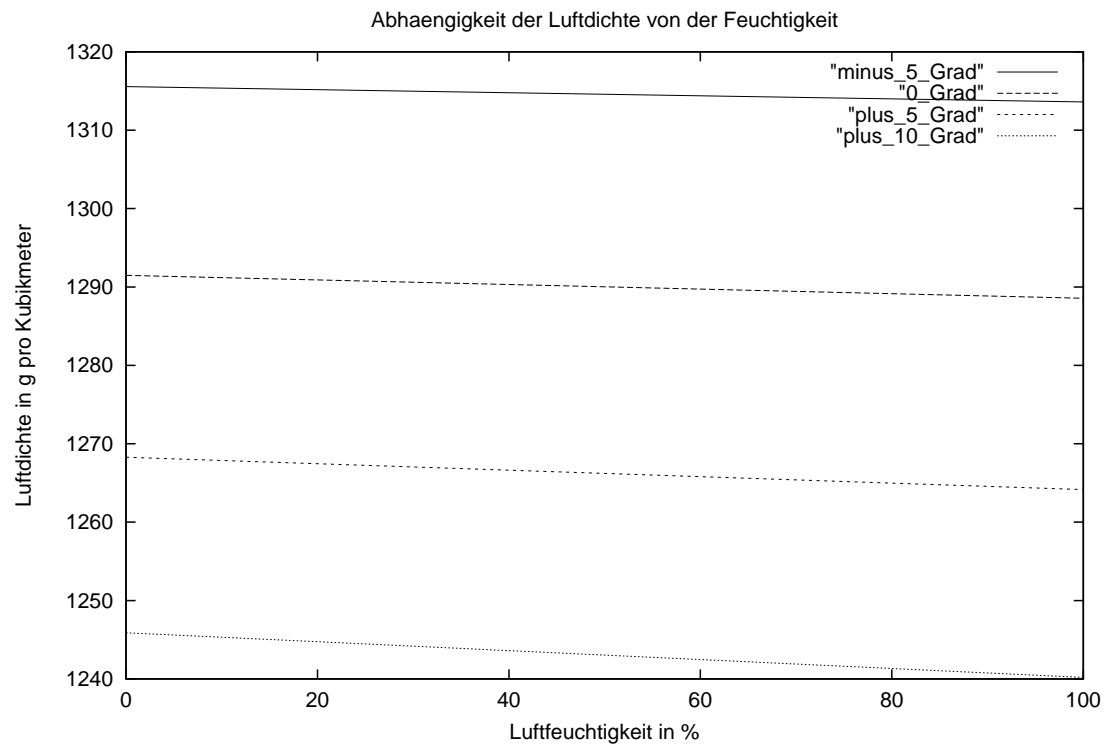
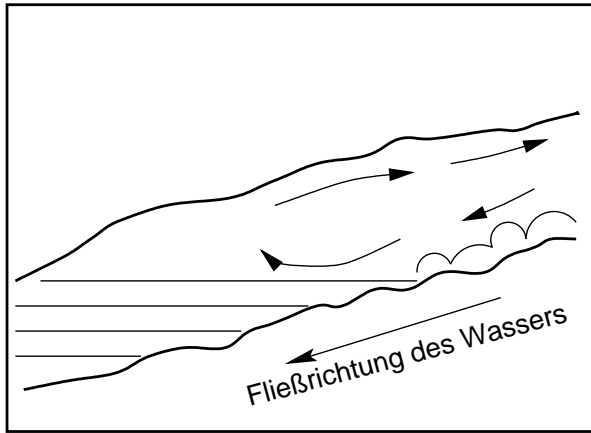
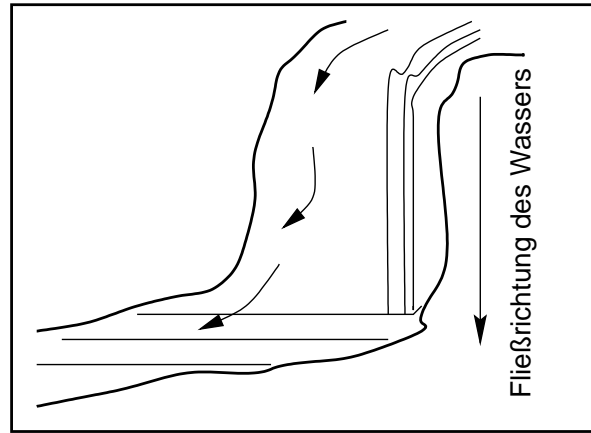


Abbildung 7: Das Achental bei erhöhter Schüttung (Foto: G. Novak)

Abbildung 8: Die Strömungssysteme im Achantal und der Wasserfallkluft



a.) Schnitt durch das Achantal
(geschlossene Luftzirkulation)



b.) Schnitt durch die Wasserfallkluft
(offene Luftzirkulation)

Abbildung 9: Jährliche Verteilung der Niederschläge

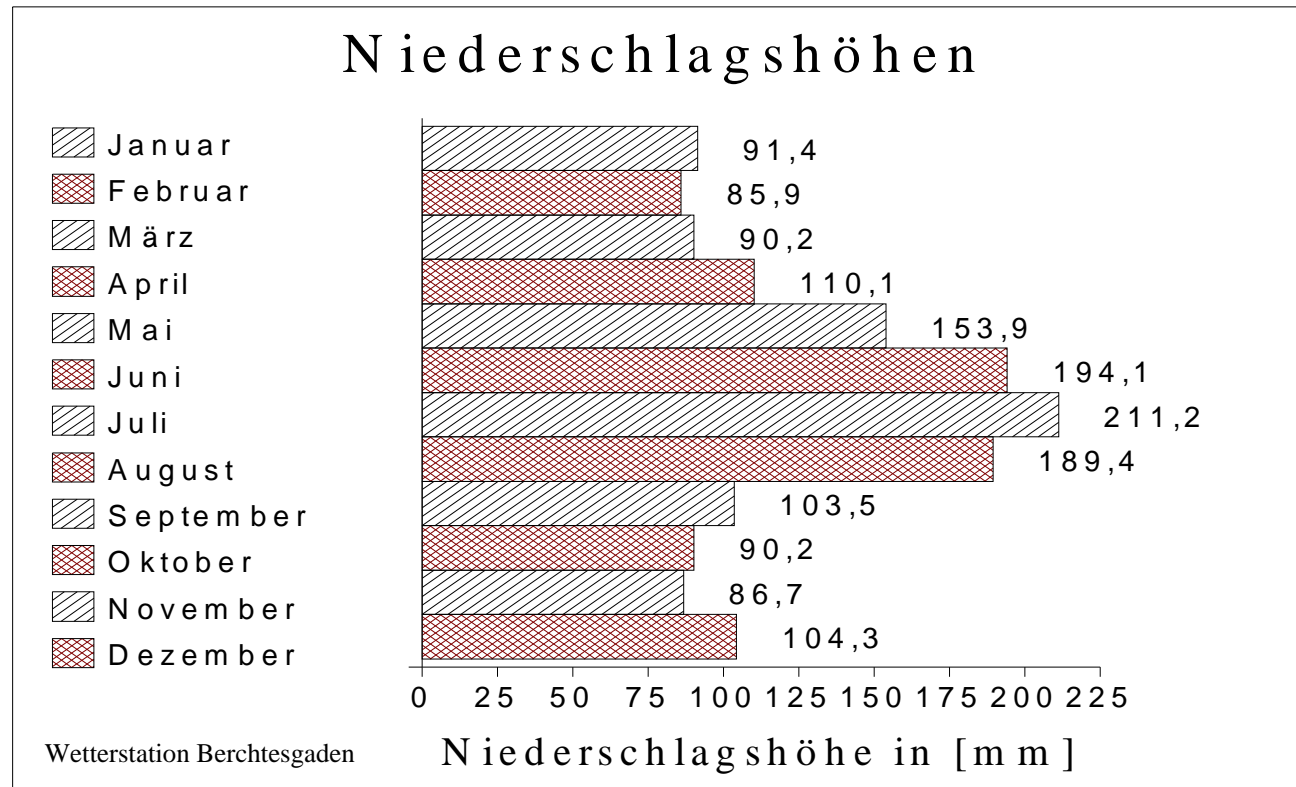


Abbildung 10: Der „Richters Rutsch“ im Sommer (Foto: G. Novak)

Abbildung 11: Der „Richters Rutsch“ im Winter mit mächtiger Vereisung
(Foto: G. Novak)

Tabelle 2: Lufttemperaturen

Datum	Uhrzeit	Ort	Temperatur [°C]
23.3.84	16:30	Einstiegsklamm	-8,9
23.3.84	16:30	Eiskapelle	-5
23.3.84	16:30	Eiskapelle, Nische	-4,8
24.3.84	12:00	Einstiegsklamm	-6,4
24.3.84	12:00	Eiskapelle	-5
24.3.84	00:00	Eingangshalle	-10
24.3.84	00:00	Eiskapelle, Eissäulen	-8
24.3.84	–	Richters Rutsch	-2
24.3.84	–	Anfang Gaudischluf	0,1
24.3.84	–	Ende Gaudischluf	0,1
24.3.84	–	Satteldom	2
24.3.84	–	Pyramidenhalle	2
24.3.84	–	Wasserfallkluft	2,8
24.3.84	–	Grünsee	2,9
24.3.84	–	Riesenkamin unten	2
24.3.84	–	Riesenkamin mitte	2,2
24.3.84	–	Riesenkamin oben	2,6
2.6.84	–	Eiskapelle	3,8
2.6.84	–	Aufstieg Satteldom	6,7
2.6.84	–	Satteldom	6
2.6.84	–	Trichter	5
2.6.84	–	Pyramidenhalle	6,8
2.6.84	–	Wasserfallkluft	5
2.6.84	–	Grünsee	5
2.6.84	–	Riesenkamin	4
17.5.85	–	Eiskapelle	4,4
17.5.85	–	Gaudischluf	4,4
17.5.85	–	Grand Salon	5,4
17.5.85	–	Satteldom	5,4
17.5.85	–	Trichter	4,1
17.5.85	–	Pyramidenhalle	5,9

Tabelle 3: Lufttemperaturen (*Fortsetzung*)

Datum	Uhrzeit	Ort	Temperatur [°C]
17.5.85	–	Wasserfallkluft	5
17.5.85	–	Riesenkamin oben	3,9
3.8.87	–	Eiskapelle	4,3
3.8.87	–	Eiskapelle, Nische	5,8
3.8.87	–	Gaudischluf	4
3.8.87	–	Satteldom	5
3.8.87	–	Trichter	4,6
3.8.87	–	Wasserfallkluft	5
3.8.87	–	Riesenkamin	4,3
3.8.87	–	Pyramidenhalle	(6)

Tabelle 4: relative Luftfechtigkeiten

Datum	Uhrzeit	Ort	Feuchte [%]
24.3.84	–	Eiskapelle	71
24.3.84	–	Satteldom	74
24.3.84	–	Pyramidenhalle	84
24.3.84	–	Wasserfallkluft	80
24.3.84	–	Grünsee	81
24.3.84	–	Riesenkamin	70
2.6.84	–	Eiskapelle	81
2.6.84	–	Satteldom	70
2.6.84	–	Trichter	80
2.6.84	–	Pyramidenhalle	96
2.6.84	–	Wasserfallkluft	96
2.6.84	–	Riesenkamin	77
2.6.84	–	Grünsee	90
17.5.85	–	Eiskapelle	76
17.5.85	–	Grand Salon	66
17.5.85	–	Satteldom	66
17.5.85	–	Trichter	70
17.5.85	–	Pyramidenhalle	95
17.5.85	–	Wasserfallkluft	90
17.5.85	–	Riesenkamin	80
3.8.87	–	Eiskapelle	85
3.8.87	–	Eiskapelle, Nische	86
3.8.87	–	Satteldom	72
3.8.87	–	Trichter	79
3.8.87	–	Pyramidenhalle	98
3.8.87	–	Wasserfallkluft	96
3.8.87	–	Riesenkamin	79

Tabelle 5: Windgeschwindigkeiten

Datum	Uhrzeit	Ort	Windgeschw. [m/s]
24.3.84	–	Gaudischluf	15
24.3.84	–	Grand Salon	5
24.3.84	–	Satteldom	1
3.6.84	–	Gaudischluf Mitte	5
3.6.84	–	Gaudischluf Ende	4,5
3.6.84	–	Druckstollen	6
17.5.85	–	Gaudischluf Anfang	10,5
17.5.85	–	Gaudischluf Ende	10,5
3.8.87	–	Gaudischluf Mitte	8,3
3.8.87	–	Gaudischluf seidl.	5,5