

Die Wandmalereien in der so genannten Paulusgrotte von Ephesos: Studien zur Ausführungstechnik und Erhaltungsproblematik, Restaurierung und Konservierung

1. Kultur- und kunsthistorische Einführung

Für all jene, die das Monument noch nicht kennen, soll zunächst eine kleine Einführung geboten werden¹.

Bereits seit mehr als 100 Jahren ist Ephesos die bedeutendste österreichische Ausgrabung im Ausland. Sie befindet sich an der Westküste Kleinasien etwa auf der Höhe der griechischen Insel Samos.

Die von einer Mauer umgebene Stadt liegt zwischen zwei Bergen, dem Panayir- und dem Bülbüldağ, wobei sich das Zentrum in byzantinischer Zeit zum Hafen hin verlagerte. Heute führt der Weg für die Touristen vom oberen Eingang über die Arkadiane zu den Hanghäusern, der Celsusbibliothek, dem Theater bis hin zur Marienkirche.

Extra muros befinden sich der Friedhof der Sieben Schläfer, das Artemision und der Aya Soluk mit der Johanneskirche.

Außerhalb des Ausgrabungsgeländes auf ca. 80 m Seehöhe liegt im Nordabhang des Bülbüldağ die so genannte Paulusgrotte².

Eigentlich handelt es sich dabei um zwei bearbeitete Felshöhlen, eine kleine und eine große, mit einem etwa 3 × 5,5 m großen Vorplatz, der dann wahrscheinlich in byzantinischer Zeit durch einen Vorbau mit Kuppel überbaut wurde. Leider haben sich von seiner Ausmalung nur mehr geringe Reste erhalten.

¹ Hinsichtlich Finanzierung möchten wir uns in erster Linie bei der Universität Wien bedanken, ebenso aber beim Österreichischen Archäologischen Institut als Träger der Grabungslizenz, bei der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, der Universität für angewandte Kunst Wien, der Hochschuljubiläumsstiftung und den vielen anonymen Sponsoren und unentgeltlichen Mitarbeitern.

² Zu ihr vgl. R. PILLINGER, Recente scoperta di antiche pitture ad Efeso. *Eterea* 4/18 (1999) 64; DIES., Neu entdeckte antike Malereien in Ephesus. Eine Darstellung des Apostels Paulus. *Welt und Umwelt der Bibel* 15/1 (2000) 282; DIES., Neue Entdeckungen in der sogenannten Paulusgrotte von Ephesos. *MiChA* 6 (2000) 16–29; DIES., Wandmalereien und Graffiti als neue Zeugnisse der Paulusverehrung in Ephesus. In: M. THEOBALD, *Mit den Augen des Herzens sehen. Der Epheserbrief als Leitfaden für Spiritualität und Kirche*. Würzburg 2000, 213–226; DIES., Paolo e Tecla ad Efeso. Nuove scoperte nella grotta (chiesa rupestre) sul Bülbüldağ. In: L. PADOVESE (Hg.), *Atti del VIII Simposio di Efeso su S. Giovanni apostolo*. Roma 2001, 213–237; DIES., Paolo e Tecla a Efeso. *Eterea* 7/31 (2002) 26–37; DIES., Discovery of St. Paul's Grotto in Ephesus. Some Recent Archaeological Findings. *The Pauline Cooperator* 3/2 (2002) 20; DIES., Das frühbyzantinische Ephesos. Ergebnisse der aktuellen Forschungsprojekte. Die sogenannte Paulusgrotte. In: *Neue Forschungen zur Religionsgeschichte Kleinasien* = E. Schwertheim zum 60. Geburtstag = *Asia Minoris Studien* 49 (2003) 158–163 und Taf. 20–25; DIES., Neues zur sog. Paulusgrotte in Ephesos. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Christliche Archäologie* 21 (2005) 5f.; DIES., „Vielschichtige“ Neuigkeiten in der so genannten Paulusgrotte von Ephesos (dritter vorläufiger Bericht zu den Jahren 2003 und 2004). *MiChA* 11 (2005) 56–62 und DIES. (gemeinsam mit E. Eseroğlu), Efes'te 2000 yıllık bir mağara. Rehber Dünyası 37 (2005) 67.

Die große Höhle ist etwa 15 m lang, 2,10 bis 2,70 m breit und 2,30 m hoch und präsentierte sich bei der Wiederauffindung 1995 innen völlig übertüncht.

Unklar waren die in Augenhöhe auf beiden Seiten des Ganges bis nach hinten vorhandenen Löcher, die sich später – nach Abnahme der Tünche – als die ausgeschlagenen Köpfe oder Gesichter der gemalten Figuren erwiesen.

Nach einer gründlichen Reinigung 1996 erfolgte 1997 die erste genaue Vermessung, eine traditionelle Plan- und Bauaufnahme mit Grundriss und Längsschnitt durch die gesamte Anlage sowie den Vorplatz, die kleine Höhle, die große mit einer großen Ausbuchtung an der rechten Seite, einer größeren und einer kleineren Nische an der linken Seite und einem etwas verbreiterten, in Form eines Rechtecks bearbeiteten hinteren Teil (Abb. 1). All dies zeigt auch ein 2007 erstelltes 3-D-Laserscanmodell.

Ebenfalls schon 1997 erfolgte die Dokumentation der über 300 Graffiti (Ritz-), Dipinti (Mal-) und sonstigen Inschriften – gemeinsam mit H. TAEUBER – auf Plastikfolie. Es handelt sich dabei um Anrufungen wie „Herr erbarme Dich!“, „Herr erbarme Dich Deines Dieners ...“, wobei die genannten Namen durchwegs griechische sind. Dazwischen gibt es auch Symbole wie das Stauro- und das Christogramm.

Besonders hervorzuheben ist eine Ritzung an der rechten Wand nicht weit hinter der großen Ausbuchtung. Sie lautet: „Eu, Paulus, erbarme Dich Deines Dieners ...“ und dürfte für F. Miltner der Anlass zur Benennung der Höhle als „Paulusgrotte“ gewesen sein.

Übrigens belegen diese „Inschriften“ sowie die gefundenen neuzeitlichen Kupfermünzen (größtenteils aus dem 19. Jh.) die durchgehende Benützung des Ortes von der Antike bis zur Gegenwart.

Von Bedeutung ist auch die zum Teil als Flickmaterial für die Eingangswand verwendete Bauskulptur. Ein großes Kämpferkapitell mit Kreuz stammt wahrscheinlich vom Vorbau. Pilaster-, Säulchen-, Schrankenplatten- und Leistenreste sowie ein Tischfuß und das Fragment einer (Altar)Tischplatte legen eine Abschränkung des etwas verbreiterten hintersten Teils der Grotte nahe, zumal da dort auch noch die Einputzspuren eines Pfeilers und das einst erhöhte Bodenniveau sichtbar sind. Die Rekonstruktion darf man sich in Form eines bescheidenen Tempions, wie z. B. in Kaisariane bei Athen³, vorstellen.

Nachdem bereits im eingangs erwähnten Vorbau Wandmalereireste gefunden wurden und auch die Tünche im Inneren der großen Höhle vereinzelt abgegangen war, stand fest, dass hier ebenfalls mit Malerei zu rechnen ist.

Daher erfolgte 1998 die erste partielle Abnahme der Kalkschicht durch K. HEROLD, den Restaurator des Österreichischen Archäologischen Instituts, zunächst in unmittelbarer Nähe des oben zitierten Paulosgrafittos. Dabei kam ein einzigartiges Paulusporträt samt gemalter griechischer Beischrift zutage.

Nach einer durch den in Wien stattfindenden 14. Internationalen Kongress für Christliche Archäologie bedingten einjährigen Arbeitspause wurde 2000 und 2001 mit der eigentlichen Restaurierung der Grotte durch das im Folgenden zeichnende italienische Team begonnen. Dieses legte gleich zu Beginn mindestens drei Putz- und Malschichten im vorderen Teil der Anlage frei.

Die älteste (unterste) rechts über der großen Ausbuchtung neben dem Eingang zeigt Pflanzendekor, nämlich große Blattwedel und Rosen auf ocker Grund. Ebensolche findet man auch im Hanghaus 2, wo sie ins 4. Jh. datiert werden. Jedenfalls scheinen sie ein gängiges ikonographisches Motiv gewesen zu sein.

³ Vgl. TH. CHATZIDAKIS, *Das Kloster Kaisariane*. Milano 1980, Abb. 5b.

Die nächstjüngere Putzschicht (darüber) links der großen Aushöhlung zeigt die bildliche Wiedergabe der Predigt des Apostels Paulus vor Thekla (in der *aedicula*) und ihrer Mutter Theoklia – übrigens alle mit Beischrift – nach den neutestamentlichen apokryphen *Acta Pauli et Theclae*. Diese Szene war im Februar 2007 bereits Gegenstand eines Vortrags im Rahmen eines Symposiums über Paratexte⁴. Nur so viel sei hier zusammenfassend gesagt, dass es sich offensichtlich um eine literarische Anregung handelt, die zu dieser narrativen Darstellung geführt hat, zumal da auch Theoklia in der Antike sonst nie abgebildet wird. Allerdings erstaunt es, dass die Quelle kein kanonischer, sondern ein „apokrypher“ Text ist. Aufgrund von Vergleichsbeispielen, einem möglichen Apostelbild aus dem Aurelierhypogäum in Rom und der Malerei-fragmente aus dem so genannten Lukasgrab in Ephesos, kann man diese Malerei etwa an das Ende des 5. Jh. datieren.

Zu beachten sind bei Theoklia wieder die ausgeschlagenen Augen und der auch brandgeschwärzte Gestus der rechten Hand.

Darüber steht etwas rechts davon eine Stifterinschrift: ... ΥΠΕΡ ΕΥΧΗC („aufgrund eines Gelübdes des“) ... der Name fehlt ... ΚΑΙ ΤΟΥ ΟΙΚΟΥ ΑΥΤΟΥ („und seines Hauses“).

Gegenüber (links vom Eingang) befindet sich ein Mann ebenfalls mit ausgeschlagenem Gesicht und senkrecht aufgerichtetem Schwert in der Rechten, der durch die wenigen roten Farbspuren vor ihm als Abraham bei der Opferung seines Sohnes Isaak bestimmt werden kann. Vergleichsbeispiele wie etwa eines aus der so genannten Neuen Katakombe an der Via Latina in Rom können (seitenverkehrt) diese Deutung nur bestätigen. Damit ist ein alttestamentliches Bild dargestellt, das in äußerster Kurzfassung wie in den Katakomben den so genannten fruchtbaren Moment (Kairos) wiedergibt – im Osten (Kleinasien) offenbar genauso wie im Westen (Rom). Die Anregung kommt diesmal wohl aus der Katechese. Wesentlich erscheint auch die Beobachtung, dass diese Szene anscheinend bereits in der Antike einmal ausgebessert wurde.

Geht man an dieser (Ost)Wand weiter nach hinten, findet man in der ersten arkosolartigen Nische mit lichter Höhe von 1,10 m wieder mindestens zwei übertünchte Malschichten, nämlich nimbierte weißgewandte Gestalten, welche links und rechts eines mit einem Tuch bedeckten Tisches barfuß auf einer grünen Wiese stehen und einen ausgeschlagenen kreuznimbierten Kopf (Christi).

Kurz dahinter folgt die zweite, etwas kleinere Nische mit einer thronenden Gottesmutter – ebenfalls mit ausgeschlagenem Kopf – samt kreuznimbiertem Christuskind am Schoß und weiteren (akklamierenden?) Gestalten links und rechts. Dieses Bild war vielleicht der Anlass für O. Benndorf, die Höhle 1906 als „verborgene Gottesmutter“ zu bezeichnen.

Da beide Nischen noch nicht fertig restauriert sind, ist es noch zu früh, eine Deutung oder eine Datierung zu geben. Fest steht, dass ihre Darstellungen an Apsisbilder erinnern.

2002 musste aus finanziellen Gründen die Restaurierung der Wandmalereien ausgesetzt werden.

2003 wurde die Arbeit weitergeführt.

Nun konzentrierten sich die Restauratorinnen besonders auf den hintersten erweiterten Bereich und dort vor allem auf die Ostwand.

⁴ Näheres bei R. PILLINGER, *Paratextual Literature in Early Christian Art (Acta Pauli et Theclae)*. In: *International Symposium on Paratextual Literature in Ancient Near Eastern and Ancient Mediterranean Cultures and its Reflections in Medieval Literature*, Wien 22.–27. Februar 2007 (in Druck).

Insgesamt sind hier (Abb. 7a und b) fünf Putz- und wahrscheinlich vier Malschichten erhalten. Die älteste Schicht ist offenbar nur ein rosa Unterputz ohne Darstellungen. Die zweitälteste Schicht (gelb markiert und Abb. 8) zeigt einen blauen Kreis von 46 cm Durchmesser mit gelbem Rand über Flüssen samt Beischriften. Von der drittältesten Schicht (grün und Abb. 12) ist nur ein Baum mit Früchten und fliegenden Blättern erhalten. Die vierte Schicht (rosa und Abb. 14) setzt sich an der Süd- und Westwand fort und zeigt überlebensgroße nimbierte Figuren, deren Köpfe fast durchwegs ausgeschlagen sind. Die fünfte (jüngste) Schicht (blau markiert) ist nur in der Ecke rechts oben erhalten. Geht man nun zur Bildbetrachtung den Weg umgekehrt wieder zurück, so findet man an der obersten (jüngsten) und sicher byzantinischen Schicht möglicherweise aus dem 12. bzw. 13. Jh. einen Krieger mit Lanze, der sich durch die Beischrift und Vergleichsbeispiele etwa aus Sv. Kliment in Ochrid sowie vom Sinai als der Soldatenheilige Georg identifizieren lässt. Auf Schicht Nr. 4 kann man trotz des teilweise sehr schlechten Erhaltungszustands zwei der vier überlebensgroßen nimbierten Figuren als Frauen bestimmen. Die Fortsetzung an der Stirn(Süd)wand (Abb. 14) zeigt in der Mitte einen bartlosen, d. h. jugendlichen, kreuznimbierten Christus (IC XC) mit erhobener Rechter und Schriftrolle in der Linken auf einem Regenbogen sitzend in einer Aureole. Eine ikonographische Parallele dazu liefert das Apsismosaik von Hos. David in Thessaloniki. Zur Rechten Christi steht eine leicht gedrehte ältere nimbierte Gestalt mit Kodex (vielleicht ein Apostel oder Heiliger), zur Linken eine weitere mit einem Stab, der nach Vergleich mit einem Mosaikbild in Hag. Dimitrios in Thessaloniki und dem Elfenbeindiptychon des Lampadios auf einen weltlichen Würdenträger weist. Davor befindet sich links eine kleinere männliche Figur (mit Tonsur?), die eine noch kleinere (wahrscheinlich ein Kind) in langen Hosen und mit vorgestreckten Armen heranzuführt. Auch dazu gibt es eine ikonographische Parallele in Hag. Dimitrios/Thessaloniki. Gegenüber (rechts) steht – der Kopfbedeckung nach – eine weibliche Gestalt, deren Gesicht wieder ausgeschlagen ist und deren Gewand auf die Westwand übergreift. Dort folgen drei weitere überlebensgroße nimbierte Männer – zwei mit jeweils einem Kodex, einer abermals mit dem bereits an der Südwand gezeigten Stab in der Hand, womit es sich wahrscheinlich – wie dort – um geistliche und weltliche Würdenträger (als Stifter?) handelt – und das alles jeweils in bester Qualität. Der bartlose Christus und die Vergleichsbeispiele aus Thessaloniki legen eine Datierung in vorikonoklastische Zeit (etwa 6. Jh.) nahe.

Zur Ostwand zurückgekehrt erinnert die Schicht Nr. 3 mit dem Früchte tragenden Baum (Abb. 12) an Paradiesesdarstellungen.

Die zweitälteste Putzschicht dürfte die älteste Malschicht sein, da die darunter liegende erste wahrscheinlich nur ein rosa Unterputz ist. Auf ihr wurde bis jetzt keine Malerei gefunden.

Die älteste Malschicht (Abb. 8) zeigt nun in einem gelb gerahmten blauen Kreis von 46 cm Durchmesser den Oberkörper einer jugendlichen Gestalt auf einem von zwei Pferden gezogenen Wagen, einer Biga, von der nur noch Reste der zwei Räder erhalten blieben. Im oberen Kreessegment sind zwei Füße eines Menschen erkennbar. Gelbe Sterne erleichtern die Deutung des blauen Kreises als Himmel. Bei der Figur denkt man zunächst an den Sonnengott Helios, der in griechisch-römischer Tradition auch als in den Himmel fahrender Mann dargestellt wird. Allerdings zeigen die erhaltenen Beispiele etwa an der Decke im Julierhypogäum von Rom oder das Fußbodenmosaik der Synagoge von Hammat Tiberias diesen immer mit Nimbus und/oder Strahlenkranz um

den Kopf. Außerdem gibt es noch ein markantes Detail in unserer Darstellung, nämlich einen dunkelfarbenen Gewandrest, der die Identifikation des in den Himmel Fahrenden als Elija nahe legt. Er wird vor allem in früherer Zeit meist jugendlich und immer mit dem (bisweilen herabfallenden) Mantel dargestellt. In der Malerei der so genannten Neuen Katakombe an der Via Latina in Rom fährt er eine Quadriga und reicht sein Pallium Elischa. Hier dagegen weist das zweite alttestamentliche Bild – wie schon das Isaakopfer – kürzeste Form auf.

Unter- und damit auch außerhalb des Kreises erkennt man vier Flüsse mit jeweils schwarzen Malinschriften, die lauten: ΦΗCΩΝ ΙΓΡ.ΕΥΦΡΑΤΧ ΕΥΒΗΛΑΤ. „Phison, (T)igr(is), Euphrat“ und „Bibil(.)“. Bei den drei ersten Namen handelt es sich sicher um Paradiesesflüsse. Anstelle des vierten (Gihon) steht das Land, das Phison durchfließt, Euilat nach der LXX (Gen 2,11f.).

Eine zuverlässige Datierung ist derzeit unmöglich. Im Kontext der übrigen Schichten und in relativer Chronologie könnte man vielleicht an eine Entstehung bereits im 3. Jh. denken.

Tatsache ist, dass die Höhle in den ersten sieben christlichen Jahrhunderten zumindest im Presbyteriumsbereich wenigstens drei Mal überputzt und mit jeweils thematisch völlig neuer Malerei ausgestattet wurde. Der Grund dafür kann Zerstörung vielleicht durch Brand ebenso gewesen sein wie theologische Neuorientierung.

Zuletzt bleibt noch die Frage, durch wen und wann die Tünche aufgebracht wurde. Hier helfen zwei Kohleinschriften. Die eine an der Ostwand links des Eingangs vor dem Kopf des Abraham, also unter der Tünche, nennt das Jahr 1890. Die andere mit der Jahreszahl 1897 steht rechts des Eingangs auf der Tünche der Westwand. Folglich wurde die Tünche zumindest in diesem Bereich zwischen 1890 und 1897 aufgebracht – wahrscheinlich zum Schutz der Malerei, deren Köpfe fast alle bereits vorher abgeschlagen und wohl von den christlichen Benützern der Grotte teilweise wieder zugeputzt worden waren.

Interessanterweise erfolgte dieses Tünchen genau zur Zeit der Wiederentdeckung von Meryemana durch die Lazaristen. Ob es allerdings einen direkten Zusammenhang gibt, ist bislang nicht erwiesen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass vor allem aufgrund der presbyteriumsartigen Erweiterung des hintersten Bereichs der Grotte sowie seiner Abschränkung (Fragmente von Schrankenplatten sind erhalten) eine liturgische Verwendung als „Höhlenkirche“ nahe liegt. Unterstützt wird diese Auffassung u. a. durch die eingangs erwähnten Skulpturteile, die – wie schon gesagt – die Rekonstruktion eines Templons in der Art von Kaisariane erlauben. Auch die in der Malerei präsentierten Themen, darunter Paradiesesbilder und der apokalyptische Christus, sprechen für eine derartige Verwendung. Allerdings kann es sich dabei nicht um eine Gemeindekirche für große Feste, sondern wie heute noch bei so vielen kleinen Kirchen in Griechenland, nur um eine Kultstätte handeln, die an bestimmten Tagen aufgesucht wurde z. B. von der Familie des Stifters, nach einem Gelübde, um etwas zu erflehen oder um zu danken.

Noch nicht zu beantworten ist die Frage, wer hier verehrt wurde.

1892 berichtet der Vorsteher der griechisch orthodoxen Gemeinde von Sirinçe, dem Rückzugsort der ephesischen Christen, von einer alljährlichen Wallfahrt zur Grotte der Gizli Panaya, was die türkische Übersetzung der bei O. Benndorf FiE 1 (1906) 104f., Anm. 4 erwähnten Κρυφή Παναγία ist und an die verborgene Gottesmutter erinnert, die offensichtlich um die Wende vom 19. zum 20. Jh. in der Höhle verehrt wurde. Ihr Bild findet sich in der kleinen Nische der Ostwand.

F. Miltner dagegen nennt das Monument 1955 in seinem Grabungsbericht „Paulusgrotte“ und bezieht sich dabei wohl auf die Anrufungen des Apostels ebendort. Eine über dem Fresko mit Paulus und Thekla wurde zu Beginn angeführt.

Ähnlich gibt es eine Petrusgrotte (ebenfalls mit Fresken) in Antiochia, dem heutigen Antakya, und eine Johannesgrotte (mit in den Putz gekratzten Figuren) bei Jerusalem.

Als dritte Möglichkeit muss man nach der Freilegung der Fresken an der Westwand rechts des Eingangs wohl auch Thekla in Erwägung ziehen, zumal da deren Heiligtümer fast durchwegs in Höhlen eingerichtet wurden.

Die Einzigartigkeit des Monuments besteht zunächst darin, dass die mehr als 300 Graffiti, Dipinti und anderen Inschriften eine quasi durchgehende Benützung der Anlage von der ersten Verwendung bis zur Gegenwart belegen und diese nicht nur als Pilgerinschriften für die Sprache und die Frömmigkeitsgeschichte der Antike, sondern auch für die Zeitgeschichte, z. B. die Präsenz der 1921 vertriebenen Griechen, ein wichtiges Dokument darstellen.

Ferner erlauben die erhaltenen Reste der Skulptur eine eindeutige Bestimmung des Monuments als Höhlenkirche. Weitere Höhlenkirchen in der Art und aus der Zeit der Paulusgrotte sind bislang nicht bekannt. Erst einige Jahrhunderte später gibt es in Kappadokien⁵ annähernd Vergleichbares, das aber nicht immer so gut erhalten blieb.

Die größte Wichtigkeit erhält die Paulusgrotte in Ephesos aber durch ihre Bemalung, teilweise in mindestens vier Schichten⁶, gibt es doch kaum Derartiges in frühbyzantinischer Zeit. Unsere Kenntnis spätantiker Malerei beschränkt sich vorwiegend auf die Grabmalerei der römischen Katakomben⁷. Von der gleichzeitigen Kirchenmalerei⁸ blieb fast nichts erhalten.

Besonders hervorzuheben sind im Falle der Paulusgrotte die Beischriften, welche neben der Ikonographie eindeutige Identifizierungen erlauben, so etwa bei der Darstellung des Apostels Paulos, der mit einem Buch am Schoß vor einem Haus sitzt, in dessen Fenster der Kopf einer weiblichen Figur samt der Beischrift ΘΕ ΚΛΑ erscheint. Daraus folgt, dass wir es mit der apokryphen Erzählung aus den Acta Pauli et Theclae zu tun haben. Demnach liegt der eher seltene⁹ Fall einer auch literarisch gestützten Überlieferung vor. Bemerkenswert – gerade für Ephesos – erscheint die Tatsache, dass diese aus dem Bereich der so genannten nicht kanonischen, d. h. apokryphen, Texte¹⁰ stammt.

Völlig einzigartig ist weiters die dritte dargestellte Figur, welche durch ihre Beischrift als ΘΕΟΚΛΙ[A identifiziert wird. Nach den Acta Pauli et Theclae

⁵ Näheres u. a. bei G. DE JERPHANION, *Les églises rupestres de Cappadoce* 1–3. Paris 1925–1942 und N. und M. THIERRY, *Nouvelles églises rupestres de Cappadoce*. Paris 1963.

⁶ Siehe R. PILLINGER, „Vielschichtige“ Neuigkeiten (wie Anm. 2).

⁷ Zu ihnen vgl. etwa V. FIOCCHI-NICOLAI – F. BISCONTI – D. MAZZOLENI, *Roms christliche Katakomben. Geschichte – Bilderwelt – Inschriften*. ² Regensburg 2000 (auch in englischer, französischer, italienischer und spanischer Sprache) – mit weiterer Literatur.

⁸ Genauerer bei R. PILLINGER – V. POPOVA – B. ZIMMERMANN, *Corpus der spätantiken und frühchristlichen Wandmalereien Bulgariens* (Bant 21). Wien 1999 passim.

⁹ Ähnlich ist die Situation z. B. bei der Pilgerkirche zu Ehren des heiligen Felix in Cimitile, welche u. a. an der Wende vom 4. zum 5. Jh. n. Chr. durch Paulinus von Nola ausführlich beschrieben wurde. – Siehe bes. T. LEHMANN, *Paulinus Nolanus und die Basilica Nova in Cimitile/Nola. Studien zu einem zentralen Denkmal der spätantik-frühchristlichen Architektur* (Spätantike – Frühes Christentum – Byzanz. Kunst im ersten Jahrtausend. Reihe B: Studien und Perspektiven 19). Wiesbaden 2004.

¹⁰ Näheres bei D. R. CARTLIDGE – J. ELLIOTT, *Art and the Christian Apocrypha*. London – New York 2001, bes. 148–162.

handelt es sich dabei um die Mutter Theklas, die sonst nie wiedergegeben ist¹¹. Hervorzuheben ist weiters neben dem einzigartigen Erhaltungszustand auch die Qualität dieser Malerei, die den Vergleich mit jedem anderen Paulusbild nicht zu scheuen braucht.

Für die Türkei scheint es überhaupt das älteste und einzige sicher identifizierte antike Paulusbild zu sein, für Ephesos noch dazu die einzige monumentale Paulusüberlieferung¹².

Ferner belegt das Bild erstmals auch die Präsenz der Theklatradition in Ephesos.

In allen Malschichten findet sich beste Qualität der Darstellung, angefangen beim heiligen Georg der jüngsten, über die überlebensgroßen Figuren der zweiten, den Baum mit den Früchten der dritten und der Gestalt auf der Biga in einem Kreis der vierten Malschicht.

RENATE PILLINGER

2. Zur Restaurierung und Ausführungstechnik der Wandmalereien und zur Erhaltungsproblematik

2.1 EINLEITUNG

Seit der Wiederentdeckung der Paulusgrotte durch die Wissenschaft und den ersten, viel versprechenden Freilegungsversuchen in den 1990-er Jahren stehen die Wandmalereien im Grottenraum im Zentrum des Interesses. Die weitgehende Übertünchung und Übersinterung der Malschichten ließ eine eingehende wissenschaftliche Bearbeitung jedoch nicht zu, sodass eine weitergehende Freilegung und restauratorische Bearbeitung der Gemälde beschlossen wurde. Diese beinhaltet für gewöhnlich auch Studien zu Werktechniken und Erhaltungsstrategien, womit das Thema der folgenden Abschnitte auch schon umrissen wäre.

Die Freilegung historischer Wandmalereien, die unter späteren Putz- oder Anstrichschichten verborgen liegen, ist ein häufiges und durchaus kontroversiell diskutiertes Thema der Denkmalpflege¹³. Wird für eine Freilegung optiert, dann bedeutet dies jedenfalls nicht nur eine Möglichkeit zur Betrachtung, Dokumentation und wissenschaftlichen Bearbeitung der Bildprogramme und Ausführungstechniken, sondern auch die Verpflichtung zu einer Reihe notwendiger Folgemaßnahmen zur Sicherung und Erhaltung des Bestandes. In diesem Sinn bildet die Freilegung nur einen Schritt in eine Richtung, deren

¹¹ Gesammelt sind die wichtigsten Darstellungen zu Thekla vor allem bei CL. NAUERTH – R. WARNS, *Thekla. Ihre Bilder in der frühchristlichen Kunst* (Göttinger Orientforschungen, 2. Reihe: Studien zur spätantiken und frühchristlichen Kunst 3). Wiesbaden 1981; CL. NAUERTH, Nachlese von Thekla-Darstellungen (Göttinger Orientforschungen [wie oben] 6). Wiesbaden 1982, 14–18 und R. WARNS, Weitere Darstellungen der heiligen Thekla (Studien zur frühchristlichen Kunst 2). Wiesbaden 1986, 75–137.

¹² Da es sich bei dem so genannten Paulusgefängnis eindeutig um einen Turm der byzantinischen Stadtmauer handelt.

¹³ Die Frage, ob Übertünchungen einen Schutz oder eine Bedrohung für das Original darstellen, ist durchaus von Fall zu Fall unterschiedlich zu bewerten. Dazu etwa P. Mora – L. Mora – P. Philippot, *Conservation of Wall Paintings*. London 1984, 213: “On many occasions mural paintings have been found to be covered with a coating of limewash for hygienic, religious or other reasons and, if the lime happens to be more compact than the paint layer that it covers, it may threaten to detach the paint. Sometimes, however, it may actually be credited with having protected it for centuries from destruction ...”.

Folgeschritte zunächst nie zur Gänze absehbar sind und im äußersten Fall sogar wieder in eine neuerliche Überdeckung der Gemälde mit Tünche oder Putz münden können.

Auch im Fall der Paulusgrotte war die Entscheidung zur Frage der Freilegung schwer zu treffen, wobei hier letztlich der Umstand ausschlaggebend war, dass es sich, wie bereits oben ausgeführt wurde, um eine der interessantesten frühchristlichen Malereien im gesamten ostmediterranen Raum handeln dürfte.

Die Restaurierungsarbeiten an den Wandmalereien der Paulusgrotte begannen im Jahr 2000, nachdem schon 1998 eine Probefreilegung im Bereich der Paulusdarstellung erfolgt war. Zu diesem Zeitpunkt war die Umgebung der Grotte und die Plattform des ehemaligen Vorbaus bereits vom überwuchernden Gestrüpp befreit und das Innere einer ersten Säuberung unterzogen, Kleinfunde und Architekturteile gesichtet und geborgen und der Grotteingang mit einer Gittertür gesichert worden. Seitdem wurde, mit einer einmaligen Unterbrechung, jedes Jahr eine einmonatige Restaurierkampagne durchgeführt¹⁴, während der sowohl die Arbeiten voranzubringen als auch die Untersuchungen durchzuführen waren. Letztere beinhalten auch die Beobachtung von Abbauphänomenen – ihre Beschleunigung oder Stabilisierung seit der vorangegangenen Kampagne – sowie verschiedener geringfügiger Veränderungen, die nur wahrnehmen kann, wer regelmäßig und intensiv vor Ort arbeitet.

Ab dem Sommer 2001 stand dem Team ein Konservierungswissenschaftler zur Seite, der u. a. Untersuchungen zum Putzaufbau und zur Malerei an Laborproben durchführte. Im Herbst 2004 wurde eine Befundung und Beprobung durch eine Mikrobiologin vorgenommen, und ab dem Spätsommer 2005 kam noch ein Physiker dazu, um sich mit dem Fragenkomplex des Raumklimas zu befassen. Zu der vorliegenden Publikation haben alle angeführten Fachleute ihren Beitrag geleistet.

Die Arbeiten und Untersuchungen in der Paulusgrotte sind noch nicht abgeschlossen. Insgesamt ist jedoch bereits ein Stand erreicht worden, der es gerechtfertigt erscheinen lässt, die Restaurierung der Paulusgrotte mit ihren verschiedenen Nebenaspekten den interessierten Fachkreisen vorzustellen.

Die Restaurierung und Konservierung der Wandmalereien der Paulusgrotte kann als Beispiel dafür angesehen werden, wie sehr die technischen Aspekte eines solchen Eingriffs nicht nur auf theoretischen Überlegungen basieren, sondern unvermeidlich auf allen Begleitumständen, die den Zustand des Kunstobjekts bestimmen und sein Umfeld ausmachen. Nicht zuletzt sind es diese Umstände, die den Einsatz unterschiedlicher Fachbereiche auf interdisziplinärer Ebene verlangen. Diese Teamarbeit, die nicht immer ohne Probleme verläuft, ist unverzichtbar für ein Gelingen der Restaurierung und einer erfolgreichen präventiven Konservierung.

Die spezifischen Gegebenheiten der Paulusgrotte – dazu zählen etwa ihre Lage und der Umstand, dass es sich um einen Höhlenraum handelt – veranschaulichen auf beispielhafte Weise die Hürde zwischen Theorie und Praxis einer solchen Arbeit, z. B. im Hinblick auf die Organisation einer derartigen Baustelle.

Der seit nahezu 100 Jahren nicht mehr als Kultstätte genutzte Raum ist zu Fuß in ca. 10–15 Minuten über einen etwas versteckten Pfad auf den steilen

¹⁴ Zum Datum der Einreichung des Manuskripts war die bislang siebente Kampagne abgeschlossen. Im Jahr 2000 hatte man mit einer ersten Zustandsbewertung verbunden mit einer Probenahme und Vorversuchen begonnen, in den Jahren 2001, 2003, 2004, 2005, 2006 und 2007 wurde an der eigentlichen Restaurierung gearbeitet.

Abhängen des Bülbüldağ erreichbar. Als Hindernisse erwiesen sich von Beginn an u. a. der Transport von Arbeitsmaterial und Werkzeug und das Fehlen von Fließwasser und Strom – zur Stromerzeugung musste ein Dieselgenerator eingesetzt werden, dessen Tuckern immerhin einen Teil der üppigen Fauna fernhielt. In der Tat würden die tierischen Bewohner der Grotte in ihrer Vielfalt ein Kapitel für sich beanspruchen, ganz zu schweigen von den Mikroorganismen, deren Wachstum durch das Grottenklima begünstigt wird. Skorpione, Schlangen, Mäuse, Frösche, Schwalben und Schafe – dies sind nur einige Beispiele für vergangenes und immer noch vorhandenes Leben in der Grotte, die mittlerweile von der Bergvegetation umwuchert ist. Die Anwesenheit dieser teils mehr, teils weniger willkommenen Tiere erforderte als potentielle Schadensursache einige Schutzmaßnahmen, wobei es zusätzlich an manchen Tagen zu Mäusejagden mit nicht immer erfolgreichem Ausgang kam. Die Nager beschädigten zudem mehrere Male Geräte zur Erhebung der thermohygrischen Werte, indem sie das Verbindungskabel zwischen Sensor und Datenlogger anknabberten, was manchmal über Monate die Datensicherung verhinderte. Die Bedingungen, unter denen die wertvolle und unentbehrliche wissenschaftliche Arbeit in der Untersuchungsphase erfolgt, sind so schwierig, dass der Aufwand angesichts des bisweilen ungewissen Ausgangs relativ hoch ausfällt.

2.2 DIE GROTTEANLAGE UND IHR UMFELD

Die Paulusgrotte, am Nordhang des Bülbüldağ gelegen, erstreckt sich in ihrer Längsachse normal zum Hang, somit etwa in Nord-Süd-Richtung. Der ebene Platz vor dem Grotteingang entspricht der Bodenfläche eines ehemaligen Vorbaus, dessen begrenzende Mauern in byzantinischer Bauweise zum Teil noch erhalten sind und vereinzelt bemalte Putzreste tragen. Bergwärts war dieser Bau in den Felshang hinein vertieft, während er sich talseitig auf einen gemauerten Unterbau erstreckt. Im Kontakt zum anstehenden Gestein sind die Mauern durchwegs erhalten bzw. ausgebessert, während sie in den übrigen Bereichen weitgehend fehlen.

Von diesem Vorplatz führen zwei Öffnungen in den Fels: die linke erschließt einen kleinen, roh herausgehauenen Raum ohne irgendwelchen Wandputz oder sonstige Ausstattungen, während die rechte, rechteckig herausgearbeitet und ausgemauert, in die eigentliche Grotte führt. Diese erstreckt sich in Form eines nahezu geradlinig verlaufenden Ganges von ca. 15 m Länge, der sich am Ende leicht zu einem etwa rechteckigen Stirnraum verbreitert¹⁵ (Abb. 1).

Die Bodenfläche der Grotte im heutigen Zustand trägt keinen Belag. Wände und Decke sind grob behauen. Während die gesamten Wandflächen in mehreren Schichten mit Putz versehen sind bzw. waren, ist die Decke nur im Bereich des Stirnraums vollflächig verputzt.

Im Grottengang befinden sich, wie bereits in 1. beschrieben, mehrere nischenförmige Erweiterungen: die größte in der Westwand unmittelbar nach dem Eingang; hier ist der Putz nur mehr in einem kleinen Bereich erhalten. Zwei weitere, deutlich kleinere aber sorgfältiger herausgearbeitete und besser erhaltene Nischen befinden sich in der Ostwand, und zwar bei 7,3 m vom Eingang und dann nochmals etwas weiter hinten¹⁶.

¹⁵ Maße des Stirnraums: ca. 2,55 m Breite und 2 m Tiefe.

¹⁶ Maße der zweiten Nische: H ca. 1,7 m, B ca. 1,8 m, T ca 0,7 m; Maße der dritten Nische, die 70 cm über dem Bodenniveau liegt: H ca. 1 m, B ca. 1,2 m, T ca. 0,5 m.

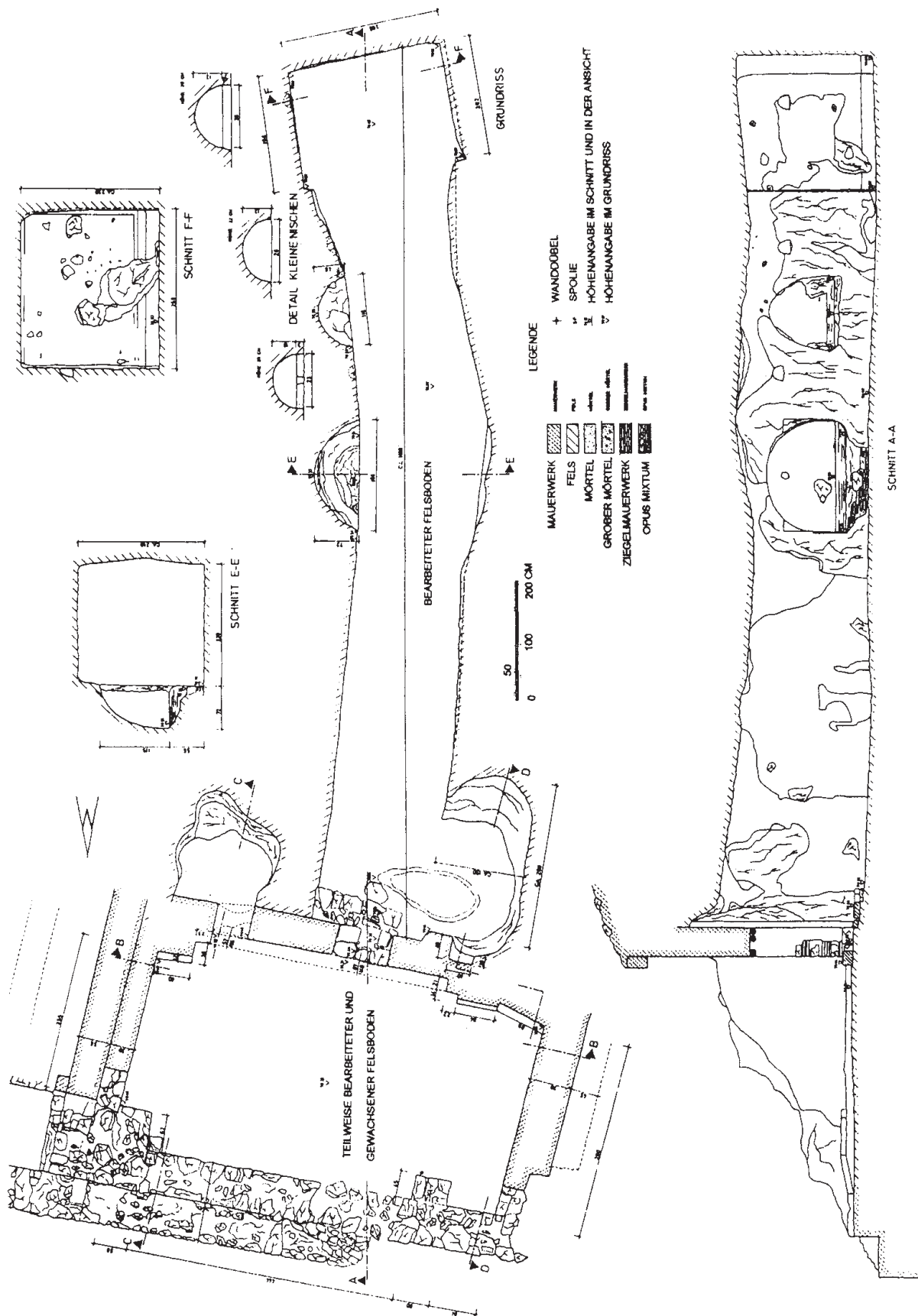
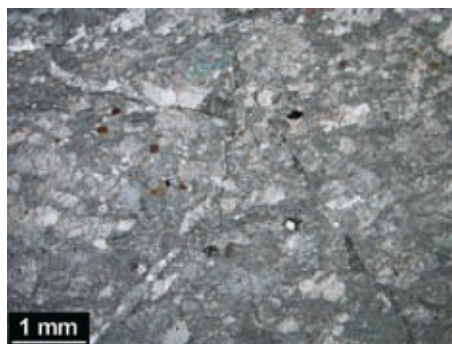


Abb. 1: Grundriss der Paulusgrotte (nach B. BÖLDERL).

Das anstehende Gestein ist ein schwach metamorpher und feinkristalliner Marmor. Die Korngröße der miteinander stark verzahnten Kalkspatkristalle liegt unter 0,5 mm (Abb. 2). Das Gestein hat ein dichtes Gefüge, d. h. zwischen den Kristallen ist kein Wassertransport möglich; allerdings treten, ganz wie bei einem dichten Kalkstein, Risse und Kluftsysteme auf, die durchaus für Lösungsmigration in Frage kommen. Diesbezüglich zeigt der Marmor in Hinblick auf Klüftigkeit und Verwitterung die wesentlichen Merkmale eines Kalksteins.

Abb. 2:
Das Felsgestein der Paulusgrotte im Mikroskop (Dünnschliff im Durchlicht): sehr feinkörniger calcitischer Marmor mit stark verzahnten Körnern; Risse im Gefüge orientieren sich nicht an den Kristalliten.



Das Kluftsystem ist in den hangnahen Bereichen dichter ausgebildet und streicht dort bevorzugt in Ost-West-Richtung, was auf den Einfluss von Hangrutschungen hinweist.

Es ist durchaus wahrscheinlich, dass die Anlage der Paulusgrotte einer kleinen, natürlichen Karsthöhle folgt. Dennoch handelt es sich in ihrer heutigen Erscheinungsform um einen künstlich angelegten Raum. Die Felswände wurden lediglich grob behauen und nicht eingeebnet, was bei dem kantigen Bruchverhalten des Gesteins auch sehr aufwändig gewesen wäre. Eine annähernd glatte Fläche wurde erst durch den Putz als Ausgleichsschicht hergestellt, folgt aber im Bereich des Grottengangs keiner planen Geometrie. Nur im Stirnraum wurden orthogonale Wände herausgearbeitet, deren unebene Oberflächen größtenteils unter der dort noch erhaltenen Putzschicht liegen. Die Putzstärke ist damit gemäß dem Relief der Felsoberfläche sehr unterschiedlich und dürfte bereichsweise auch mehrere Zentimeter erreichen. Damit ist ein wichtiger Faktor zum Verständnis der Schadensprozesse angesprochen sowie ein wesentlicher Unterschied zu vielen anderen ausgemalten Felskirchen, wie etwa denjenigen Kappadokiens, wo der weiche Tuff zu ebenflächigen Wänden ausgearbeitet ist, auf denen meist nur ein dünner, einlagiger Putz liegt¹⁷.

2.3 AUSGANGSZUSTAND

Dem Besucher der Paulusgrotte fallen die zahlreichen großen Fehlstellen auf, die teils die Felsoberfläche zum Vorschein kommen lassen, zum Teil aber auch ältere Putzflächen freigelegt haben. Der Ausgangszustand zu Beginn der Restaurierung war durch eine großflächige Überdeckung aller Oberflächen mit Kalktünche bzw. mit verschiedenartigen Überkrustungen gekennzeichnet. Davon ausgenommen waren lediglich die kurz davor freigelegte Paulusszene, die zweite Nische der Ostwand, und begrenzte Bereiche im Stirnraum. Auch

¹⁷ In M. RESTLE, *Die byzantinische Wandmalerei in Kleinasien* 1. Recklinghausen 1967, finden sich eingehende Angaben über die Putz- und Maltechniken Kappadokiens.

hier war jedoch die Lesbarkeit der Malerei aufgrund von Verschmutzung und Weißschleiern eingeschränkt.

Eine Reihe von Putzfragmenten war absturzgefährdet.

Der Grottenboden war von einer mehr oder weniger dicken Erdschicht bedeckt, die offensichtlich mit Viehdung und damit mit löslichen Salzen verunreinigt war.

Der Türsturz der Eingangsöffnung war schadhaft, wodurch das darüber liegende Mauerwerk einsturzgefährdet war.

2.4 PUTZ- UND MALTECHNIK

Untersuchungen zur Ausführungstechnik erfolgten vorwiegend an jenen Stellen, an denen nach Abnahme der Überkrustungen und Übertünchungen zahlreiche Detailbeobachtungen möglich waren. Als wertvolle Ergänzung erwiesen sich dabei die stratigraphischen Schliffanalysen unter dem Mikroskop¹⁸.

Die im Zuge der Restaurierarbeiten angestellten Beobachtungen der Putz- und Malschichten im Hinblick auf ihr Vorkommen auf den verschiedenen Wandabschnitten erlaubten die teilweise Rekonstruktion der zeitlichen Abfolge:

2.4.1 Grottengang

Die älteste Schicht an der Ost- und Westwand des Grottenganges besteht aus einem rötlich durchgefärbten Putz, der zum Teil noch Malerei und zahlreiche Inschriften trägt. In einigen Bereichen, in denen der darüber liegende Putz fehlt, wurde diese Schicht nach Abnahme der Tünche mit freiem Auge sichtbar. Die Putzstärke variiert gemäß den Unebenheiten der darunter liegenden Felsoberfläche, und der Auftrag dürfte in einem Tagwerk erfolgt sein. In den noch frischen Putz wurden zahlreiche Inschriften eingeritzt, weitere erst nach dem Abbinden.

Die dazugehörige Malerei ist nur mehr in Resten erhalten, die sich auf rote und schwarze Streifen entlang den oberen und unteren Wandbegrenzungen beschränken (Abb. 3) sowie auf eine mit Kalkmilch gemalte griechische Inschrift



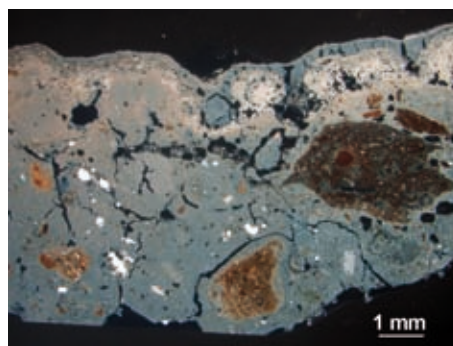
Abb. 3:
Rötlicher Malputz der ersten Schicht am Übergang der Westwand zur Decke, mit Resten einer roten Architekturmalerei.

¹⁸ Insgesamt 24 Proben wurden auf Putzzusammensetzung und Maltechnik untersucht, die meisten von ihnen als polierte Querschliffe, einige in Form von petrographischen Dünnschliffen und einzelne auch lediglich als Streupräparate. Die Analysen erfolgten mittels Polarisationsmikroskopie im Auf- bzw. Durchlicht sowie mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) in Verbindung mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX). Die großteils geringe Probengröße aufgrund der schonenden Probenahme sowie häufige Kalkversinterungen setzten in vielen Fällen den erzielbaren Aussagen Grenzen. Dennoch konnten wichtige Details zu künstlerischen Techniken erkannt werden. Detaillierte Untersuchungsprotokolle liegen bei den Autoren auf.

über der Wölbung der großen Nische in der Westwand, die unmittelbar neben dem Eingang liegt. Vermutlich gehört auch die in Resten erkennbare Ausmalung dieser Aushöhlung selbst zu dieser Phase: Blumen gemalt in Kalktechnik auf einem dünnen, rötlichen Malgrund, der seinerseits einer sehr unebenen Putzschicht aufliegt. Die genaue Beobachtung des Verlaufs dieser Schicht lässt darauf schließen, dass die Nische ursprünglich kleiner angelegt war.

Unter dem Mikroskop erweist sich dieser unterste Putz im Grottengang als ein eher fetter Kalkmörtel mit silikatischer Gesteinskörnung und Ziegelschrot (Abb. 4). Diese Charakteristik legt eine Analogie zur ältesten Putzschicht im Stirnraum nahe. Anders als dort konnte der Putz im Gangbereich allerdings nicht in ungestörter stratigraphischer Abfolge beprobt werden; nachfolgende Feinputze liegen hier einer erodierten und versinterten Oberfläche auf.

Abb. 4:
Erste Putzschicht im Grottengang (Dünnschliff im Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren): Kalkmörtel mit wenig silikatischer Gesteinskörnung und Ziegelschrot. Auf der erodierten und versinterten Oberfläche liegt der Malgrund einer späteren Schicht.



Zur zweiten Ausstattung dürfte die männliche Figur mit Schwert gehören, die nahe des Eingangs an der Ostwand dargestellt ist¹⁹.

Der so wichtige Bilderzyklus mit Paulus und Thekla an der Westwand ist vielleicht dieser zweiten, wahrscheinlicher aber einer dritten Ausmalung zuzuordnen. Die Malerei ist auf einem graufarbenen Putz ausgeführt, der nach derzeitigem Befund in anderen Bereichen keine Entsprechung hat, jedoch auf dem beschriebenen rötlichen Putz der ersten Phase aufliegt – hier scheint die zweite Schicht dazwischen zu fehlen. Der graue Putz weist starke Schäden durch Abbröckelung auf und läuft an seinem oberen Ende in der Art einer Tagwerksgrenze auf Null aus. Bei sehr ebener Oberfläche variiert die Putzstärke zwischen 1,5 cm und wenigen Millimetern, so als hätte man teilweise an vorhandene Motive anknüpfen und sie weiterführen wollen.

Die restauratorische Reinigung erlaubte eine genauere Betrachtung der Maltechnik; insbesondere war die Vorzeichnung zu erkennen, die mit einem braunem Farbstoff oder Ockerstift durchgeführt wurde. Darüber sind Schatten und mitteldunkle Töne aufgetragen, wobei man schon die Bereiche ausgespart hat, die dann hellere Töne erhalten sollten. Die Höhungen erfolgten zuletzt mit pastosem Farbauftrag: der Farbe wurde, wie auch für die Gesichter, ein dichter Körper gegeben, wodurch die einzelnen Pinselstriche relativ hervorgehoben erscheinen. Insgesamt kann man von einer freskalen Anlage der flächenhaften Lokaltöne ausgehen (Abb. 5), während es sich bei den Details wohl eher um Kalk-Seccomalerei handelt. Die mikroskopischen Untersuchungen lassen hier leider nur selten eine Präzisierung zu, da die Versinterung der

¹⁹ Es handelt sich gemäß PILLINGER (2005) (wie Anm. 2) um Abraham bei der Opferung des Isaak. Eine Zeitgleichheit dieser Malerei mit der zweiten, möglicherweise ins 4. Jh. datierbaren Schicht im Stirnraum (Paradiesesbaum) ist aus Sicht der Putztechnik nicht unwahrscheinlich.

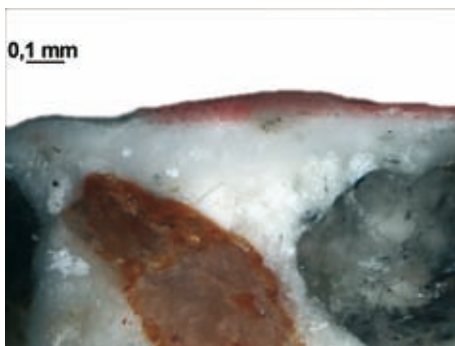


Abb. 5:
Zweite Putz- und Malschicht der Paulus-
szene, rot-ockrige Farbschicht im Bereich
des Theklahauses (Anschliff im Auflicht):
die Freskotechnik ist gut erkennbar.

Malschicht gemeinsam mit ihrer Unterlage gerade diesbezügliche Befunde zerstört hat.

Noch nicht eindeutig der besprochenen Abfolge zuordnen lassen sich die Malereireste in der großen Nische, die etwa in der Mitte der Ostwand des Grot-
tengangs liegt. Hier erkennt man drei einander überlagernde Malschichten mit
unterschiedlichen Darstellungen. Ihre Lesbarkeit ist sehr eingeschränkt, nicht
zuletzt wegen der offenbar durch Kerzenruß verursachten Farbverdunklun-
gen.

Auf einer ältesten Abbildung – nimbierte Gestalten an einem Tisch mit
Buch und Kelch – ist eine spätere Malerei mit nimbierten Antlitzen großteils
verloren gegangen, da sie auf eine dünne Putzschlämme ausgeführt wurde, die
auf der Unterlage ungenügend gehaftet hat (Abb. 6). Fragmente einer dritten
und letzten Abbildung beschränken sich auf einige Farbreste und lassen einen
Christuskopf mit Kreuznimbus erahnen.

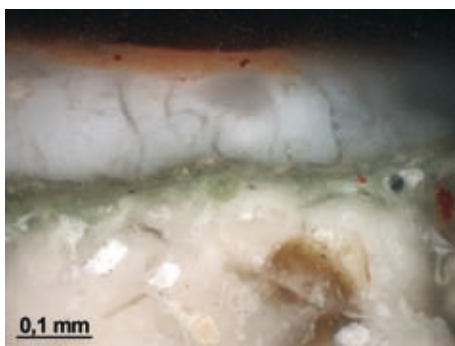


Abb. 6:
Zweite Malschicht in der großen Nische der
Ostwand (Anschliff im Auflicht): Ocker-
malerei freskal auf Kalkgrund, der auf die
leicht versinterte Oberfläche der älteren
Putzschicht aufgetragen wurde. Algen
siedeln im Grenzbereich zwischen beiden
Schichten. Die Haftung ist im Allgemeinen
schlecht, weswegen diese Malerei großteils
verloren gegangen ist.

In der zweiten, kleineren Nische weiter südlich in der Ostwand, nahe der
Weitung zum Stirnraum, sind die Darstellung einer Gottesmutter mit Christus-
kind auf einem Thron zu erkennen sowie Überreste einer zweiten Schicht, auf
der ein Gesicht zu sehen ist.

Da die bisherigen Restaurierarbeiten in dieser Nische auf Notmaßnahmen
an der bereits freigelegten Malerei beschränkt waren, konnten die Untersu-
chungen zur technischen Vorgangsweise hier noch nicht vertieft werden.

2.4.2 Stirnraum

In der Folge bezieht sich die weitere Diskussion der Abfolge von Putz- und
Malschichten aus verschiedenen Ausstattungsphasen auf den presbyteriums-
artigen Stirnraum, und dort vor allem auf dessen Ostwand²⁰ (Abb. 7), der in

²⁰ Siehe auch Abb. 2 bei PILLINGER (2005) (wie Anm. 2).



Abb. 7 a, b: Ostwand des Stirnraums (Foto: N. GAIL) mit Darstellungen aus vier verschiedenen Phasen (7b).



den vergangenen Kampagnen besondere restauratorische Sorgfalt zuteil wurde. Hier können insgesamt fünf Putzschichten ausgemacht werden, vier von ihnen tragen Malerei.

Unterste Malschicht

Die älteste, auf der Putzschicht Nr. 2 ausgeführte Malschicht mit der Darstellung des Wagens im Himmelkreis und den Paradiesesflüssen weist zahlreiche Fehlstellen auf, die den Putz freilegen, wodurch die ikonographische Deutung bereichsweise erschwert wird (Abb. 8)²¹.



Abb. 8: Detail der Ostwand des Stirnraums mit der ältesten Malschicht: Reste der Darstellung einer Gestalt im Pferdewagen, in kreisförmigem Medaillon aus Ägyptischblau.

Im Bereich des blauen Medaillons ist die Malerei durch eine verhältnismäßig dichte Konsistenz des Malmittels charakterisiert, wodurch die einzelnen Pinselstriche sowie einige dicke Farbtropfen erkennbar sind. Ein solcher Effekt entsteht üblicherweise bei der Ausführung einer Malerei auf frischem Putz – durch die hohe Luftfeuchtigkeit in der Grotte verzögert sich das Abbinden – unter Verwendung von Pigmentaufschlämmungen in Kalkmilch.

Diese Technik, die eine Mittelstellung zwischen echtem Fresko und Kalksecco darstellt, erinnert an die spätantiken Maltechniken²², wie sie u. a. im Hanghaus 2 vorgefunden werden²³. Als Blaupigment wurde Ägyptischblau nachgewiesen²⁴ (Abb. 9).

²¹ Eine vorläufige Datierung dieser als Elias Himmelfahrt erkannten Szene in das 3. Jh. findet sich ebd., 61.

²² A. KNOEPFLI – O. EMMENEGGER, Wandmalerei bis zum Ende des Mittelalters. In: DIES., *Reclams Handbuch der Künstlerischen Techniken* 2. Stuttgart 1990, 146.

²³ E.-M. MAURER, *Materialwissenschaftliche Untersuchungen antiker Wandbaustoffe aus dem Hanghaus 2 in Ephesos* (ungedr. Dipl. Montanuniversität Leoben 2004). In dieser Arbeit werden in Photoabbildungen zahlreiche vergleichbare Beispiele gebracht, ohne jedoch die Maltechnik besonders eingehend zu diskutieren. Dass aber diese Putztechnik gelegent-

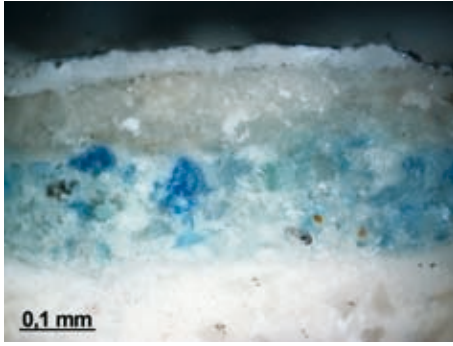


Abb. 9: Erste Malschicht im Stirnraum, blaues Medaillon der Biga (Anschliff): Ägyptischblau auf Feinputz, in sich versintert und von mehreren Sinterschichten bedeckt.



Abb. 10: Erste Malschicht im Stirnraum, blaues Medaillon der Biga: während des Malvorgangs entstandene Fingerabdrücke im frischen Putz.

Ein zusätzlicher Hinweis darauf, dass auf frischem Putz gemalt wurde, ist das Vorliegen mehrerer Fingerabdrücke, die der Maler wohl beim Abstützen hinterließ und die bei der Betrachtung mit Streiflicht zu erkennen sind (Abb. 10).

Einige Ritzlinien dienten offensichtlich der Konstruktion der sternbesetzten Kreisfläche, während die Mehrzahl der Einschnitte – Inschriften, Kratzer und Einritzungen – erst später erfolgte.

Der mehrschichtige Putz dieser wohl ersten Ausstattungsphase (Abb. 11 a–c) besteht zunächst aus einem Grobputz, der vermutlich in zwei Lagen ähnlicher Zusammensetzung, aber zunehmender Kornfeinheit aufgetragen wurde. Es handelt sich um einen Kalkputz mit kantigem, silikatischem Gesteinskorn und Ziegelschrot bzw. -mehl. Die Ähnlichkeit mit der untersten Putzlage im Gangabschnitt der Grotte ist auffallend. Die Zubereitung dieses Putzmörtels mit hydraulischen Eigenschaften erfolgte wohl unter Bedacht auf eine verbesserte Haftung auf dem feuchten und wenig saugfähigen Felsuntergrund.

Auf den noch frischen, ungeglätteten Grobputz wurde der helle Feinputz mit einer Schichtstärke bis zu 6 mm aufgetragen, der aus Kalk mit Marmorkorn bis zu 3 mm Durchmesser aufgebaut ist. Auffallend sind die Verpressung und Glättung dieser Putzschicht, aber auch die im Streiflicht sichtbaren Werkzeugspuren und Eindrücke des Malers.

Der Putzaufbau steht somit in der antiken Tradition der Auftragung eines Feinputzes mit Marmorkorn auf einem silikatischen Grobputz²⁵.

In Fehlstellen der darüber liegenden Schichten ist dieser Putz gelegentlich auch an den anderen Wänden des Stirnraums zu sehen, jedoch in derart geringen Ausmaßen, dass eine genauere Befundung dort nicht möglich war.

lich auch in nachrömischer Zeit angewandt wurde, zeigt etwa eine ältere Analyse aus der ephesischen Johanneskirche (7./8. Jh.) in M. RESTLE (1967) (wie Anm. 17) 221.

²⁴ Es handelt sich wohl um eines der ältesten synthetischen Farbpigmente; siehe u. a. H. JAKSCH – W. SEIPEL – K. L. WEINER – A. EL GORESY, Egyptian Blue – cuprorivaite. A window to ancient Egyptian technology. *Naturwissenschaften* 70/11. Heidelberg 1983, 525–535. Die Herstellung von Ägyptischblau wird von Vitruv 7, 11.1 (C. FENSTERBUSCH, *Vitruv. Zehn Bücher über Architektur*. Darmstadt 1964, 348) beschrieben. Seine Verwendung in der Wandmalerei reicht nach heutigem Wissensstand bis zur ersten Jahrtausendwende; siehe auch KNOEPFLI – EMMENEGGER (1990) 46f.

²⁵ Was die Anzahl der Putzlagen betrifft, wurden die von Vitruv (7, 3.5f., FENSTERBUSCH, *Ebd.* 322f.) gemachten Angaben schon in der römischen Wandmalerei meist nur unvollständig in die Praxis umgesetzt.

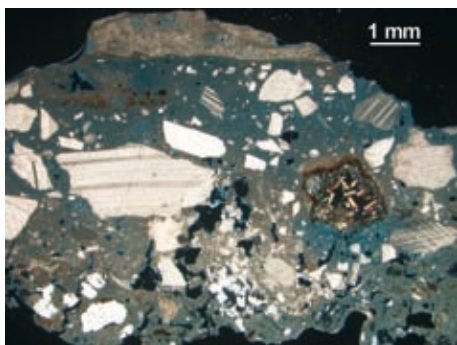
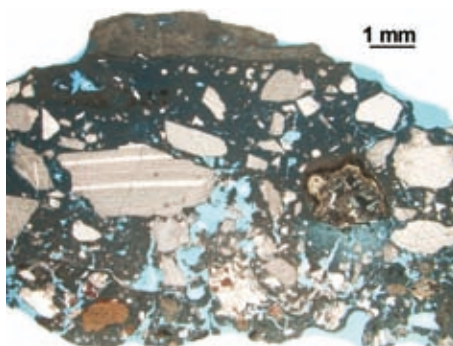


Abb. 11 a–c:
Erste Putzschicht im Stirnraum. Detailansicht der Beprobungsstelle mit rötlichem Grundputz (11 a); dieser ist im Dünnschliff nur fragmentarisch enthalten (v. a. links unten), darauf Feinputz mit Marmor-
körnung, dünne Malschicht und spätere Übertünchung; parallele Polarisatoren (11 b) bzw. gekreuzte Polarisatoren (11 c).

Zweite Malschicht

Die nachfolgende, der Putzschicht Nr. 3 zugehörige Malerei der zweiten Ausstattungphase des Stirnraums, stellt einen stilisierten Baum in grau bis blauen Farbtönen mit in kräftigen Zügen gemalten, orange-gelben Früchten dar (Abb. 12)²⁶. Der darunter liegende Feinputz, von grauer Farbe und gleichmäßig und glatt aufgetragen, besteht aus Kalk mit etwas Sand- und Marmorkorn.

Die blauen Malpartien des Baumes weisen wiederum Ägyptischblau auf einer dunkelgrauen Untermalung von Kohleschwarz auf (Abb. 13). Die Früchte sind unter Verwendung einer Ockerausmischung in Kalk auf eine dünne Kalkschicht gemalt, unter der sich ebenfalls diese Untermalung erstreckt²⁷.

Vom Hintergrund dieser Malerei ist im Wesentlichen nicht mehr erhalten als die glatte und kompakte Oberfläche des grauen Feinputzes. Auf allen Wänden der Grotte sind Reste jenes Verputzes zu finden. Er erscheint allerdings aufgrund massiver Materialverluste stark beschädigt und ist daher nur äußerst schwer erkennbar. Dennoch ist auf der Ostwand, neben dem Eingang, eine bereits erwähnte Szene zu erkennen, die die Opferung Isaaks darstellt, und auf der Westwand, neben dem Stirnraum, eventuell ein Heiligenbild. Anhand der materialtechnischen Merkmale können beide Darstellungen mit einiger Wahrscheinlichkeit dieser zweitältesten Ausmalung zugeordnet werden.

²⁶ R. PILLINGER (2005) (wie Anm. 2) deutet diese Darstellung als Paradiesesbaum und datiert sie möglicherweise in das 4. Jh.

²⁷ Die freskale Anlage einer dunkelgrauen oder schwarzen Untermalung für Blaupartien, als *Veneda* oder – im byzantinischen Bereich bei Dionysios – als *Linum* bezeichnet, ist zumindest seit Plinius eine häufig geübte Praxis zur Hebung des Farbtöns (KNOEPFLI – EMMENEGGER [1990] [wie Anm. 22] 90ff.). Im hier geschilderten Fall zieht sich diese Untermalung zumindest randlich auch unter die Früchte.



Abb. 12: Zweite Malschicht im Stirnraum, Paradiesesbaum mit Früchten.

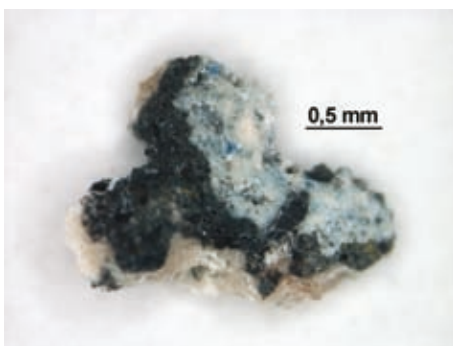


Abb. 13:
Probensplitter aus dem blauen Feld aus
Abb. 12, der zweiten Malschicht zugehö-
rig (Stereomikroskop): Ägyptischblau auf
grau-schwarzer Untermalung.

Dritte Malschicht

Die dritte, auf Putzschicht Nr. 4 ausgeführte Ausstattungsphase mit ihrer figürlichen Malerei²⁸ bedeckt einen Teil der Ostwand sowie nahezu die gesamte Süd- und Westwand des Stirnraums (Abb. 14). Für die Ostwand hat sich zuletzt die abschließende Feinreinigung insofern als hilfreich erwiesen, als dadurch weitere ikonographische Details erkennbar wurden, wodurch etwa einige der Figuren als weiblich identifiziert werden konnten.

Der Erhaltungsgrad dieser Malerei ist der vollständigste, und der Einschichtputz scheint sich in einem einzigen großen Tagwerk über alle drei Wände des Stirnraums zu erstrecken.

Der verhältnismäßig fette Kalkputz (Abb. 15 a, b) führt als Zuschlag gut gerundeten, silikatischen Flusssand. Auf der leicht geglätteten Oberfläche liegt



Abb. 14: Südwand des Stirnraums, die nahezu vollständig von Malereien der dritten Phase bedeckt ist (Foto: N. GAIL).

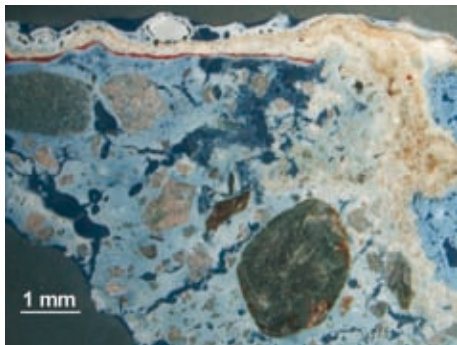


Abb. 15 a: Dritte Putzschicht im Stirnraum (Dünnschliff im Auflicht, mit blau eingefärbtem Harz getränkt): wenig gemagerter Kalkputz mit Flusssand und Schwundrissen, darauf rote Malschicht mit Sinterauflagen.

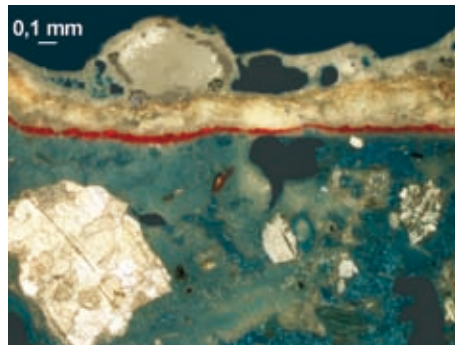


Abb. 15 b: Detail von Abb. 15 a, rote Malschicht der dritten Phase (Dünnschliff im Auflicht, mit blau eingefärbtem Harz getränkt): pastose Secco-Malerei mit Rotocker auf Einschichtputz, Sinterauflagen.

²⁸ Auch diese Darstellung ist bei PILLINGER (2005) (wie Anm. 2) eingehender beschrieben und mit Vorbehalt in das 4. Jh. datiert.

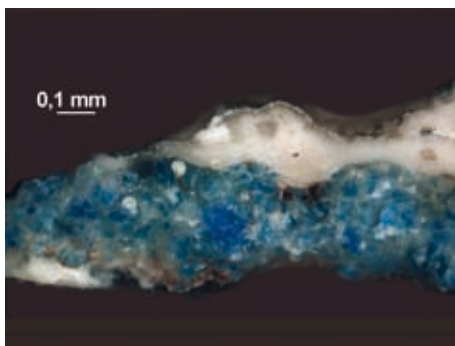


Abb. 16: Ägyptischblau in der dritten Malschicht im Stirnraum (Anschliff).

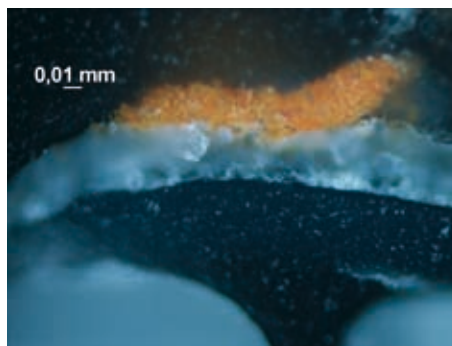


Abb. 17: Minium (Mennige) in einer Secco-Höhung der dritten Malschicht im Stirnraum (Anschliff).

die pastose Malschicht mit Kalkbindung²⁹. Als Farbpigmente konnten roter Eisenocker und Ägyptischblau nachgewiesen werden (Abb. 16), womit auch diese Malerei in das erste Jahrtausend datiert werden kann. Des Weiteren wurde das orangefarbene Bleipigment Minium (Mennige) analysiert, und zwar an einer Höhung, die auf trockenem Putz in Secco-Technik gemalt wurde (Abb. 17).

Zur Maltechnik können ferner folgende Überlegungen angestellt werden: Auch wenn man annimmt, dass ein Kalkputz aufgrund der spezifisch hohen Raumfeuchte der Grotte und der geringen Saugfähigkeit des Untergrunds stark verzögert abbindet, erscheint die Ausmalung einer derart großen Oberfläche³⁰ in Freskotechnik doch fraglich. Neben dieser Überlegung lässt auch die Dicke der mit kräftigen Pinselstrichen aufgetragenen Malschicht darauf schließen, dass die Anlage der Freskopartien auf die mit Röteln vorgezeichneten Flächenumrisse beschränkt war, während die darauf folgenden Farbflächen offensichtlich als Kalkmalerei, also mit einer Ausmischung von Farbpigmenten in Kalkmilch, erfolgten.

Die Vorzeichnung bediente sich der Schlagschnur, insbesondere zur Markierung des Verlaufs des roten Streifens, der die Szene am unteren und an den seitlichen Rändern umrahmt. Diese Arbeit erfolgte noch auf frischem Putz, ebenso wie das Einritzen der Umrisse der Nimben, worauf einige vom Maler hinterlassene Fingerabdrücke hindeuten.

Im Sohlbereich dürfte sich diese dritte Ausmalungsphase am Verlauf eines heute nicht mehr vorhandenen Fußbodens orientiert haben, dessen Niveau etwa 20 cm über dem heutigen lag.

Vierte Malschicht

Die jüngste, byzantinische Ausmalung beschränkt sich bislang auf eine vermutliche Georgsdarstellung im rechten Abschnitt der Ostwand des Stirnraums³¹. Abb. 18 zeigt einen Ausschnitt desselben.

²⁹ Die Frage, ob ein echtes Fresko vorliegt, konnte im Mikroskop aufgrund der starken Probenversinterung nicht geklärt werden.

³⁰ In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass gemäß KNOEPFLI – EMMENEGGER (1990) (wie Anm. 22) 65f. gerade byzantinische Meister in der Lage waren, Tagwerksgrenzen so gut zu überglätten, dass sie „praktisch zum Verschwinden kamen“, was die hier gezogenen Schlussfolgerungen relativiert.

³¹ Die erhaltene Beischrift und die Attribute der Figur legen nahe, dass es sich um eine Georgsdarstellung handelt. Siehe auch PILLINGER (2005) (wie Anm. 2) mit einer vermuteten Datierung in das 12. oder 13. Jh.



Abb. 18: Ausschnitt aus der Georgsdarstellung der vierten Malschicht an der Ostwand des Stirnraums; Die Malerei trägt deutliche byzantinische Züge. In einer Fehlstelle (rechts oben) ist ein weiblicher Kopf einer älteren Malschicht sichtbar.

Diese Schicht zeigt Merkmale, die sich gänzlich von denen der übrigen Phasen unterscheiden. Der teilweise rötlich wirkende Putz wurde mit einer Dicke von ca. 0,5 cm sehr regelmäßig aufgetragen und ist von einer schwachen Konsistenz. Die Farbe lässt auf die Zumischung erdigtoniger Bestandteile schließen, zudem dürfte der Mörtel schwach gebunden sein. Die Malschicht selbst hingegen, die voll und kompakt wirkt, wurde auf einer Kalkschlämme aufgebracht, die ihrerseits mit dem Pinsel auf dem frischem Verputz verstrichen worden war³². Diese Unterlage mit ihrer glatten und kompakten Oberfläche

³² Diese Schicht erinnert an den in der Hermeneia von Dionysios als *opsis* bezeichneten Malgrund, der wohl für byzantinische Wandmalerei charakteristisch ist (P. HETHERINGTON, *The painter's manual of Dionysios of Phurna*. Oakwood Publications 1989); siehe auch RESTLE (1967) (wie Anm. 17) 241f., bzw. D. GEROLD, Die Hermeneia und die postbyzantini-



Abb. 19: Malgrund mit Kalkklümpchen in der Art einer *opsis*, darauf braun-ockerfarbene Malerei, vierte Malschicht im Stirnraum (Dünnschliff im Auflicht, mit blau eingefärbtem Harz getränkt).

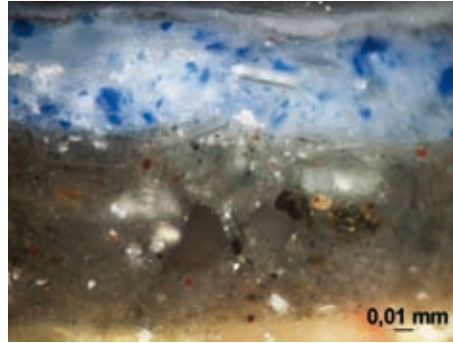


Abb. 20: Blaue Malerei mit Lapislazuli auf grauer Untermalung in Art eines *linum*, vierte Malschicht im Stirnraum, Ostwand, Georgsdarstellung (Anschnitt im Auflicht).

führt geringe Mengen von Marmormehl und Kalkklümpchen in der Art von *Bianco di S. Giovanni*, also feinem, abgebundenem Kalk³³ (Abb. 19). Mit fortschreitender Tiefe wird sie brüchiger, während die Malerei selbst kräftig und voll erscheint, mit sich sichtbar abzeichnenden Pinselstrichen.

Die mikroskopischen Analysen belegen, dass hier in Kalktechnik auf eine bereits ausgehärtete Kalkgrundierung gemalt wurde, die mit dem Pinsel auf den frischen Feinputz aufgetragen wurde. Als Farbpigmente in Kalkbindung sind Lapislazuli³⁴ – zur Farbvertiefung erfolgte zunächst freskale eine dunkelgraue Untermalung³⁵ (Abb. 20) – und verschieden getönte Eisenocker nachgewiesen.

2.5 SCHADENSBILDER UND SCHÄDIGUNGSMECHANISMEN

Visuelle Zustandsbefunde, bestätigt und ergänzt durch verschiedene Messungen und Analysen, bildeten die Entscheidungsgrundlage für die Restauriermaßnahmen. In Hinsicht auf die Vielfalt und Komplexität der auftretenden Probleme kann die Paulusgrotte als Anschauungsbeispiel für beinahe alle möglichen Schadensformen und widersprüchlichen Situationen, bis hin zum paradoxen Fall einer Konservierung des Originalzustandes, gelten, die mit Veränderungen verbunden sind, die ihrerseits mögliche Schadensquellen darstellen.

Das Raumklima in der Paulusgrotte stellt zweifellos einen derjenigen Aspekte dar, die nach heutigem Erkenntnisstand Eingriffe in Form von Kontroll-

sche Wandmalereitechnik. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 13/2 (1999) 223–244.

³³ Die Hermeneia empfiehlt, solchen Kalk aus übriggebliebenen Resten in stillgelegten Kalköfen zu beziehen.

³⁴ Dieses Blaupigment, aufgrund des Imports aus Afghanistan auch als Ultramarin bezeichnet, zählte bis zu seiner synthetischen Herstellung im 19. Jh. zu den teuersten Pigmenten überhaupt. Seine Verwendung vor dem Frühmittelalter ist zwar belegt (A. KNOEPFLI – O. EMMENEGGER, *Wandmalerei bis zum Ende des Mittelalters* [1990] [wie Anm. 22] 48), aber selten, da Ägyptischblau wesentlich billiger war. Nach dessen Verschwinden war Ultramarin neben dem nicht immer beständigen, aber billigerem Azurit, für Jahrhunderte eines der wenigen, verfügbaren Blaupigmente, das oft aber nur für besonders wichtige Malpartien Verwendung fand. In Dionysios' Hermeneia ist Lapislazuli nicht angeführt (RESTLE [1967] [wie Anm. 17]).

³⁵ *Linum* mit Kohlenstoffschwarz und etwas Ocker, heller als die entsprechende *Veneda*-Untermalung der älteren Malerei mit Ägyptischblau, und vielleicht etwas rotstichig.

und Steuermaßnahmen verlangen. Eine detaillierte Darstellung der raumklimatischen Situation findet sich in Abschnitt 4.

Die Höhlensituation mit der stets hohen Luftfeuchtigkeit, den häufigen Kondensationszyklen und mit gelegentlicher Wasserinfiltration durch Gesteinsklüfte bietet gute Voraussetzungen für die Entwicklung zahlreicher Mikroorganismen, die sich infolge der Abnahme der Tünche, die ja den wichtigsten restauratorischen Eingriff darstellt, unmittelbar an der Oberfläche der Wandbilder ansiedeln können. Die vorgefundene Besiedelung wird in Abschnitt 3 eingehender diskutiert, hier sollen nur die unmittelbar für die Restaurierung maßgeblichen Fakten besprochen werden.

Weite Bereiche der Grottenwände sind von auffallenden, grünen und schwarz-grünen Biofilmen überzogen (Abb. 21). Diese bestehen aus einer komplexen mikrobiellen Gemeinschaft, die sich in erster Linie aus Cyanobakterien und Algen zusammensetzt. Aufgrund des einfallenden Tageslichts sind die Wandbereiche nahe dem Eingang besonders betroffen, wo sich seit Beginn der Arbeiten ein grün-blauer Bewuchs entwickelt hat. Das Wachstum könnte durch die Verringerung der Luftzirkulation infolge der Abdichtung des kleinen Fensters weiter verstärkt worden sein.



Abb. 21: Großflächige Vergrünung der Oberfläche im Bereich der Paulusszene infolge des Befalls durch Algen und Cyanobakterien.

Biofilme treten jedoch nicht nur auf der unmittelbaren Oberfläche auf: auch dünne Kalksinterkrusten lassen ausreichend Licht durch, sodass sich in bzw. unter ihnen, d. h. an der Grenzfläche zur Malerei, Algen finden, die gegenüber Biozidbehandlungen entsprechend geschützt sind. An diesem Beispiel wird die enge, kausale Beziehung zwischen Biofilmen und Sinterbildung deutlich, da die Mikroorganismen dem abrinnenden Wasser CO_2 entziehen, was zur weiteren Ausfällung von Kalk führt.

Der Nachweis von Kieselalgen in einigen Proben erklärt das Phänomen, dass die Sinterkrusten erhöhte Siliziumgehalte aufweisen, also teilweise verkieist sind. Dies führt zu einer weiteren, inhomogenen Verhärtung der Krusten.

Wie an anderer Stelle ausgeführt wird, stellen Biozidbehandlungen der betroffenen Flächen keine wirkliche Lösung des Problems dar – auch, aber nicht nur deswegen, weil die Behandlung nicht mit der nötigen Regelmäßigkeit durchgeführt werden kann. Eine Indikation für den Einsatz von Bioziden im Zuge der Freilegungsarbeiten war jedoch dadurch gegeben, dass der grüne Farbstoff des Chlorophylls in den Putz eindringen und ihn irreversibel verfärben kann, wenn man versucht, den Organismus im lebenden Zustand zu entfernen.

Werden die abgestorbenen Algenrückstände nicht restlos entfernt, dann muss mit vermehrtem Pilzbefall gerechnet werden. Dasselbe gilt für andere Rückstände organischer Natur, wie Zellulose aus Kompressenmaterial oder Harzreste aus der chemisch unterstützten Krustenentfernung. So wurde in den letzten Jahren an einigen Stellen beobachtet, dass sich ein schwarzer Schimmelpilz entwickelte, der zuvor nicht vorhanden gewesen war (Abb. 22).

Abb. 22:
Schimmelpilz der Gattung *Stachybotrys chartarum* als Sekundärbesiedelung an Stellen, die zuvor mit zellulosehaltigen Restauriermaterialien in Kontakt gewesen waren.



Die einzige Möglichkeit, das Problem des Bewuchses der Grottenwände nachhaltig in den Griff zu bekommen, liegt in einer Verbesserung der raumklimatischen Situation. Dabei ist zu beachten, dass hohe Luftfeuchte im Grottenraum den Befall zumindest genauso begünstigt wie Wasser in seiner flüssigen Form.

Flüssiges Wasser im Inneren der Grotte ist in seiner Wirkung vom mikrobiologischen Problem nicht zu trennen, bildet aber eine darüber hinausgehende Schadensursache. Die wesentlichen Feuchtequellen sind Kondensation und Sickerwasser. Die Unterscheidung beider Faktoren in Hinblick auf die Schadensphänomene ist im Einzelnen nicht einfach; ein Lokalausguss im Frühjahr 2006, zu einem Zeitpunkt, als beide Formen des Feuchteintrags gleichzeitig auftraten, konnte hier weitgehend Klarheit bringen.

Kondensation von Wasser auf Oberflächen tritt dann auf, wenn die Taupunkttemperatur der Luft über der Oberflächentemperatur liegt. Diese Voraussetzungen treffen in der warmen Jahreszeit besonders in Höhlen und Grotten häufig zu, da deren Wände infolge der großen Masse und thermischen Trägheit des umgebenden Felsgesteins unterkühlt sind³⁶.

Starke Kondensation an besonders feuchten Tagen verursacht zunächst die Bildung einzelner Wassertropfen auf den Wandflächen, die sich in der Folge an der Oberfläche zu einem Wasserfilm verdichten (Abb. 23) und dann zum

³⁶ Eine Reihe von Arbeiten beschäftigt sich mit dem Problem von Kondensation in Höhlen, so z. B. C. R. DE FREITAS – A. SCHMEKAL, Prediction of condensation in caves. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers* 3/2 (2005) – auch verfügbar unter: <http://www.speleogenesis.net>. Es scheint nicht ausgeschlossen zu sein, dass Kondensation in vielen Höhlen den wichtigsten Mechanismus für Wassereintrag darstellt.



Abb. 23: Vollständige Benetzung der Malschicht durch Kondenswasser an einem Sommermorgen.



Abb. 24:
Ätzspuren in der Tünche, bewirkt durch
abrinrendes Kondenswasser.

Entstehen von Rinnsalen führen können, die eine Korrosion von Tünche und Malschicht bewirken (Abb. 24). Hingegen verursacht die ständige Anwesenheit von Wasser vorwiegend in den Ecken des Stirnraums, sei es aufgrund von Kondensation oder durch Infiltration, Korrosionserscheinungen mit kreisförmig-konzentrischem Verlauf, verbunden mit einer Bindemittelverarmung und Kohäsionsverlust der Schichten (Abb. 25).

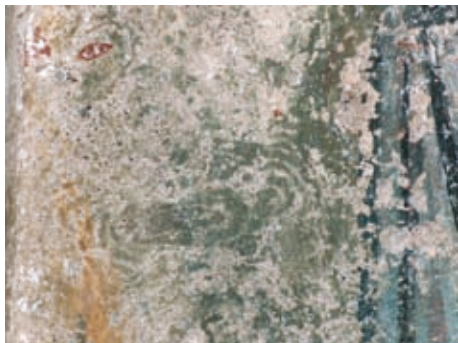


Abb. 25:
Kreisförmige Verwitterungsmuster der
Malschicht, möglicherweise bewirkt durch
leichte Verdichtungen im Malmittel bei
kreisender Pinselführung.

Die Einwirkung von Kondenswasser, das ungesättigt und daher besonders aggressiv ist, bewirkt zum einen die Lösung von Kalk aus Putz- und Malschichten und führt andererseits zur Wiederausfällung des Kalks in benachbarten Bereichen. Auf diese Weise kommt es zur Krustenbildung in Zonen, wo das Wasser durch Verdunstung eintrocknet. So entstehen durch Mikrorisse gestörte Partien, deren Gefüge infolge Versinterung zugleich eine außergewöhnliche Kompaktheit aufweist. Auch aus den mikroskopischen Präparaten geht die Ungleichmäßigkeit der Versinterungen und Verkrustungen sowie des Abbaus der Putzmörtel klar hervor. Eben dieses Phänomen verursacht bei der so inhomogenen Oberfläche beachtliche Schwierigkeiten in Hinblick auf die Wahl der jeweils geeigneten Vorgangsweise für die einzelnen Bereiche.

Eindeutig auf den punktuellen Austritt von Sickerwasser (Abb. 26) gehen konzentrische Schadenszonen vor allem an der Decke zurück, die mit Aufwöl-
bungen und Abhebungen der versprödeten Tüncheschichten verbunden sind.



Abb. 26: Tropfenbildung an der Höhlendecke infolge von Wasserinfiltration nach einer Niederschlagsperiode im Spätwinter.



Abb. 27: Sinterbildungen an der Höhlendecke, die das Kluftsystem erkennen lassen.

Daneben stellen großflächige Fehlstellen, bereichsweise starke Verdunklungen der Putze und Malereien, vereinzelte Salzausblühungen, Schichtentrennung, Tropfsteinbildung und Wurzelaustritt einige weitere charakteristische Anzeichen von Sickerwasser aus dem Felsen dar³⁷. Diese Phänomene scheinen sich allerdings aufgrund der geologischen Beschaffenheit des Gesteins, das ein dichtes Mineralgefüge hat, jedoch von Kluftsystemen in unregelmäßigen Abständen durchzogen ist, auf definierte Stellen zu beschränken.

Im Unterschied zu Kondenswasser kann das kalkgesättigte Sickerwasser zwar kaum lösend wirken, ist aber ebenso mit dem Transport und der Ausfällung von Kalksinter verbunden. So kommt es zur Ausbildung kleiner Stalaktiten an der Decke, deren Anordnung den Verlauf des darunter liegenden Kluftsystems erkennen lässt (Abb. 27).

Calciumkarbonat als Sinterbildung verursacht Krusten, die auf oder bisweilen auch unterhalb der Tünche anzutreffen sind, und bewirkt eine Gefügeverdichtung in ihrem Inneren. Die Härte und durchscheinende, glasig wirkende Beschaffenheit der versinteren Schichten wird durch den Silikatanteil noch verstärkt, der auf die Aktivität von Kieselalgen zurückgeht. Die Sinterkrusten sind daher sehr beständig, von unterschiedlicher Dicke und fest an der Malerschicht anhaftend.

Obschon vor dem Auftragen eines neuen Putzes die Unterlagen oft gehackt wurden, hat dennoch die glatte, durch Versinterung vielfach verdichtete Beschaffenheit der Schichten zum Abfallen der jüngeren Putzpakete geführt, von denen tatsächlich nur sehr geringe Teile erhalten geblieben sind.

Neben den Krusten ist verbreitet ein Weißschleier zu finden, der einen dünnen Belag aus Karbonaten oder, in seltenen Fällen, Phosphaten darstellt; letztere sind vermutlich bei der Zersetzung von biogenem Material aus Vogelnestern, Tierexkrementen oder Rückständen von Insekten oder kleinen Tieren entstanden. Lösliche Salze wie Gips oder Magnesiumkarbonat, die solche Weißschleier häufig aufbauen, wurden nur ausnahmsweise nachgewiesen.

Leitfähigkeitsmessung der Oberfläche zum Nachweis von Feuchtezonen mit löslichen Salzen, die in der Trockenperiode in verschiedenen Bereichen durchgeführt wurden, konnten erhöhte Feuchtigkeitswerte im unmittelbaren Umfeld von Gesteinsklüften nachweisen (Abb. 28). Der Fels ist also auch im Sommer nicht vollständig trocken, was dadurch bewiesen wird, dass bei her-

³⁷ Im mediterranen Klima mit seinen niederschlagsfreien Sommern ist das Auftreten von Sickerwasser nur auf die Regenperioden des Winters beschränkt. Dann kann es sich allerdings am Boden der Grotte zu Pfützen sammeln, die über längere Zeiträume bestehen bleiben und das Raumklima feucht halten.

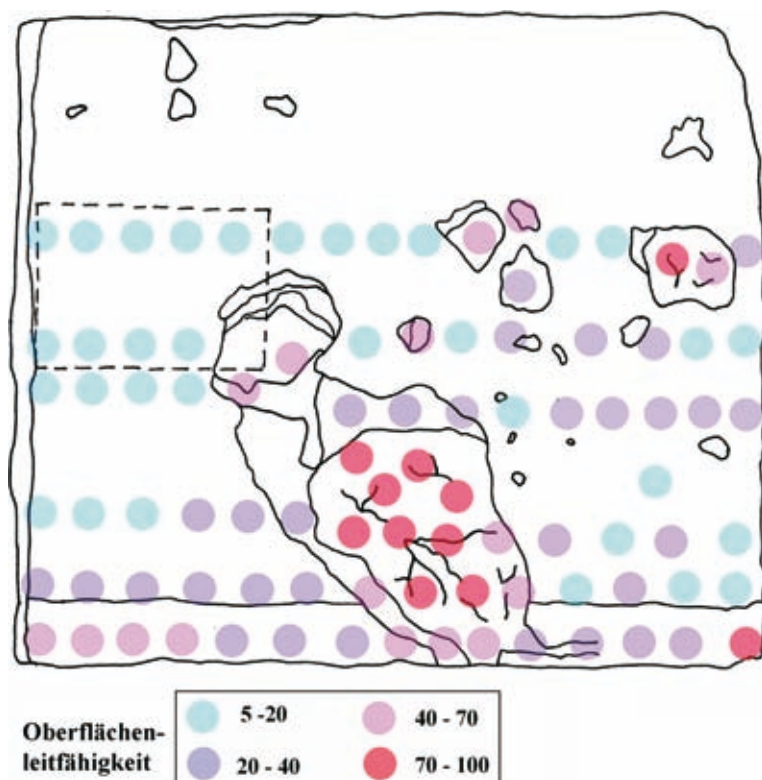


Abb. 28: Leitfähigkeitsmesswerte an der Südwand des Stirnraums, gemessen im Sommer. Die dimensionslosen Werte geben ein ungefähres Maß für die Feuchtebelastung – erhöhte Feuchtwerte in Bodennähe und im Bereich einer großen Fehlstelle mit Gesteinsklüften.

metischem Verschließen des Eingangs die Luftfeuchtigkeit in der Grotte rasch bis zur Sättigung ansteigt.

Erhöhte Messwerte waren auch in den unteren Wandabschnitten besonders der Südwand des Stirnraums nachzuweisen (vgl. Abb. 28). Dieser Befund deutete auf Kapillaraufstieg hin, offensichtlich verursacht durch die Torfschicht, die den Boden bedeckte, durch biogene Substanzen stark verunreinigt war und so eine Quelle für lösliche Salze darstellte. In Proben dieses Erdreichs wurden in der warmen Jahreszeit Feuchtegehalte von nahezu 20 Gew.-% und Nitratkonzentrationen von 0,6 Gew.-% gemessen, ein deutlicher Hinweis auf die hygroskopische Wirkung der Nitratsalze. Das Erdreich wurde inzwischen soweit möglich entfernt und der Felsboden intensiv gereinigt.

Im Übrigen bilden Schadsalze keine wesentliche Bedrohung für den Bestand. Putz- und Malschichten sind, ganz im Unterschied zu historischen Mauerwerken mit aufsteigender Feuchte in besiedeltem oder landwirtschaftlich genutztem Gebiet, im Wesentlichen salzfrei. Das einsickernde Wasser als potenzielles Transportmedium für Salze ist offensichtlich frei von Nitraten, Chloriden und Sulfaten. Die Ursache dafür dürfte in der kargen Erdbedeckung des Kalkgesteins im Grottenumfeld und dem Fehlen einer landwirtschaftlichen Nutzung liegen, da den Felsklüften selbst keine Filterwirkung zuzuschreiben ist.

Weitere Schadensformen umfassen fehlende Adhäsion zwischen den Schichten verschiedener stratigraphischer Ebenen, die wahrscheinlich auf Gefügezerstörung durch mechanische Einwirkung zurückführbar sind. Gesichter und Augen der dargestellten Figuren wurden im Zuge ikonoklastischer oder vandalischer Akte verunstaltet. Zudem hat die Verwendung der Grotte als Unterstand für Mensch und Tier den allgemeinen Verfall begünstigt.

2.6.1 Einleitung

Das Arbeitsfeld der Restaurierung, in dem die Maßnahmen oft zügig und rasch durchgeführt und abgeschlossen werden müssen, erlaubt es häufig nicht, die Auswirkungen getroffener Entscheidungen und das Fortschreiten bestimmter Prozesse zu verfolgen und zu untersuchen. Bei den Arbeiten in der Paulusgrotte hat jedoch die langfristig angelegte Zeitplanung die Möglichkeit zu Korrekturen im Rahmen des Arbeitsfortschritts geboten, um zu möglichst schonenden Lösungen zu gelangen.

Während der fünf Kampagnen innerhalb der Jahre 2000 bis 2005 wurden mehrere Veränderungen registriert, die teilweise eine Folge des Restauriereingriffs darstellten, zum anderen Teil aber durch äußere Umstände und zufällige Faktoren hervorgerufen wurden. Dabei wurden viele Daten gesammelt und diverse Hypothesen und Ideen formuliert, die oft genug inhaltlich widersprüchlich waren. Einige Unsicherheiten bleiben immer noch bestehen, aber das Interesse, das diese bedeutenden Malereien erregt haben, führte zur Einbeziehung von Fachleuten aus benachbarten Disziplinen, mit deren Hilfe an der Umsetzung idealer Methoden gearbeitet wird.

Die Auswirkungen der im folgenden beschriebenen Maßnahmen auf das Raumklima können nur mit einigen Unsicherheiten abgeschätzt werden, da die Klimamessungen der Jahre 2000 bis 2005 aufgrund technischer Probleme nur unvollständige Daten lieferten und ein fachmännisches Messprogramm erst im September 2005 gestartet werden konnte.

Die nach Beginn der Restaurierung durchgeführten Maßnahmen zur Verbesserung der Gesamtsituation der Paulusgrotte beinhalteten etwa die bauliche Erneuerung des einsturzgefährdeten Eingangsbereichs, wobei allerdings eine Fensteröffnung verschlossen wurde. Diese Arbeiten stellten natürlich einen Eingriff in den Klimahaushalt der Grotte dar, der jedoch als nicht dramatisch zu bewerten ist. Zudem wurde das Gitter der Eingangstür mit einem engmaschigen Netz verstärkt, um das Eindringen von Kleintieren möglichst zu verhindern. Dieses wurde mit einem lichtundurchlässigen Tuch versehen, wodurch das Algenwachstum in Grenzen gehalten werden soll, ohne die Luftzufuhr in die Grotte zu behindern.

2.6.2 Grundreinigung und Biozideinsatz

Eine schwierige und weniger angenehme Arbeit war die sorgfältige Entfernung der Erdreste auf dem Boden und in weiterer Folge dessen Desinfizierung, um die Verbreitung von Mikroorganismen zu verhindern. Die Grotte hatte für lange Zeit als Unterstand für Schafe gedient, und so reichte die erste Trockenreinigung nicht aus, um den unangenehmen Geruch und die unhygienischen Überreste organischer Stoffe – Nährboden für Salze und Mikroorganismen – vollständig zu entfernen.

Die hohe Feuchtigkeit der verschmutzten Erde hatte im Kontaktbereich zu den Wänden kapillaren Wassereintrag bewirkt und zudem die Einnistung vieler Insekten, wie Raupen, Tausendfüßler etc. begünstigt.

Die Bodenfläche der Grotte wurde unter Einsatz von Druckwasser und eines Wassersaugers gereinigt, wobei dem Wasser ein Desinfektionsmittel zugesetzt war³⁸. Dabei wurde stets auf eine vollständige Abdeckung der Wände geachtet.

³⁸ 5 %-iges Neodesogen®.

Im Zuge dieser Reinigungsarbeiten hat man Überreste eines Ziegelsplittmörtels entdeckt, der wahrscheinlich zum Einebnen des felsigen Untergrunds vor dem Aufbringen eines Bodens eingesetzt worden war.

Angesichts des biogenen Schadenspotenzials musste bedacht werden, dass unter den gegebenen Klimaverhältnissen jegliche Behandlung mit Bioziden nur von vorübergehender Wirkung sein kann. Aus restauratorischen Gründen, das heißt als Voraussetzung zur Freilegung und Reinigung der Wandmalereien, wurden jedoch in gewissen Bereichen Maßnahmen zur Desinfizierung getroffen³⁹. Trotz der Hartnäckigkeit einiger Spezies und der bereits erwähnten praktischen Schwierigkeiten zeitigten der Einsatz der Biozide und die Abdunkelung der Türöffnung erste Ergebnisse.

Aus den mikrobiologischen Laborbefunden und der Beobachtung vor Ort ging allerdings die Anwesenheit einer biozidresistenten Algenart hervor, ebenso wie die Gegenwart von Pilzen und Bakterien. Die Entfernung der abgestorbenen Algen, die sich als Maßnahme von größter Wichtigkeit erwies, wurde mit Trockenbürste und Staubsauger durchgeführt, um die Entwicklung einer Sekundärbesiedlung durch Pilze und Bakterien soweit als möglich zu verhindern.

Als Präventionsmaßnahme wurden alle Wandflächen mit einem Biozid besprüht⁴⁰, das an den pilzbefallenen Stellen zusätzlich mit dem Pinsel aufgetragen wurde.

2.6.3 Zum Umgang mit Kondensfeuchte

Nachdem zu Beginn der Kampagne im Juli 2004 eine beträchtliche Zunahme der Kondenswasserbildung im Vergleich mit den Vorjahren festgestellt werden musste, wurde im Inneren der Grotte ein Metallrohr angebracht, das zu einer Erhöhung der Luftzirkulation und damit zur beschleunigten Trocknung beitragen sollte. Das Rohr war mit seiner Öffnung etwa in der Grottenmitte an der Decke montiert, führte ins Freie und bog über dem Eingang hinauf. Durch sonnenbedingte Erwärmung des außen verlaufenden Rohrteils sollte ein Luftsog entstehen. Dieses Belüftungssystem schien gemäß dem derzeitigen Beobachtungsstand leider nicht ausreichend bzw. war der gewünschte verstärkte Luftaustausch unter bestimmten Klimaverhältnissen gar nicht erstrebenswert.

Ein alternativer Denkansatz zum Schutz der Malschicht vor den Auswirkungen der Kondensfeuchte bestünde in einer Hydrophobierung der Malschicht. Für diese im Fassadenschutz und der Steinrestaurierung häufig eingesetzte Art der Behandlung dürfte im Fall von Wandmalereien im Innenraum noch keine Praxiserfahrung vorliegen. Die Grundlage der Hydrophobierung besteht im Aufbau einer unsichtbaren, nicht porenverschließenden Schicht mit wasserabweisenden Eigenschaften in der Baustoffoberfläche. Für den Fall von Wasser, das von hinten die Malschicht infiltriert, wäre dennoch mit einer Behinderung der Trocknung zu rechnen, sodass dieser irreversible Eingriff nur an Oberflächen vertretbar wäre, die lediglich durch Kondenswasser benetzt werden.

³⁹ Preventol R 80® (Bayer – Rhein Chemie) 5 %-ig in wässriger Lösung, mit abgedeckten Kompressen aus Zellstoff und Sepiolith. Die Kompressen wurden mindestens fünf Tage belassen; die Behandlung wurde dreimal wiederholt. Es folgten viele weitere Anwendungen dieses Biozids in zumindest fünftägigen Abständen mit dem Pinsel. Auf dieselbe Weise wurde auch Benzalkoniumchlorid zur Bekämpfung heterotropher Organismen eingesetzt.

⁴⁰ 5 %-ige Lösung von Preventol.

Um die ästhetischen Auswirkungen und das Langzeitverhalten einer derartigen Hydrophobierung testen zu können, wurde diese auf einer kleinen Versuchsfläche durchgeführt⁴¹ (Abb. 29).



Abb. 29:
Testfläche im Bereich der Paulusszene mit
Hydrophobierung (rechts): die Behandlung
führt zunächst zu einer deutlichen Farbver-
tiefung, die sich jedoch nach einiger Zeit
fast vollständig zurück entwickelt.

2.6.4 Freilegung und Reinigung

Unter denjenigen Eingriffen, die unmittelbar an den Malereien durchgeführt wurden, war zweifellos die Entfernung der überlagernden Sinter- und Tüncheschichten mit den meisten Schwierigkeiten verbunden.

Nachdem mehrere Fenster freigelegt worden waren, wurden die besonders interessierenden Bereiche identifiziert und eine Vorgangsweise festgelegt, die auf die unterschiedlichen Schadenszustände Rücksicht nehmen musste. Dabei wurde einem möglichst minimalen Eingriff der Vorzug gegeben, nicht zuletzt in Hinblick auf die zu erwartenden langen und schwer abschätzbaren Arbeitspausen. In einigen Bereichen erwies sich die Behandlung als besonders kompliziert, vor allem an jenen Stellen, an denen nicht eindeutig zu bestimmen war, was sich unterhalb der Tünche befand. In solchen Bereichen war die Regelmäßigkeit der Originaloberflächen, die Dicke und Härte der zu entfernenden Krusten und der Festigkeitszustand der darunter liegenden Schichten unbekannt.

Die mechanische Entfernung der Tünche erfolgte mit zahlreichen Instrumenten wie Bürsten, Skalpellen oder Ultraschallgeräten, wobei zuvor häufig

⁴¹ Es handelte sich um die Funcosil-Fassadencreme® der Firma Remmers, eine wässrige Emulsion aus Silanen und Siloxanen von cremartiger Konsistenz. Dieses Produkt sollte dank seiner Konsistenz auch in kompaktes Porengefüge eindringen und zu verringerter Benetzbarkeit des Verputzes beitragen ohne die Lichtbrechung wesentlich zu verändern. Die Testbehandlung wurde mit dem Pinsel an einem trockenen Tag im Sommer 2004 auf einer Probefläche an der Westwand vorgenommen, u. zw. auf der zweiten Putzschicht im Bereich der Abbildung des Hl. Paulus (im Haus Theklas). Die Wahl fiel auf diesen Bereich, weil der Verputz hier besonders kompakt und stark am Untergrund anhaftend erscheint. Die Aufnahme des Wirkstoffs war zunächst ungleichmäßig, sodass noch nach zwei Tagen glänzende Stellen sichtbar waren. Im Zeitabstand von einem Jahr ist lediglich eine leichte Farbvertiefung erkennbar. Kondenswasser bleibt in Form feiner Tröpfchen stehen und bildet keinen Film.

eine Aufweichung der Schicht mit destilliertem Wasser in Kompressen versucht wurde. Schwierigkeiten betrafen vor allem die Notwendigkeit einer Anpassung an die veränderlichen Klimabedingungen und die Unterschiede zwischen den verschiedenen Putzschichten. Während einiger Kampagnen, bei denen es aufgrund besonders niedriger Luftfeuchte keine Kondenswasserbildung gab, zeigte sich die Kalkschicht sehr hart, widerstandsfähig und kompakt, bis hin zu einer beinahe glasartigen Konsistenz. In solchen Fällen wurden dem Kompressenwasser Chemikalien zugesetzt⁴².

Meist konnten jedoch mit den bis zu vielen Stunden lang applizierten Waserkompressen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden, wodurch die Hypothese über die aufweichende und lösende Wirkung des Kondenswassers bestätigt wurde.

Die verkieselten Kalkkrusten wurden mit verschiedenem Werkzeug wie Skalpellen, Mikroskalpellen und Präzisionsmikrofräsen mit Diamantspitze gedünnt und schließlich mit pneumatischen Mikromeißeln gänzlich entfernt. Der Einsatz dieser Geräte war abermals mit technischen Schwierigkeiten verbunden, in erster Linie was die Stromversorgung betraf.

Die Entscheidung über den Grad der Freilegung und Reinigung war und ist insofern nicht leicht, als dabei sowohl die Lesbarkeit und somit die Möglichkeit zur Untersuchung und Rezeption der Wandbilder zu berücksichtigen ist, als auch der Erhaltungsaspekt in Bereichen, wo hartnäckige Krusten einer entfestigten Putzschicht aufliegen. In jenen Fällen, in denen die vollständige Entfernung der Krusten die darunter liegende Farbschicht beschädigt hätte, fiel die Entscheidung auf eine leichte Retusche auf dem verbliebenen Belag.

Die schleierartigen Restbeläge aus teilweise unlöslichen Rückständen wurden mit kationischen Austauscherharzen entfernt, deren Einwirkungsdauer je nach Dicke variierte⁴³. Ihre Wirkung erwies sich als leicht kontrollierbar und lieferte gute Ergebnisse, wodurch eine verbesserte Lesbarkeit des Kunstwerks erzielt wurde. In einigen Bereichen, in denen mit solchen Harzen gearbeitet worden war, wurde jedoch das Wachstum eines zuvor nicht vorhanden gewesenen Pilzes beobachtet (Abb. 22). Diese Spezies, die sich zunächst rasch ausbreitete, ist schwarz und von pulverartiger Konsistenz. Es wird angenommen, dass mögliche organische Überreste der Harze, die an besonders unebenen Stellen des Putzes verblieben sein könnten, als Nährboden für diesen Pilz fungierten.

An allen Malschichten wurde exemplarisch eine sorgfältige Entfernung von Belägen, die nach der Freilegung stehen geblieben waren, durchgeführt. In größerem Umfang erfolgte dieser Arbeitsschritt in den ikonographisch besonders interessanten Bereichen und auch dort, wo die Anwesenheit von Mikroorganismen zu erkennen war.

Eine vollständige Freilegung und Reinigung von Überkrustungen und Belägen wurde zunächst nur an jener Schicht der Westwand des Grottenganges vorgenommen, die die Paulusszene trägt, sowie an der Ostwand des Stirnraums, die als außerordentlich bedeutende Abfolge von Malereien erkannt wurde. Die Arbeiten an dieser Wand mit allen nötigen Restauriermaßnahmen stellten einen Schwerpunkt der vorletzten Kampagne dar. Die – allerdings sehr zurückhaltende – Retusche beinhaltete eine farblich neutrale Abtönung von nicht entfernbaren Krusten und Kittungen in lasierender Technik⁴⁴.

⁴² Ammonkarbonat und -bikarbonat mit Zusatz von Ethylendiamintetraessigsäure, EDTA, als Komplexbildner.

⁴³ Amberlite IR 120H® der Firma C.T.S.

⁴⁴ Verwendung von Aquarellfarben der Marke Windsor & Newton.

Die Ausbreitung des zuletzt aufgetretenen Pilzbefalls auch auf dieser Wand und mögliche Auswirkungen des Einbringens von Gummi Arabikum als organischem Bindemittel der Aquarellfarbe stehen unter Beobachtung und werden gegebenenfalls zu einer Modifizierung der Arbeitsweise in den anderen Bereichen führen.

2.6.5 Festigung und Kittung

Aufgrund der oben mitgeteilten Beobachtung musste die mögliche Auswirkung organischer Produkte in einem derart ungünstigen Klimaumfeld neu überdacht werden, sodass zur weiteren Festigung der Malschicht Kalkwasser im Sprühverfahren zum Einsatz kam. Dies erfolgte ausschließlich in sandenden Bereichen und nur an trockenen Tagen, an denen die Wände für das Kalkwasser ausreichend aufnahmefähig waren, sodass es zu keiner Schleierbildung an der Oberfläche kam. Eine derartige Festigung kann eher als eine Wartungsmaßnahme denn als ein Restauriereingriff gesehen werden, wobei aufgrund der lösenden Wirkung des Kondenswassers auch keine nachhaltige Wirkung zu erwarten ist.

Die Hinterfüllung von Putzablösungen mit einer Mörtelschlämme⁴⁵ wurde weitgehend auf gefährdete Stellen im Umfeld von Fehlstellen beschränkt. Die Gefügefestigung von abgelösten Putzmörteln und die Fixierung von Malschichtschollen wurde punktuell mit Acrylharz vorgenommen⁴⁶.

Die Kittungsarbeiten waren je nach Verputzschicht unterschiedlich und beschränkten sich auf eine Randsicherung und die Schließung größerer Fehlstellen, die die Lesbarkeit der Wandmalereien beeinträchtigten. Im Zuge der Entfernung von Krusten wurden an Löchern mit geringem Festigkeitsgrad kleine Kittungen durchgeführt, um eine kompakte Oberfläche zu erhalten und so die Arbeit mit dem Mikromeißel zu erleichtern. Alle Kittungen sind mit reinem Kalkmörtel unterschiedlicher Körnung durchgeführt, wobei die Mörtelkonsistenz in ästhetischer und technischer Hinsicht auf die jeweilige Putzumgebung eingestellt wurde.

Eine Neubewertung der Funktion von Randkittungen um Fehlstellen ergab die Erkenntnis, dass diese neben der Sicherung gefährdeter Putze auch das Abirren von Infiltrationswasser aus der Grenzfläche erlauben müssen. Die Lage alter Rinnspuren wies diejenigen Stellen aus, an denen durch Perforierung der Kittmasse Abflüsse zu schaffen waren.

Dieserart wurden sorgfältige Festigungsarbeiten an den Putz- und Malschichten im gesamten Innenraum vorgenommen, allerdings unter Aussparung einiger Flächen, an denen eine mögliche Verschlechterung des Zustands anhand von Fehlstellenrändern mit Neigung zur Wasserinfiltration beobachtet werden kann.

2.6.6 Weitere Aussichten

Trotz aller bisher erzielten und für die nächste Zukunft zu erwartenden Restaurierungsergebnisse werden die Arbeiten nicht eher als abgeschlossen gelten können, als mehrjährige Messungen aller relevanter Klimadaten eine eindeutige Risikoabschätzung und die Formulierung eines Wartungs- und Maßnahmenkonzepts

⁴⁵ Zur Festigung wurde eine hydraulische Mörtelschlämme auf der Basis von Ledan® injiziert; zur verbesserten Benetzung mit Wasser und Ethanol vorgemischt.

⁴⁶ Einsatz einer wässrigen Acrylharzdispersion auf der Basis von Primal® in einer Konzentration von 10 %.

ermöglichen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt steht noch nicht einmal fest, ob die freigelegten Malereien auf lange Sicht überhaupt erhalten werden können; sollte dies nicht der Fall sein, muss man dazu bereit sein, die Wandflächen wiederum mit einer Tünche zu bedecken – eine schwierige Entscheidung, die aber die Erhaltung dieses Kulturguts und seinen Fortbestand für die Generationen nach uns zum Ziel hätte.

FRANCESCA GHIZZONI – GIOVANNA FULGONI –
SAVINA GIANOLI – SABRINA SALVATORI – JOHANNES WEBER

3. Detaillierte Untersuchungen zum mikrobiologischen Befall⁴⁷

3.1 BEFUND

Der an den Wänden der Paulusgrotte verbreitet auftretende grüne und schwarzgrüne Bewuchs besteht aus Biofilmen aus einer komplexen mikrobiellen Gemeinschaft, die sich in erster Linie aus Cyanobakterien und Algen zusammensetzt (Abb. 30). Beide Gruppen von Mikroorganismen sind durch Chlorophyll

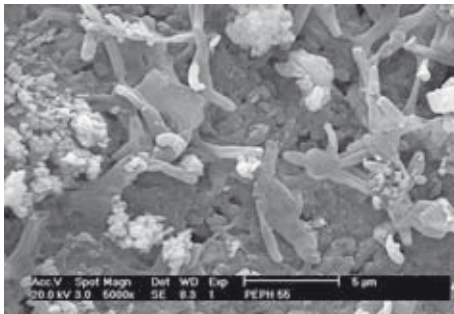


Abb. 30:
Fädige Algen auf der Oberfläche (REM).

grün pigmentiert und betreiben Photosynthese. Das bedeutet, dass das in die Grotte einfallende Licht einen wesentlichen Aspekt für die Entwicklung der Mikroorganismen darstellt. Durch mikroskopische Analyse konnten mehrere Gruppen von Cyanobakterien identifiziert werden:

- (1) gloecapsale Cyanobakterien, die sich dadurch auszeichnen, dass sie ihre Zellen durch dicke Schichten von Schleimen vor Austrocknung schützen (Abb. 31). Diese Schleimkapseln haben auch einen Schutzeffekt vor Giftstoffen, sodass Biozide oft gar nicht in die Zelle vordringen und die Cyanobakterien nur schwer abgetötet werden können;
- (2) fädige Cyanobakterien mit Heterozysten. Diese Organismen können in den speziellen „Heterozysten“ Distickstoff aus der Luft aufnehmen und ihn in eine biologisch verfügbare Form umwandeln. Dies führt zu einem „Düngereffekt“ an ansonsten stickstoffarmen Standorten, da der Stickstoff bei Absterben des Cyanobakteriums auch anderen Organismen – z. B. Pilzen oder Bakterien – zur Verfügung steht;

⁴⁷ Die Entnahme von Probenmaterial erfolgte am 1. 10. 2004. Es wurden vier Proben von gut bewachsenen und biozidbehandelten Flächen sowie drei Proben von bewachsenen und nicht vorbehandelten Flächen entnommen. Die Probennahme erfolgte mit sterilem Skalpell, die Proben wurden bis zur Analyse im Labor in sterilen Gefäßen aufbewahrt. Die Analysen und die Charakterisierung der Mikroorganismen erfolgte durch Lichtmikroskopie, nachdem die trockenen Proben einige Minuten in Wasser zum Quellen gebracht worden waren. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurden an goldbedampften Probesplintern im Hochvakuum bei 20 kV Beschleunigungsspannung durchgeführt.

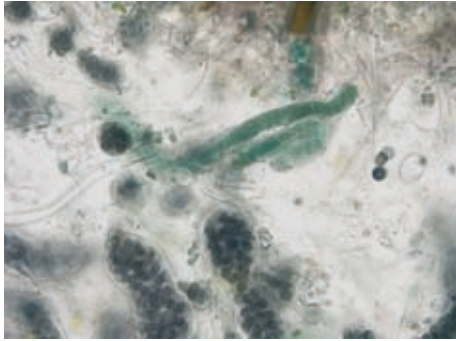


Abb. 31: Fädige Algen und von Schleimkapsel umgebene Cyanobakterien (Durchlichtmikroskop).



Abb. 32: Fädige Algen (Durchlichtmikroskop).

(3) weitere fädige Cyanobakterien der Gattungen *Oscillatoria* und *Lyngbya* (Abb. 32). Zusammen mit den Cyanobakterien kommen zahlreiche einzellige und fädige Mikroalgen vor. Besonders hervorzuheben ist hier das Auftreten von Diatomeen (Kieselalgen), da diese im Allgemeinen als aquatische Organismen angesehenen Algen als Indikatoren für eine sehr hohe Feuchtigkeit zu sehen sind.

Die Cyanobakterien und Algen verursachen durch ihre Photosynthesepigmente (Chlorophyll, Carotin) grüne Verfärbungen an den Wandoberflächen. Durch unterschiedlichen Lichteinfall und lokal unterschiedliches Feuchteangebot entstehen an den Wänden mikroklimatische Nischen, die wiederum die Zusammensetzung des Biofilms beeinflussen. Die Dominanz einzelner Gruppen prägt dessen optisches Erscheinungsbild, sodass er an manchen Stellen hellgrün und samtig und an anderen Stellen dunkelgrün und krustig erscheint. Ist der Biofilm stark ausgetrocknet oder abgestorben, schlägt die grüne Farbe des Chlorophylls in Braun oder Schwarz um. Auch solche schwarze Krusten sind in Bereichen der Malerei deutlich erkennbar. Diese Schwarzfärbung ist jedoch nicht als Indikator für einen abgestorbenen Biofilm anzusehen, sie kann auch durch temporäre Austrocknung verursacht sein, sodass der Biofilm bei Wiederbefeuchtung seine grüne Farbe wiedererlangt und die Mikroorganismen erneut wachstumsfähig sind.

Neben den optischen Beeinträchtigungen der Wandmalerei, die mit dem mikrobiellen Befall einhergehen, sind zwei Schädigungsmechanismen von Bedeutung. Algen- und Cyanobakterienfilme haften sich sehr eng dem Untergrund an und entwickeln bei Austrocknung hohe Zugspannungen. Durch das Aufrollen eines austrocknenden Biofilms kommt es daher zur Mitnahme von Wandmaterial an der Unterseite der Biofilme, was zu einem erheblichen Verlust von Malschicht führen kann (Abb. 33). Darüber hinaus sind in der Paulus-



Abb. 33:
Belag aus Algen und Cyanobakterien, der sich im Zuge des Trocknens abhebt; große Aushöhlung in der Westwand, rechts vom Eingang.



Abb. 34: Cyanobakterien und Algen innerhalb der Sinterkruste (Durchlichtmikroskop).

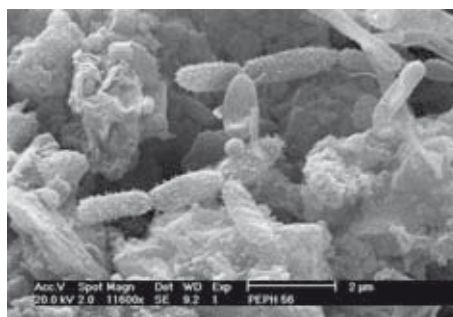


Abb. 35: Pilzsporen (REM).

grotte Bereiche sichtbar, wo der grüne Biofilm unter dünnen Karbonatschichten auftritt. Hier ist es durch die photosynthetische Aktivität der Algen und Cyanobakterien (Abb. 34) zur Ausfällung von sekundären Karbonaten, also zur „Versinterung“ der Oberfläche gekommen. Auch dieses Phänomen ist ein Hinweis auf sehr hohe Feuchtigkeit an den Wänden, die mit einem geschlossenen Wasserfilm an der Oberfläche einhergeht.

Begleitend zu den Cyanobakterien und Algen treten zahlreiche Bakterien sowie Schimmelpilze auf (Abb. 35). In Bereichen, wo die Algen und Cyanobakterien durch die Behandlung mit Bioziden abgetötet wurden, ist das Wachstum der Bakterien und Pilze besonders stark, da sie sich von abgestorbenen Zellen und Stoffwechselprodukten ernähren können.

3.2 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die mikrobiologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass auch durch die wiederholte Behandlung mit geeigneten Bioziden keine ausreichende Bekämpfung der Mikroflora möglich ist. Die Vielfalt der an den Wandoberflächen vorkommenden Mikroorganismen ist so hoch, dass es durch die Biozidbehandlung nur kurzfristig zu einer Reduktion bzw. eher zu einer Veränderung der mikrobiellen Gemeinschaft kommen kann. Eine erfolgreiche und langfristige Bekämpfung ist daher nur durch die geeignete Klimatisierung der Paulusgrotte möglich. Besondere Berücksichtigung sollten dabei die Faktoren Licht und Feuchtigkeit finden. Die Abdunkelung der Grotte kann das Wachstum der Algen und Cyanobakterien unterdrücken, da diese – wie Pflanzen – das Licht als Energiequelle zur Photosynthese benötigen.

Diese Maßnahme allein ist jedoch nicht ausreichend, da sich bei gleich bleibend hoher Feuchtigkeit in Abwesenheit der Algen Bakterien und Schimmelpilze weiter ausbreiten würden und auch diese erhebliche Schäden an der Malerei verursachen könnten. Daher ist die gleichzeitige Reduktion der Feuchtigkeit in der Grotte erforderlich, um die mikrobiologische Besiedlung langfristig zu unterdrücken.

KATJA STERFLINGER

4. Raumklimatische Untersuchungen

4.1 EINLEITUNG

Die Bedeutung des Raumklimas der Paulusgrotte im Wandel der Jahreszeiten für die Erhaltung der Wandmalereien war seit Beginn der Arbeiten unumstritten. Zunächst hatte ein mehrjähriges Messprogramm in den Jahren 2000 und 2005 lediglich die Aufzeichnung von Temperatur und Luftfeuchte im Grottenraum in regelmäßigen Intervallen zum Inhalt. Erst im September 2005 wurde dann ein wesentlich erweitertes und technisch verbessertes Messsystem installiert, das fachgerecht betrieben und gewartet wird.

4.2 DAS KLIMA IM JAHRESVERLAUF: MESSZEITRAUM 2000–2002

Im ersten Messprogramm konnte die Funktionstüchtigkeit von Sensoren und Loggern im Jahresverlauf nicht kontrolliert werden, wodurch eine Reihe von Ausfällen zu verzeichnen war. So konnten nur für den Zeitraum 2000 bis 2002 zwei vollständige Jahresgänge registriert werden, die für die beiden Winterhalbjahre zwei unterschiedliche Wettersituationen widerspiegeln, die weiter unten diskutiert werden. In seinen Grundzügen ist der jahreszeitliche Klimaverlauf in der Grotte folgendermaßen zu charakterisieren:

Im Sommerhalbjahr, das stets durch das Fehlen von Niederschlägen bei jedoch häufig hoher Luftfeuchte charakterisiert ist, oszillierte die Raumfeuchte stark, erreichte aber kaum Sättigungswerte von 100 % rF. Dennoch wurde häufig Kondenswasserbildung an den Grottenwänden beobachtet, offensichtlich eine Folge der verhältnismäßig tieferen Temperaturen der Wandflächen.

Das Winterhalbjahr im Raum Selçuk weist von Jahr zu Jahr unterschiedliche Klimaverläufe auf, vor allem was den Zeitpunkt des Einsetzens und die Menge der Niederschläge betrifft. Im Winter wurde die Grotte nie besucht, sodass die gemessenen Klimawerte den einzigen Anhaltspunkt liefern. Demnach verlief der Winter im ersten Messjahr (2000/01) deutlich trockener, mit einer Periode vermehrter Feuchtezyklen erst ab Anfang März 2001. Nach heutigem Wissensstand waren in jenem Winter keine nennenswerten Mengen von Wasser infiltriert, offenbar aufgrund geringer Niederschlagsmengen. Das folgende Winterhalbjahr war hingegen in einem langen Zeitraum, von Mitte Dezember 2001 bis April 2002, durch sehr hohe Luftfeuchten im Grottenraum charakterisiert. Der Schluss liegt nahe, dass es in jenem Winter aufgrund vermehrter Niederschläge zu starken Wasserinfiltrationen in die Grotte gekommen war, die Pfützen bildeten und über Monate hinaus die Luft mit Feuchte gesättigt hielten.

4.3 DAS KLIMA IM JAHRESVERLAUF: MESSZEITRAUM AB 2005

Das im Jahr 2005 gestartete erweiterte Messprogramm besteht aus einer größeren Zahl von Komponenten⁴⁸, deren Anordnung in Abb. 36 schematisch

⁴⁸ Zur Messung von Temperatur (T) und relativer Luftfeuchte (RF) innen und außen wurden mehrere Messfühler Rotronic Hygroclip S im Grottenraum sowie vor dem Eingang installiert. Zur Registrierung von Kondensationsereignissen an den Grottenwänden dienen an den Wandflächen angebrachte Temperaturfühler. Parallel dazu wird auch eine Direktmessung der Feuchte Kondensation mit einem kleinen Widerstandssensor der Marke Hygrosens SHS A2 durchgeführt. Zusätzlich ist ein Messfühler der Marke Campbell CS 616 am Grottenboden platziert, um Wasser zu detektieren, das von den Grottenwänden abrinnt. Alle

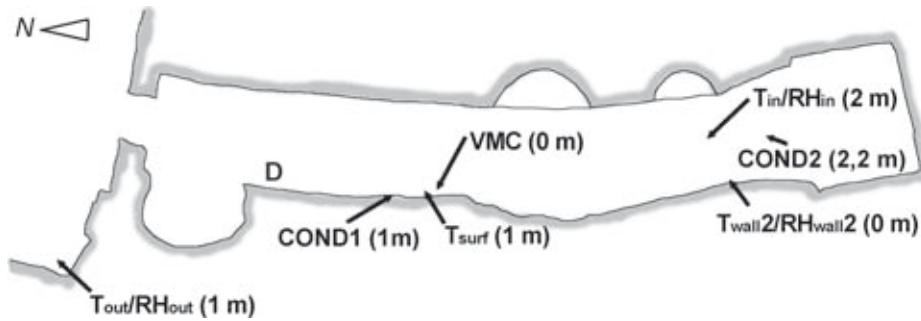


Abb. 36: Anordnung des im September 2005 installierten Messsystems zur Erfassung von Klimaparametern: Datalogger (D), Sensor für Temperatur (T_{out}) und relative Luftfeuchte (RH_{out}) außen, Sensor für Temperatur (T_{in}) and relative Luftfeuchte (RH_{in}) innen, Sensoren zur Feststellung von Oberflächenkondensation (COND1) bzw. Infiltration (COND2), Sensor für Oberflächentemperatur nahe dem Eingang (T_{surf}), Sensor für Temperatur und relative Luftfeuchte nahe der Wände im Grotteninneren (T_{surf2} und RH_{surf2}), Sensor für den Feuchtegehalt im Erdreich des Bodens (VMC).

dargestellt ist. Die Zielsetzungen dieser Studie, die sich unter den gegebenen technischen Bedingungen am internationalen Stand der Technik⁴⁹ orientiert, umfasst folgende Punkte:

- Erkennung aller Vorgänge, die den Feuchtehaushalt im Grottenraum bestimmen, und der wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen ihnen;
- Abschätzung der Wassermengen, die über den Weg der Kondensation in die Grotte gelangen;
- Bewertung der Möglichkeiten natürlicher Ventilierung zur Verbesserung der raumklimatischen Verhältnisse;
- Erfassung der Perioden mit besonders hoher Feuchtebelastung der Wände;
- Erfassung der für mikrobiologischen Befall besonders kritischen Perioden;

Sensoren wurden an einen Campbell CR 10XDatenlogger mit einer Speicherkapazität von 2 MB angeschlossen, der auf stündliche Signalspeicherung programmiert ist. Die Stromversorgung des gesamten Systems erfolgt über ein 10 W Solarpanel, das auf einem 4,5 m hohen Mast im Freien nahe dem Grotteneingang montiert wurde.

⁴⁹ In diesem Zusammenhang sind zwei ähnlich gelagerte, konservierungswissenschaftliche Fallstudien zu nennen: Abblätternde Malereien und mikrobiologische Verwitterung der romanischen, bemalten Holzdecke von Zillis, Schweiz, wo umfangreiche raumklimatische Studien den Zusammenhang beider Schadensformen mit mikroklimatischen Kenngrößen nachwiesen. Das Abblättern der Malschicht wurde als Folge starker Schwankungen der relativen Luftfeuchte erkannt, während der Befall in Zusammenhang mit den hohen Durchschnittswerten stand. Beide Prozesse konnten durch den Einbau automatischer Türschließ- und Luftaustauschsysteme eingeschränkt werden, die durch die Messwertgradienten zwischen außen und innen gesteuert werden. Diese Lösung folgte den Prinzipien minimaler Eingriffe und passiver Konservierung: A. ARNOLD – CHR. BLÄUER-BÖHM – H. DOMEISEN – K. ZEHNDER, Climate Control for the passive conservation of the Romanesque painted wooden ceiling in the church of Cillis, Switzerland. *Studies in Conservation* 46. London 2001, 251–268. Der zweite Fall betraf die Buddhistische Tempelanlage der Mogao Grotten, die aus 492 ausgemalten Höhlen besteht. Hier bewies das Messprogramm, dass die Hauptursache von mikrobiologischem Befall und Malschichtverlust in den zunehmenden Besucherzahlen bestand. In der Folge wurden die Zutrittsgenehmigungen beschränkt und der Besucherstrom gleichmäßiger verteilt sowie in der feuchten Jahreszeit soweit reduziert, dass der Luftaustausch gering gehalten werden konnte: S. MAEKAWA, Preventive strategies for reducing the impact of visitors on the microenvironment of caves at the Mogao Grottoes. In: R. Ashok – P. Smith (eds.), *Preventive conservation: practice, theory and research. Preprints of the contributions to the Ottawa Congress*, 12–16 September 1994. The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. London 1994, 76–79. Weitere wichtige Literatur zum Thema: D. CAMUFFO, *Microclimate for Cultural Heritage*. Series "Developments in Atmospheric Science" 23. Elsevier Science B.V. Amsterdam 1998.

- Bewertung der Wirksamkeit bisher getätigter Maßnahmen zur Veränderung des Raumklimas.

Die beiden Messgrößen: Temperatur und relative Luftfeuchte stellen zwar die wichtigsten Parameter für die Beurteilung von mikrobiologischem Bewuchs und Salzkristallisation dar, reichen aber für sich nicht aus, den Feuchtaustausch zwischen dem Raum und der Umgebung zu erfassen. Zur Beschreibung diesbezüglicher Vorgänge wird gewöhnlich das so genannte Mischungsverhältnis (MR) verwendet⁵⁰.

4.4. MESSERGEBNISSE

Die bislang vollständig ausgewertete, nahezu einjährige Messreihe in der Grotte⁵¹ zeigt einen Klimaverlauf, wie er charakteristisch für Räume mit hoher thermischer Trägheit und wirksamem natürlichen Luftaustausch ist. Im Messzeitraum 1. Oktober 2005 bis 7. September 2006 lagen die Raumtemperaturen (T_{in}) nahe den Oberflächentemperaturen der Grottenwände (T_{wall}) und änderten sich nur langsam innerhalb der Grenzen von 10 °C und 20 °C, während Außentemperaturen (T_{out}) zwischen 0 °C und 32 °C registriert wurden. Die relative Luftfeuchte im Grottenraum (RH_{in}) bewegte sich im entsprechenden Zeitraum zwischen 40 % und 97 % rF, in der wandnahen Luftschicht (RH_{wall}) hingegen zwischen 35 % und 100 % rF; im Freien wurden Relativfeuchten (RH_{out}) von 35 % bis 95 % rF gemessen. Abb. 37 zeigt den Verlauf des Raumklimas für

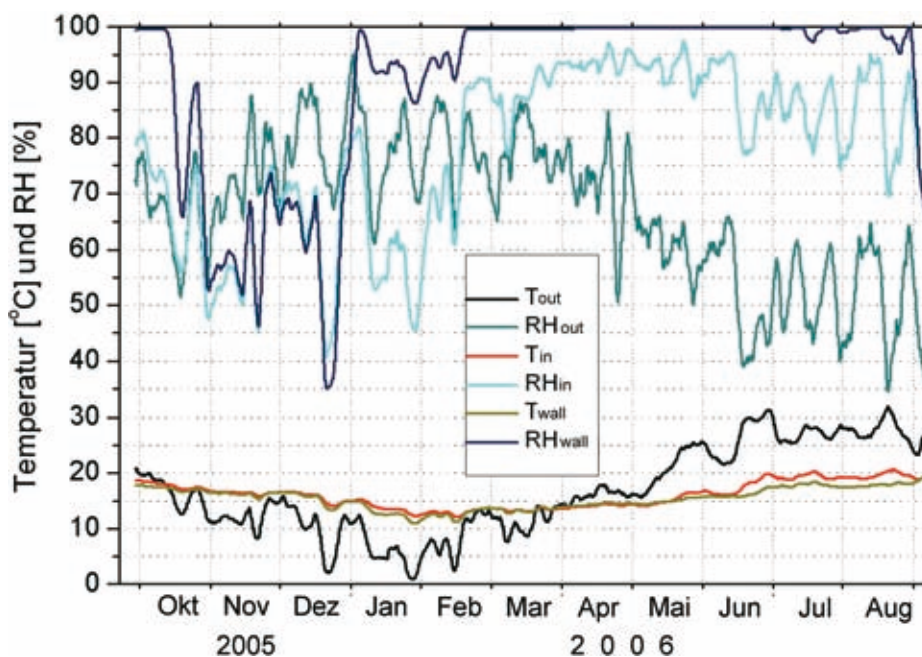


Abb. 37: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte in der Paulusgrotte für den Messzeitraum 1. 10. 2005–7. 9. 2006: außen, innen und in Wandnähe innen; gleitender 4-Tages-Durchschnitt.

⁵⁰ Ähnlich der absoluten Feuchte gibt das Mischungsverhältnis MR die Masse an Wasser pro kg trockener Luft an. Mit Hilfe der Magnus-Formel kann das Mischungsverhältnis aus den Luftkennwerten T und RF leicht berechnet werden: $MR = 37.95/1000 \cdot RF \cdot 10^{[(7.5 \cdot T)/(237.3 + T)]}$.

⁵¹ Infolge einer mutwilligen Beschädigung von Systemkomponenten im September 2006, deren Folgen erst bei der darauf folgenden Wartung im Sommer 2007 entdeckt wurden, erwiesen sich einige der Messwerte für den entsprechenden Zeitraum als unbrauchbar.

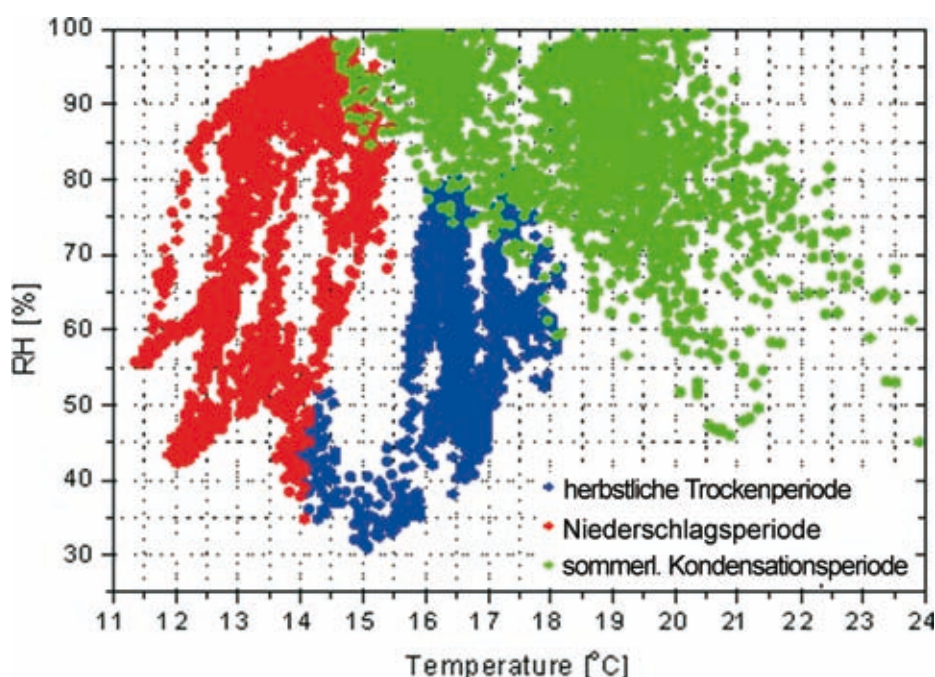


Abb. 38: Klimadaten für den Grottenraum im Feld T-rF für den Messzeitraum 1. 10. 2005–7. 9. 2006, unterschieden nach den drei jahreszeitlichen Klimaperioden.

die Zeit zwischen 1. Oktober 2005 und 7. September 2006. Zur Vereinfachung liegt dem Kurvenverlauf ein gleitender Durchschnitt über vier Tage zugrunde.

Bei erster Betrachtung lassen sich drei jahreszeitliche Perioden mit unterschiedlichem Raumklima erkennen, nämlich die Trockenperiode von Oktober bis Januar, gefolgt von der Niederschlagsperiode mit Wasserinfiltration zwischen Januar und Mai, und schließlich die von Kondensationsereignissen geprägte Sommerperiode von Mai bis Oktober. Das Raumklima in der Grotte ist in diesen drei Perioden signifikant verschieden (Abb. 38).

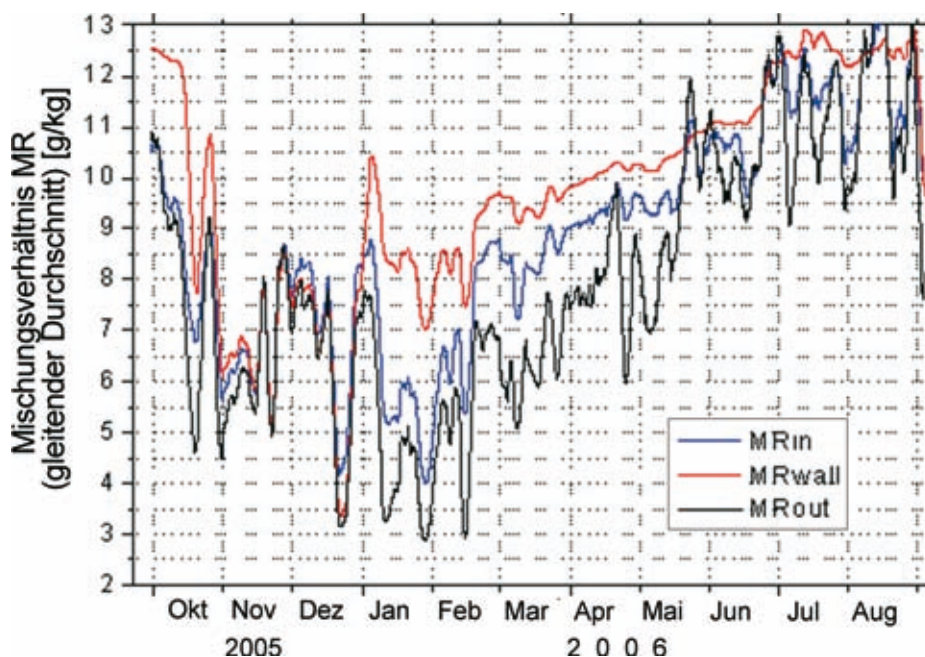


Abb. 39: Verlauf des Mischungsverhältnisses – ein Maß für die absolute Luftfeuchte – in der Paulusgrotte für den Messzeitraum 1. 10. 2005–7. 9. 2006: außen, innen und in Wandnähe innen; gleitender 4-Tages-Durchschnitt.

Die beschriebene Situation wird besonders deutlich, wenn man die als Mischungsverhältnisse ausgedrückten Absolutfeuchten miteinander vergleicht (Abb. 39). Während der herbstlichen Trockenzeit liegen die Mischungsverhältnisse von Außenluft (MR_{out}), Raumvolumen (MR_{in}) und wandnahe Luftschicht (MR_{wall}) nahe beieinander. Dies weist darauf hin, dass das Feuchteangebot in der Raumluft vom jeweiligen Außenklima gesteuert wird. Bei etwa 70 % rF kommt es hier zu keiner Wasserkondensatbildung auf den Wandflächen.

In der Niederschlagsperiode hingegen liegt MR_{out} unter MR_{in} und MR_{wall} , was das Vorliegen einer zusätzlichen Feuchtequelle im Inneren erkennen lässt. Auch andere Beobachtungen belegen, dass in diesem Zeitraum Wasser durch den Felsen in den Grottenraum infiltriert war. Abb. 40 zeigt die Zonen sichtbaren Feuchteintrags auf der Grottendecke während der Niederschlagsperiode. Diese Entwicklung begann im Jahr 2006 gegen Mitte Februar und dauerte bis Mitte Mai und führte letztendlich zur Bildung von Pfützen auf dem Boden. Der damit verbundene Anstieg von Porenwasser im Erdreich des Bodens wurde vom zuständigen Sensor registriert (Abb. 41). Wie aus der Graphik ablesbar

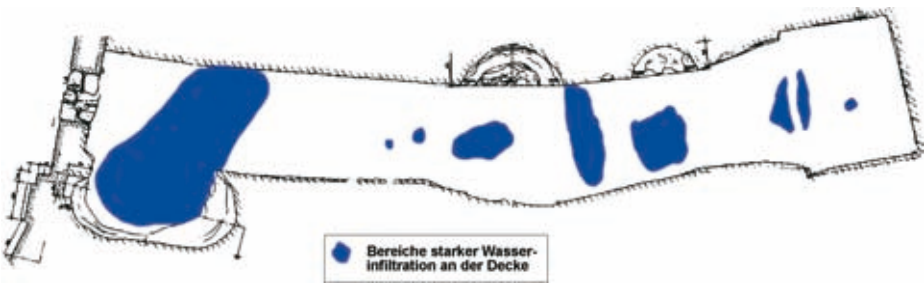


Abb. 40: Skizze der Zonen mit sichtbaren Feuchteflecken bzw. Tropfenbildung auf der Grottendecke in der Niederschlagsperiode (März 2006).

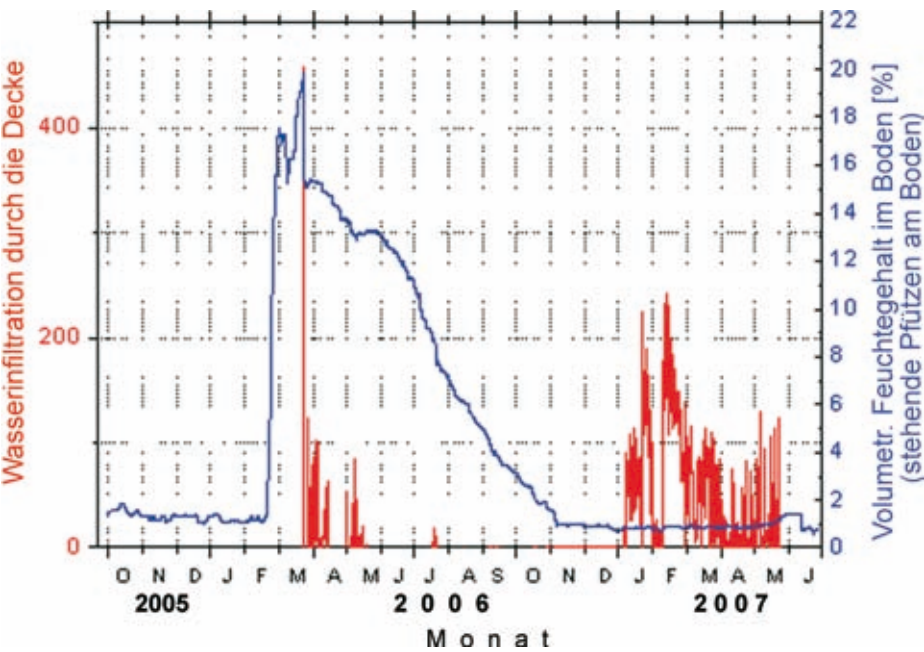


Abb. 41: Gemessene Wasserinfiltration durch die Grottendecke (Sensor COND2) und Pfützenbildung am Boden (Sensor VMC) im Messzeitraum Okt. 2005 bis Juni 2007. Im Jahr 2006 war relativ mehr Wasser eingesickert als im Jahr 2007; dementsprechend war in jenem Jahr der Grottenboden bis in den Herbst hinein feucht, während sich im darauf folgenden Jahr keine Pfützen gebildet haben. Es ist zu beachten, dass der Sensor COND2 erst im März 2006 installiert wurde.

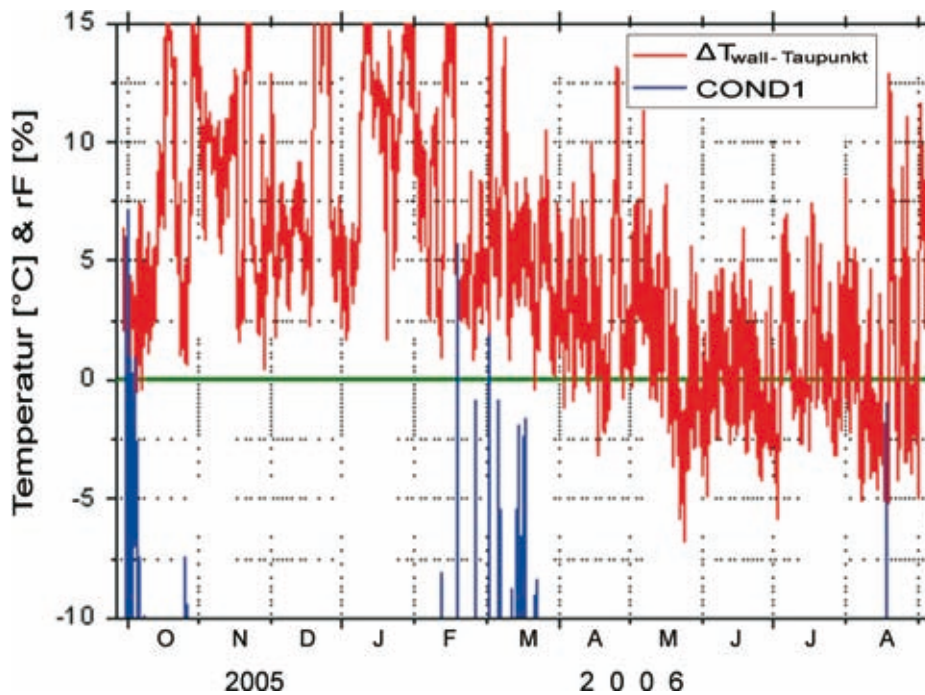


Abb. 42: Berechnete Taupunktunterschreitungen und gemessene Kondensationsereignisse in der Paulusgrotte für den Messzeitraum 1. 10. 2005–7. 9. 2006.

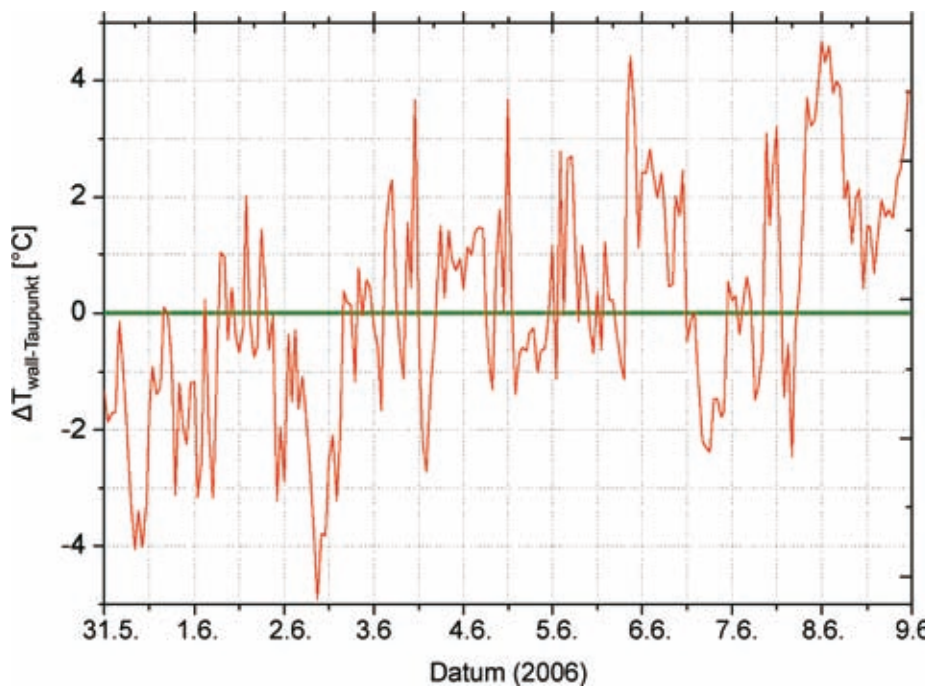


Abb. 43: Berechnete Taupunktunterschreitungen an der westlichen Grottenwand, nahe der Paulusszene, für eine Messperiode mit sommerlichen Kondensationszyklen.

ist, waren im Messjahr 2007 ebenfalls zwischen Januar und Mai Infiltrationen zu verzeichnen, die aber diesmal nicht intensiv genug waren, um Pfützen entstehen zu lassen. Das Wettergeschehen unterscheidet sich also besonders im Spätwinter und Frühling von Jahr zu Jahr, was sich übrigens auch am unterschiedlich intensiven Pilz- und Algenbefall ablesen ließ.

In der dritten, sommerlichen Periode, die im Mai einsetzte, schwankten MR_{in} und MR_{wall} um den Wert von MR_{out} . Bei hoher Absolutfeuchte trat auf den

unterkühlten Wandflächen Kondenswasserbildung auf. Abb. 42 und 43 lassen die Kondensationsereignisse erkennen, bei denen die vom Sensor $T_{\text{surf}2}$ registrierte Wandtemperatur unter der berechneten Taupunkttemperatur der Raumluft lag. Danach war für die Sommerperiode mit häufiger Kondensatbildung zu rechnen, was auch vom Sensor COND1, der nahe der Paulusszene an der Westwand platziert war, registriert wurde.⁵²

Nach einer groben Berechnung kondensieren an heißen Sommertagen bis zu 0,6 l Wasser pro Stunde an den Grottenwänden; für die gesamte Periode April bis September 2006 ergeben sich mehr als 200 l an Kondenswasser. Im Tages- und Wochenverlauf unterliegt die Kondensation keinem regelmäßigen Rhythmus, ist also von der jeweiligen Wetterlage mit ihrer spezifischen Luftfeuchte abhängig.

4.5 LUFTAUSTAUSCH

In Ergänzung zu den langfristigen Klimamessungen wurden im September 2005 verschiedene Versuche durchgeführt, die dazu dienten, den Luftaustausch bei Verschluss bzw. Öffnung des Eingangs bzw. des damals installiert gewesenen Entlüftungsrohres zu bestimmen. Die Luftaustauschrate gibt die Zeit an, die für den einmaligen Luftwechsel des gesamten Raumvolumens nötig ist, wobei als Maß die invertierte Zeit verwendet wird [1/h]⁵³. Die Luftaustauschrate wurde durch Messungen des Konzentrationsabfalls eines Tracergases, CO_2 , gemessen, das durch Verbrennung im Grottenraum erzeugt wurde⁵⁴.

Wenige Minuten nach Beendigung der Gasentwicklung war die Konzentration des Tracergases bereits über den gesamten Raum gleich hoch und begann in der Folge durch Austausch mit der Außenluft abzusinken. Die Konzentrationskurven für verschiedene Versuchsanordnungen sind in Abb. 44 dargestellt, wo auch die Zeiträume für einen vollständigen Luftaustausch angegeben sind. Es ist ersichtlich, dass sich unter den Normalbedingungen des mit Gitternetz versehenen Eingangs das Luftvolumen der Grotte innerhalb von 0,6 h = 36 min erneuert. Es ist weiters interessant, dass diese natürliche Luftzirkulation durch das Entlüftungsrohr nur wenig verbessert wurde. Wenn der Eingang hingegen durch Plastikfolien über dem Gitternetz abgedichtet wird, sinkt die Austauschrate um ein 40-faches.

Im Rahmen eines weiteren Versuchs wurden bei hermetischem Verschließen der Eingangsöffnung alle 30 Sekunden Temperatur und relative Luftfeuchte gemessen und das Mischungsverhältnis wie oben beschrieben berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 45 dargestellt. Man kann erkennen, dass der Feuchtegehalt der Luft ansteigt, was nur durch Verdunstung an den Grottenwänden zu erklären ist. Aus der Regressionskurve, die den steigenden Feuchtegehalt

⁵² Die Abweichungen im Kurvenverlauf von Abb. 39 zwischen den theoretisch berechneten Ereignissen und den tatsächlich gemessenen sind auf die unterschiedlichen Positionen der beiden Sensoren zurückzuführen.

⁵³ Dabei werden die Messergebnisse durch eine Exponentialkurve der folgenden Form beschrieben: $C = A \cdot \exp(t \cdot V) + C_0$ (mit C als Konzentration des Tracergases, A der Anfangskonzentration, C_0 der Gleichgewichtskonzentration, t der Zeit in Stunden und V der Austauschrate in [1/h]). Im gegenständlichen Beitrag wird jedoch eine leichter verständliche Kenngröße verwendet, und zwar die Zeitdauer $t_0 = 1/V$ [h], in der sich das gesamte Luftvolumen des Grottenraums erneuert.

⁵⁴ Im hier vorgestellten Fall wurde als Tracergas CO_2 eingesetzt, das aus kurzzeitigem Betrieb eines Propan-Butan-Brenners im Stirnraum erzeugt wurde. Zur Messung der CO_2 -Konzentration in der Raumluft diente ein IGM-0171 Sensor von LAB-EL.

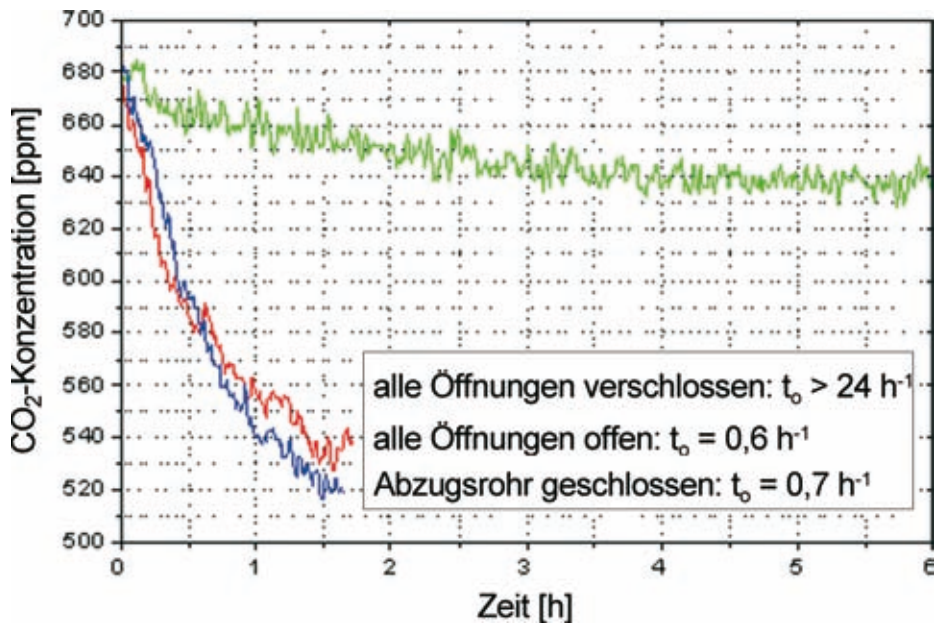


Abb. 44: Zeitlicher Verlauf der Abnahme des Tracergases (CO₂) unter verschiedenen Lüftungsbedingungen.

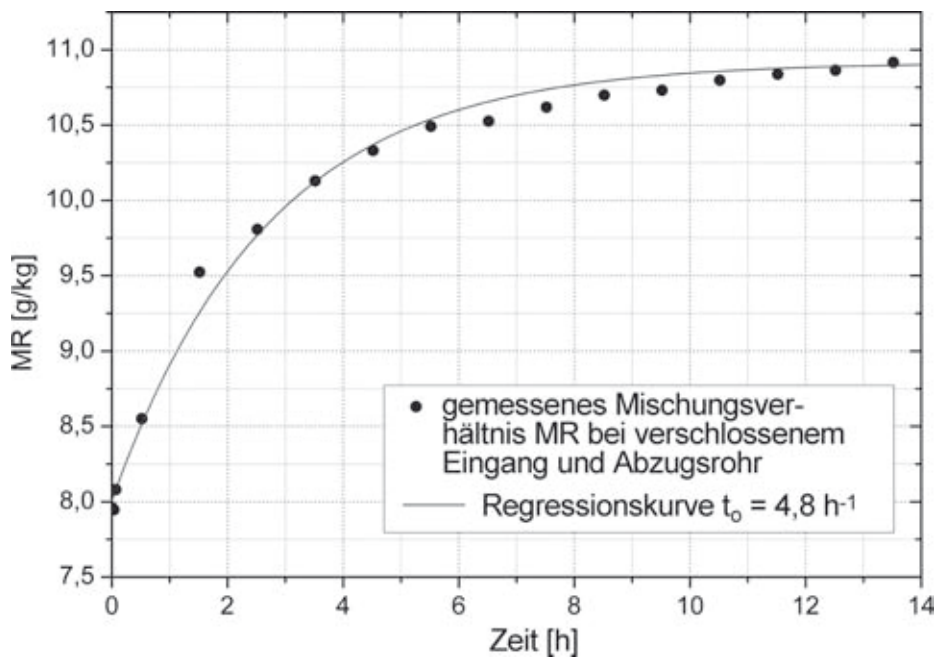


Abb. 45: Anstieg der Absolutfeuchte in der Paulusgrotte bei hermetisch verschlossenen Raumöffnungen, ausgedrückt als Mischungsverhältnis; aus der Regressionskurve lässt sich berechnen, dass unter diesen Bedingungen eine weitgehende Sättigung mit Wasserdampf nach 4,8 Stunden erreicht ist.

beschreibt, wurde eine Verdunstungsrate von $4,8 \text{ h}^{-1}$ berechnet, d. h. nach 4,8 Stunden ist die Luft annähernd feuchtegesättigt, wenn der Luftaustausch mit außen unterbunden wird. Daraus kann man erkennen, dass die Verdunstung von Wasser aus den Grottenwänden wesentlich langsamer vor sich geht als der Luftaustausch unter Normalbedingungen. Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass die bestehende natürliche Luftzirkulation einen wichtigen Mechanismus zur Trocknung der Grotte und damit ein mögliches Werkzeug zur Steuerung des Raumklimas darstellt.

4.6 DISKUSSION UND AUSBLICK

Da die Auswirkungen des Raumklimas auf das Wachstum von Mikroorganismen mit Sicherheit den wichtigsten Aspekt darstellen, soll an dieser Stelle diskutiert werden, mit welchen Wechselwirkungen zu rechnen ist.

Die Aktivität der Algen und Cyanobakterien wird in erster Linie von der Feuchtigkeit in der Wand und nahe der Wandoberfläche bestimmt. Wird im wandnahen Bereich eine Relativfeuchte von mehr als 98 % erreicht und bildet sich an der Wand Kondensat, ist die Wasserverfügbarkeit für die Aktivität der Algen und phototrophen Bakterien ausreichend. Daher kommt es in erster Linie in der Kondensationsperiode zum Wachstum von Algen und Bakterien. Die trockene Herbstperiode mit Luftfeuchten unter 80 % rF ist für das Wachstum nicht ausreichend. Diese Phase können insbesondere die Cyanobakterien durch ein Ruhestadium überdauern, um bei Anstieg der Feuchtigkeit innerhalb von wenigen Minuten erneut aktiv zu werden und weiter zu wachsen. Die Temperatur im Bereich zwischen 10 und 20 °C hat geringfügig Einfluss auf die Wachstumsgeschwindigkeit. Die in der Paulusgrotte vorkommenden Organismen sind als mesophil einzustufen, das heißt, ihr Temperaturoptimum liegt im Bereich von 20 °C bis 45 °C, so dass bei niedrigeren Temperaturen das Wachstum verlangsamt ist.

Für die in der Grotte vorkommenden Pilze gelten hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit andere Kardinalwerte. Für Schimmelpilze reicht eine Luftfeuchtigkeit von > 70 % rF, so dass angenommen werden muss, dass das Wachstum von Pilzen auch während der Niederschlagsperiode und – bei Erreichen von Spitzen über 70 % rF – auch in der Herbstperiode möglich ist.

Auch wenn zum gegenwärtigen Zeitpunkt das Klimamessprogramm noch nicht abgeschlossen ist, liegt dennoch schon ein Großteil derjenigen Erkenntnisse vor, die als Basis für die Ausarbeitung von Lösungsansätzen dienen⁵⁵.

Das vorrangige Problem des Sommers ist die Kondenswasserbildung, die üblicherweise kurzzeitig an Vormittagen auftritt, wenn die Außenluft besonders feucht ist. Gegen Mittag sinkt die Luftfeuchtigkeit signifikant, jedoch dauert es dann noch einige Stunden, bis die feuchten Wände wieder trocknen. In einigen Sommerperioden mit etwas höherer Luftfeuchte kann es dazu kommen, dass die Grottenwände ganztägig feucht bleiben, weil die Verdunstungsrate am Nachmittag und Abend zur Trocknung nicht ausreicht.

Zur Vermeidung solcher Kondensationsereignisse würde ein System dienen, das bei Überschreitung einer kritischen Luftfeuchte im Außenbereich einen temporären Verschluss des Höhleneingangs in Gang setzt. Dieser müsste bei sinkender Luftfeuchte möglichst rasch wieder geöffnet werden, um die notwendige Luftzirkulation wieder herzustellen. Ein derartiger Schließmechanismus würde somit vom jeweiligen Differenzbetrag der Absolutfeuchte außeninnen, berechnet aus den von Sensoren gelieferten Temperatur- und Relativfeuchtwerten, gesteuert werden. Wann immer das Mischungsverhältnis in der Außenluft höher als im Grotteninneren ist, würde der Verschluss des Eingangs einen Feuchtetransport in den Raum und damit Kondenswasserbildung verhindern. Wie aus dem in Abb. 45 dargestellten Versuch ersichtlich,

⁵⁵ Die hier skizzierten Möglichkeiten zur Verbesserung der raumklimatischen Situation in der Paulusgrotte werden nach Abschluss der Untersuchungen zu einem Konzept ausgearbeitet werden, das natürlich die Grenzen der technischen Möglichkeiten zu berücksichtigen haben wird. In jedem Fall wird man davon ausgehen müssen, dass das Problem des Raumklimas nicht vollständig in den Griff zu bekommen sein wird.

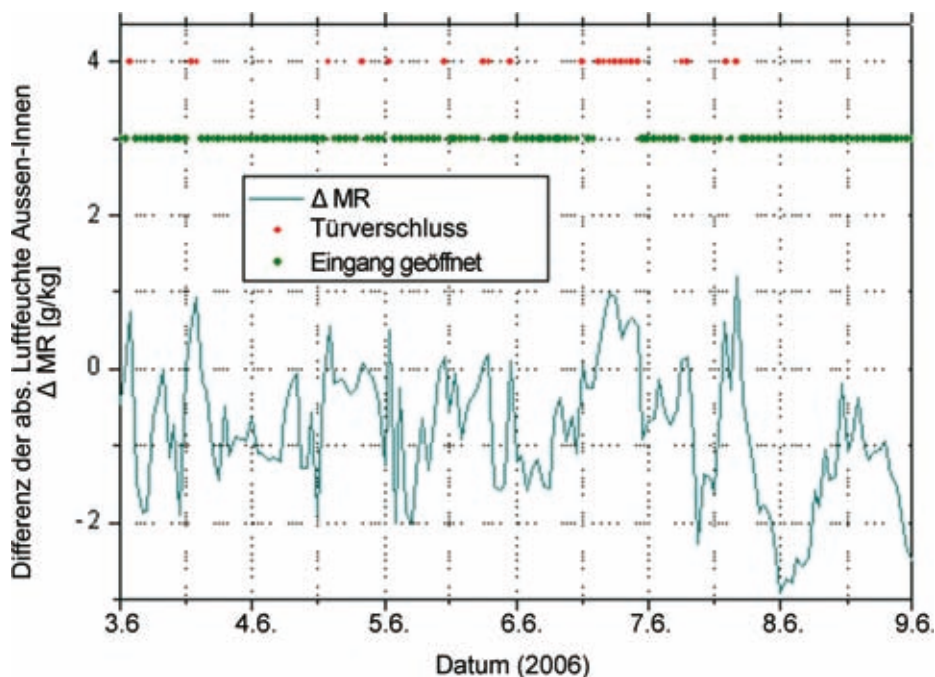


Abb. 46: Phasen eines notwendigen Türverschlusses in einer sommerlichen Kondensationsperiode am Beispiel der in Abb. 41 dargestellten Klimasituation.

wäre damit allerdings ein Anstieg der Luftfeuchte im Grottenraum verbunden. Abb. 46 zeigt, wie der Verschluss in einer charakteristischen Sommerperiode aktiviert werden müsste.

In der Trockenperiode würde die automatische Eingangstür offen bleiben.

Das Risiko in der Niederschlagsperiode bildet hingegen das Einsickern von Wasser durch die Felswände. Alle Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Wege des eindringenden Wassers seit jeher dieselben sind, da sie der vorgegebenen Gesteinsklüftung folgen. Auch wenn es keine realistische Möglichkeit geben dürfte, dieses Phänomen zu verhindern, so kann man doch die Folgewirkungen herabmindern: zur Zeit sammelt sich das eingedrungene Wasser in Form von Pfützen auf dem Grottenboden, die nur langsam trocknen (vgl. Abb. 41) und über geraume Zeit zur hohen Luftfeuchte im Raum beitragen. Es wäre naheliegend, die betreffenden Stellen mit einem Absorbermedium zu belegen, das dann im Zuge einer jährlichen Wartung im Sommer nach außen geschafft und getrocknet werden müsste.

ŁUKASZ BRATASZ - JOHANNES WEBER -
KATJA STERFLINGER

Abkürzungen

Bant	Schriften der Balkan-Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, antiquarische Abteilung
JbAC	Jahrbuch für Antike und Christentum
MiChA	Mitteilungen zur Christlichen Archäologie

Vorgelegt vom Verfasser
in der Sitzung am 14. März 2008