

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Institut für Geologie

Studiengang Geologie



Diplomkartierung

Geologische Kartierung des Troia-Rückens im

Maßstab 1:10000

vorgelegt von

cand.-geol. Katrin Bergmann

und

cand.-geol. Pia Lippmann

betreut von

Prof. Dr. Broder Merkel

und

Dr. Christian Wolkersdorfer

TU Bergakademie Freiberg

Institut für Geologie

Lehrstuhl für Hydrogeologie

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, daß ich die vorliegende Diplomkartierung und Diplomarbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Diplomkartierung wurde als Gruppenarbeit angefertigt und die Beiträge des Einzelnen sind durch Angabe von Initialen gekennzeichnet, wobei KB für Katrin Bergmann und PL für Pia Lippmann steht.

Freiberg, Juli 2003

DIPLOMKARTIERUNG

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | VORWORT | 5 |
| 1.1 | Einleitung (KB) | 5 |
| 1.2 | Danksagung (KB, PL) | 7 |
| 2 | ZUSAMMENFASSUNG (KB, PL) | 8 |
| 3 | GEOLOGIE | 9 |
| 3.1 | Geologie der Biga-Halbinsel (PL) | 9 |
| 3.2 | Tektonik (PL) | 10 |
| 3.3 | Orogenesen (PL) | 12 |
| 3.4 | Vulkanismus (PL) | 14 |
| 3.5 | Entwicklungen im Tertiär und Quartär (PL) | 15 |
| 4 | DAS KARTIERGEBIET | 16 |
| 4.1 | Beschreibung des Kartiergebietes (PL) | 16 |
| 4.2 | Klima (KB) | 18 |
| 4.3 | Flora/Fauna (PL) | 19 |
| 4.4 | Historische Stätte Troia (PL, KB) | 20 |
| 4.4.1 | Siedlungsgeschichte von Troia | 20 |
| 4.4.2 | Geschichte der Ausgrabungen | 22 |
| 4.5 | Geomorphologie (PL) | 23 |
| 4.6 | Ausbildung des Neogens (KB) | 25 |
| 4.7 | Entwicklung des Gebietes im Tertiär und Quartär (PL) | 28 |
| 4.8 | Tektonik und Lagerungsverhältnisse (KB) | 30 |
| 4.9 | Hydrogeologische Verhältnisse (KB) | 33 |
| 5 | AUFSCHLUSSDOKUMENTATION | 34 |
| 5.1 | Geländearbeit (KB) | 34 |
| 5.2 | Aufschlüsse (KB) | 36 |
| 5.3 | Probenstücke (KB) | 37 |

DIPLOMARBEIT

| | | |
|----------|---|------------------|
| 6 | ZIELSTELLUNG | 41 |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG/ SUMMARY | 42 43 |
| 8 | DIE QUELLHÖHLE | 44 |
| 8.1 | Der Name KASKAL.KUR | 44 |
| 8.2 | Beschreibung der Höhle | 46 |
| 8.3 | Volumen | 53 |
| 8.4 | Sinter und Wasserstandsmarken | 55 |
| 8.5 | Römisches Aquäduktsystem | 57 |
| 9 | SEDIMENTOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN | 59 |
| 9.1 | Schichtenbeschreibung | 59 |
| 9.2 | Korngrößenanalyse | 66 |
| 9.2.1 | Theoretische Grundlagen | 66 |
| 9.2.2 | Durchführung | 68 |
| 9.2.3 | Ergebnisse der Korngrößenanalysen | 70 |
| 9.2.4 | Durchlässigkeitsbeiwert | 71 |
| 9.2.5 | Ablagerungsmilieu / Fazies | 74 |
| 9.3 | Mikroskopische Untersuchungen | 79 |
| 9.3.1 | Dünnschliffbeschreibung | 79 |
| 9.3.2 | Kornbeschreibung der Siebanalysen | 83 |
| 9.4 | Röntgendiffraktometrie | 89 |
| 9.4.1 | Theoretische Grundlagen | 89 |
| 9.4.2 | Durchführung | 91 |
| 9.4.3 | Eigenschaften und Genese der nachgewiesener Schichtsilikate | 93 |
| 9.4.4 | Ergebnisse | 96 |
| 9.4.5 | Interpretation der Ergebnisse | 99 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10 | HYDROGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE | 101 |
| 10.1 | Grundwasser | 101 |
| 10.2 | Schüttungen | 103 |
| 10.3 | Grundwasserabstrom | 109 |
| 10.4 | Wassertemperaturen | 110 |
| 10.5 | Potentielle Grundwasserleiter | 114 |
| 10.6 | Physikochemische Parameter des Wassers | 117 |
| 10.6.1 | Theoretische Grundlagen | 117 |
| 10.6.2 | Ergebnisse | 119 |
| 10.6.3 | Interpretation der Ergebnisse | 120 |
| 11 | QANATSYSTEME | 121 |
| 11.1 | Allgemeines | 122 |
| 11.2 | Aufbau | 122 |
| 11.4 | Kosten und Aufwand | 124 |
| 11.5 | Vorteile/Nachteile | 125 |
| 11.6 | Die Quelhöhle als Qanatsystem? | 126 |
| 12 | HISTORISCH-ARCHÄOLOGISCHE BEDEUTUNG | 128 |
| 13 | SCHLUSSFOLGERUNGEN | 132 |
| 14 | VERZEICHNISSE | 135 |
| 14.1 | Literatur | 135 |
| 14.2 | Abbildungen | 141 |
| 14.3 | Tabellen | 142 |

1 VORWORT

1.1 Einleitung (KB)

Der Historische Nationalpark Troia im Nordwesten Anatoliens umfaßt eine Fläche von 250 km². Dabei nimmt das Kartiergebiet eine ca. 50 km² große Fläche im Norden des Nationalparks um das Ausgrabungsgelände von Troia ein. Çanakkale befindet sich ca. 25 km nordöstlich und Izmir ca. 300 km südlich davon.

1871 entdeckte Heinrich Schliemann das antike Troia; Anfang und Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die Ausgrabungen unter Wilhelm Dörpfeld (1894) und Carl W. BLEGEN (1932-1938) weitergeführt. Nach mehrjähriger Unterbrechung nahm ein internationales Forscherteam unter Leitung von Manfred Korfmann von der Eberhard-Karls-Universität Tübingen die Arbeiten 1988 wieder auf. Die Besiedlung des Hissarlık begann bereits in der Frühbronzezeit (ca. 3000 v.u.Z.). Im Laufe der Zeit wurden die Siedlungen auf dem Hissarlık mehrmals zerstört und wieder errichtet, wobei die einzelnen Schichten übereinander gebaut wurden, was diesen Ort archäologisch so interessant macht.

Im Zusammenhang mit den archäologischen Forschungen ergab sich die Fragestellung nach der historischen Wasserversorgung Troias. Ziel der vorliegenden geologischen Kartierung und der zwei angeschlossenen Diplomarbeiten mit hydrogeologischem Schwerpunkt ist, das Gelände und die heutigen Siedlungen um den Hissarlık hinsichtlich der natürlichen Wasservorkommen zu untersuchen. Dabei sollten Rückschlüsse auf die historische Versorgung der Bewohner Troias mit Wasser möglich sein.

Dazu führten Pia Lippmann und Katrin Bergmann, in Zusammenarbeit mit dem türkischen Geomorphologen Ilhan Kayan und seinen Mitarbeitern von der Ege Universität Izmir, von Juli bis August 2002 eine geologische Kartierung des Gebietes um den Siedlungshügel Hissarlık durch. Vor Ort wurde das Projekt durch ein internationales Archäologenteam unter der Leitung von Manfred KORFMANN unterstützt. Dabei wurden die neogenen Sedimente des Plateaus bis Gökçalı im Osten und Akçapınar im Südosten, sowie die quartären Schwemmebenen der Flüsse Karamenderes und Dümrek kartiert.

Schwerpunkt der Geländeaufnahmen und der Auswertungen stellten die Wasserleitfähigkeit der einzelnen Schichten, ihre Lithologie und Lagerungsverhältnisse dar. An manchen Stellen konnten im Gelände natürliche Wasseraustritte beobachtet werden, die teilweise schon früher von Einheimischen ausgebaut wurden. Wasserführende Schichten wurden im Gelände auch an ihrem Bewuchs erkannt, zum Beispiel durch Moose und Flechten. Aus diesen Beobachtungen ließen sich erste Rückschlüsse auf die historische Wasserversorgung des Gebietes ableiten.

An ausgewählten Stellen wurden insgesamt 56 Sedimentproben für weitergehende Untersuchungen an der TU Bergakademie Freiberg entnommen. Anhand von Siebanalysen und Dünnschliffmikroskopie gewonnenen Korngrößenverteilungen lassen Aussagen über die Wasserleitfähigkeit der einzelnen Schichten zu. Mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie wurden Tonminerale bestimmt und Rückschlüsse auf ihr hydrologisches Verhalten gezogen.

Im Zusammenhang mit dieser Kartierung entstanden zwei weitere Arbeiten von BLUME und WEBER, die das Gebiet hydrogeologisch untersuchten. Ziel des Projektes ist die Modellierung der heutigen Grundwasserverhältnisse und die Rekonstruktion der historischen Wasserversorgung Troias.



Abb. 1: Lage Troias in der Türkei (aus ANONYM 2003).

1.2 Danksagung (KB, PL)

Wir möchten allen Personen danken, die in irgendeiner Form zum Gelingen der Diplomkartierung und Diplomarbeit beigetragen haben.

Besonders bedanken wir uns bei unseren Betreuern Herrn Dr. Christian Wolkersdorfer und Herrn Prof. Dr. Broder Merkel für die Diskussionen und Anregungen bei der Interpretation der Daten und bei der Bereitstellung von Kartenmaterial und Literatur. Weiterhin erhielten wir themenbezogene Veröffentlichungen von Frau Dipl. Geol. Jana Göbel, die uns außerdem bei der Auswertung der Daten mit Rat und Tat zur Seite stand.

Unser Dank gilt ebenso dem internationalen Troia-Team unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Manfred Korfmann für die Unterstützung vor Ort. Ebenso wäre unsere Geländearbeit ohne die Hilfe von Prof. Dr. Ilhan Kayan und seinen Mitarbeitern und Studenten der Universität Izmir nicht möglich gewesen. Cenk Yalkıtrak möchten wir für die Erklärungen zu den Formationen danken. Für die finanzielle Unterstützung in der Türkei bedanken wir uns bei Daimler Chrysler, dem Förderkreis der „Freunde von Troia“ und dem DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft).

Herrn Prof. Dr. Christoph Breitkreuz und Frau Petra Wohrow danken wir für die Möglichkeit der Nutzung des sedimentologischen Labors zur Aufbereitung des Probenmaterials.

Bei der Bearbeitung der Tonproben und der Auswertungen der Daten unterstützten uns Herr Prof. Dr. Reinhard Kleeberg und seine Mitarbeiterinnen Frau Gerlach, Frau Weiser und Frau Landers im Institut für Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg

Ein großes Dankeschön gebührt unseren Kommilitonen Claudia Blume und Claudia Weber für die Zusammenarbeit und Unterstützung.

2 ZUSAMMENFASSUNG (KB, PL)

Vom Juli bis August 2002 wurde im Rahmen der archäologischen Ausgrabungen um die historische Stätte Troia die Geländeaufnahmen zur vorliegenden Kartierung durchgeführt. Ziel der Arbeit war es, die neogenen Sedimente des Troia-Rückens im Nordwesten der Biga-Halbinsel zu kartieren und eine geologische Karte im Maßstab 1:10000 anzufertigen. In den Anlagen 1 und 2 sind die Ergebnisse dieser Arbeit dargestellt. Das Gebiet teilt sich in die alluvialen Schwemmebenen von Karamenderes und Dümrek und die neogenen Sedimente des Troia-Rückens auf. Vermutlich handelt es sich bei den alluvialen Ablagerungen zum Teil um aufgearbeitetes Material aus den magmatischen und metamorphen Gesteinen des Hinterlandes.

Bei der Geländearbeit stellte sich der Troia-Rücken als eine Abfolge verschiedener Sand-, Ton-, Schluff- und Kalksteine dar, die sich unter anderem in Korngröße, Organikgehalt, Fossilführung, Karbonatgehalt, Verfestigungsgrad und Farbe unterscheiden und von quartären Alluvialbildungen umrandet werden. Bei den Auswertungen der im Gelände aufgenommenen Daten stellte sich heraus, daß die Ablagerungen des Troia-Rückens einerseits flachmarinen, andererseits lakustrinen Ursprungs sind. Durch die Erosion wurden die obersten Schichten des Neogens auf dem Rücken bereits abgetragen, was sich durch Gerölle belegen läßt.

Weiterführend wurden von BERGMANN und LIPPMANN zwei Diplomarbeiten angefertigt, in denen zum einen von LIPPMANN die geologischen Schichten, die Wasserführung und die historische Bedeutung der Höhle südwestlich Troias untersucht wurden. Zum anderen wurden die bei der Kartierung aufgenommenen Schichten von BERGMANN petrographisch genauer bestimmt und deren hydraulische Eigenschaften abgeschätzt; weiterhin werden die Schichten in die schon bestehenden Formationen nach YALTIRAK (2000) eingeordnet, deren räumliche Beziehung zueinander zu geklärt und gegebenenfalls eine Lokalstratigraphie entwickelt. Dazu war eine umfassende wissenschaftliche Bearbeitung der Proben (Siebanalyse, Polarisationsmikroskopie und Röntgendiffraktometrie) nötig, deren Beschreibungen und Ergebnisse in den Diplomarbeiten von BERGMANN und LIPPMANN zu finden sind.

3 GEOLOGIE

3.1 Geologie der Biga-Halbinsel (PL)

OKAY et al. (1991) teilen die Biga-Halbinsel in vier Zonen ein, die sich in NE-SW-Richtung erstrecken. Es handelt sich dabei um die Gelibolu-, Ezine-, Ayvacik-Karabiga- und Sakarya-Einheiten. Die Gelibolu-Zone besteht aus einem spät-kretazischen, ophiolitischen Grundgebirge mit einer tertiären Überdeckung und zeigt charakteristische Merkmale eines sedimentationsarmen Akkretionskeils (OKAY, SIYAKO, BÜRKAN 1991). Nach OKAY (1991) setzt sich die Abfolge der Ezine-Zone aus kontinentalen Gesteinen zusammen, welche wiederum in die Karadağ Einheit – bestehend aus Metasandsteinen, Metaquarziten und Kalksteinen – sowie den Denizgören Ophiolit und die Çamlıca Glimmerschiefer unterteilt werden. Ähnliche Merkmale wie die Gelibolu-Zone zeigt die Ayvacik-Karabiga-Zone. Dort befindet sich der Çetmi-Ophiolit über den hochmetamorphen Einheiten der Kazdağ-Gruppe, abgetrennt durch die zwei Kilometer mächtige Alakeçi-Mylonit-Zone (OKAY et al. 1991).

BRINKMANN (1976), ŞENGÖR & YILMAZ (1981) und YILMAZ (1997) deklarieren den Bereich zwischen der Intra-Pontiden-Sutur und der Izmir-Ankara-Sutur als Sakarya-Kontinent. Dessen westliches Ende stellt die Biga-Halbinsel dar. YILMAZ (1997) teilt die Sakarya-Zone in zwei verschiedene metamorphe Assoziationen ein, welche er als die Komplexe von Uludağ und Yenişehir bezeichnet. An der Basis der Uludağ-Gruppe stehen hochmetamorphe Gesteine wie Schiefer, Gneise, Amphibolite und Migmatite an. Sie sind von Arkosen, flachmarinen permischen Kalken und flach- bis tiefmarinen triassischen Karbonaten und Klastiten mit zwischengelagerten Ophioliten überdeckt. Meta-Ophiolite und grünschiefermetamorphe, vulkanisch-sedimentäre Einheiten der späten Trias charakterisieren die Yenişehir-Gruppe (ELMAS & YIĞITBAŞ 1999, 2000, 2001). Eine transgressive Abfolge aus der Zeit von Lias bis Turon überlagert diese metamorphen Einheiten. Diese Deckschichten setzen sich zusammen aus fluviatilen Ablagerungen, flachmarinen Kalken des mittleren bis oberen Jura, Kalksteinen der Unterkreide und Radiolarit-Cherts mit pelagischen Kalken aus dem Cenoman und Turon (ELMAS, YIĞITBAŞ 1999, 2000, 2001). Vulkanische bzw. vulkanoklastische Gesteine aus dem Tertiär bedecken die Abfolgen in weiten Teilen der Biga-Halbinsel (ELMAS & YIĞITBAŞ 2001). Sie sind im Südwesten des Kartiergebietes aufgeschlossen (Kapitel 3.4). Sedimentäre Einheiten entlang der Dardanellen werden von YALTIRAK & ALPAR (2002) als Ablagerungen der Gazhanedere-, Kirazlı-, Alçitepe-, Conkbayırı-, Özbek- und Marmara-Formation

beschrieben. Diese Ton-, Schluff-, Sand-, Kalksteine und Konglomerate entstanden zwischen dem mittleren Miozän und späten Pleistozän im Gebiet südlich des Ganos-Störungssystems. Im Kapitel 4.6. ist die Ausbildung dieser Einheiten genauer beschrieben. In der folgenden Abbildung ist die Einteilung der Biga-Halbinsel nach KNACKE-LOY dargestellt.

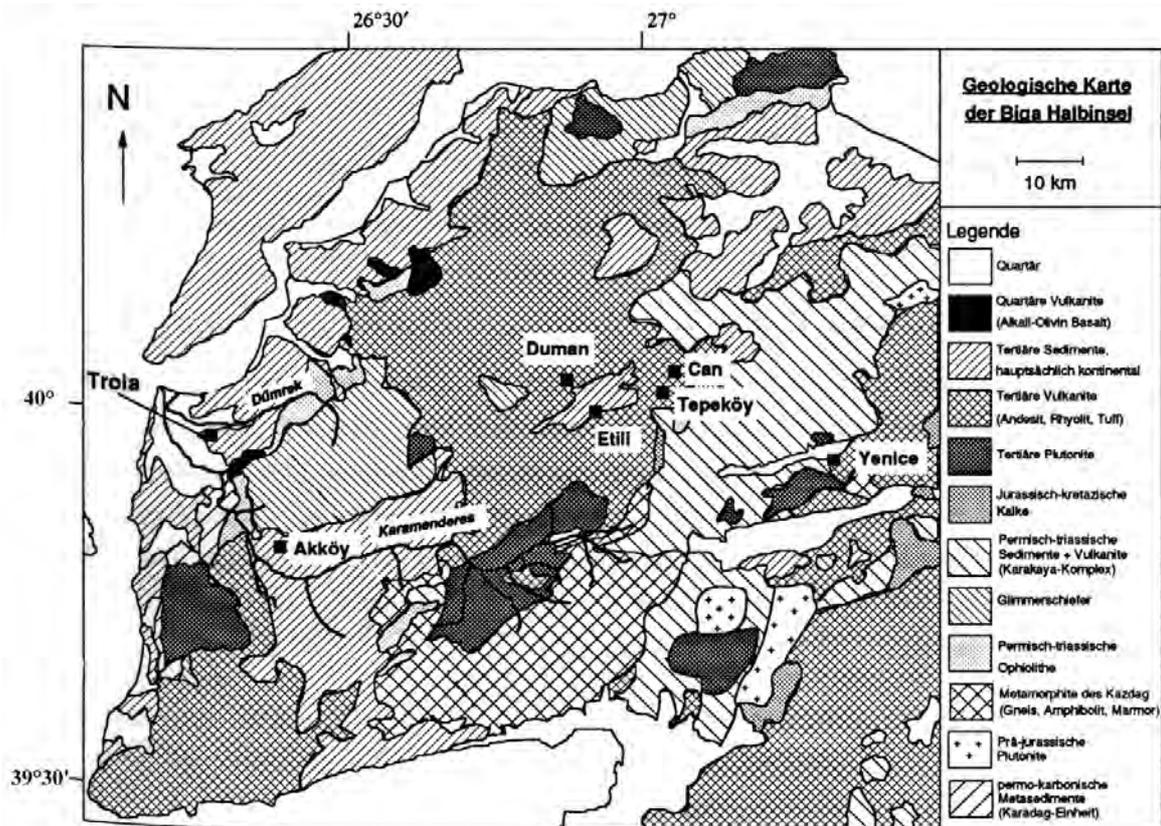


Abb. 2: Vereinfachte geologische Karte der Biga-Halbinsel (nach KNACKE-LOY 1994).

3.2 Tektonik (PL)

Durch die Drift der Arabischen und der Afrikanischen Platte gegen die Eurasische Platte wird ein ausgeprägtes Störungsmuster im Ägäisraum und in der Türkei erzeugt. Als Ausgleich zu dieser nord- bzw. nordöstlich gerichteten Bewegung weicht die anatolische Platte, gebunden an die Nord- und Ostanatolischen Störungszonen, seit dem späten Eozän (ŞENGÖR & YILMAZ 1981) mit einer Rate von 20 mm/a nach Westen aus (YILMAZ 2003). Als Folge expandiert die Ägäis in N-S-Richtung. In Abb. 3 sind die Störungssysteme und die Bewegungen der Platten dargestellt.

YILMAZ (2003) sieht als zweite Ursache der Ägäis-Extension den Rückzug des Hellenic Trench an, wobei der Einfluß eher geringfügig ist. Im Westen der Türkei vergrößert sich dadurch die Transportgeschwindigkeit der anatolischen Platte auf 40 mm/a. Von Ost nach West erstreckt sich das Nordanatolisches Störungssystem, welches im Bereich des Marmara-Meers nach Westen in das Ganos Fault System übergeht. Die Entwicklung dieser dextralen strike-slip-Störung begann während des frühen Miozäns und dauert bis heute an (YALTIRAK 2002).

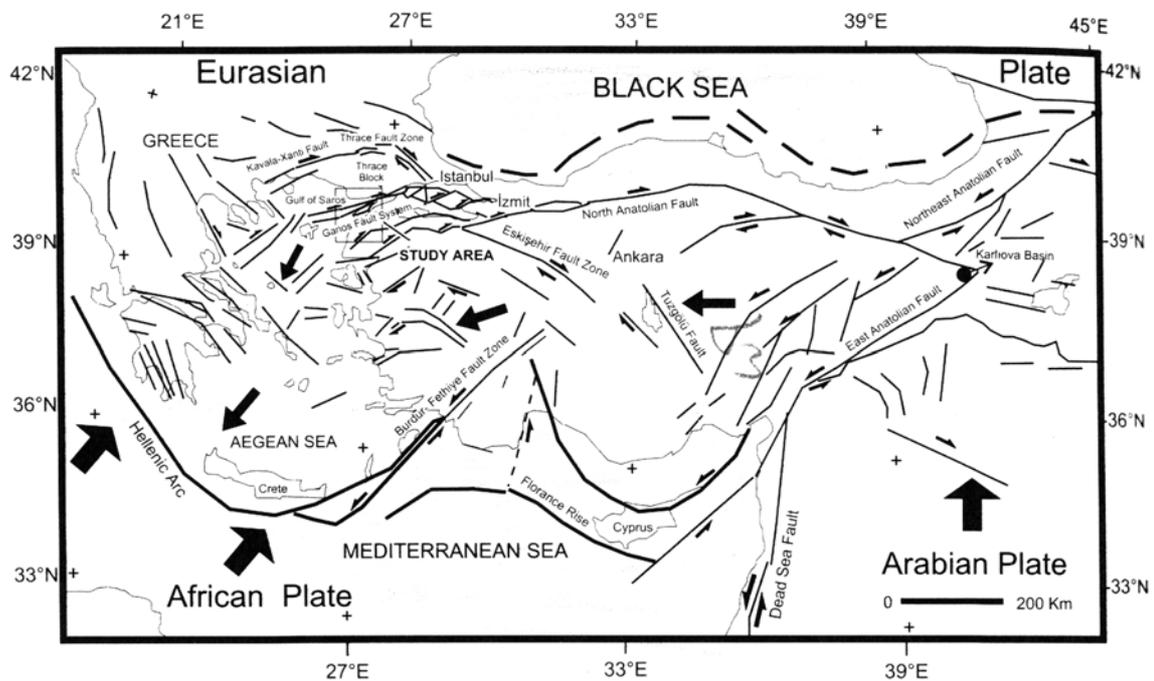


Abb. 3: Tektonische Karte der Türkei und Griechenlands (aus YALTIRAK 1998).

In Zusammenhang mit der Ausbildung des transtensionalen Spannungsregimes entstanden im frühen Pliozän morphologische Einheiten wie der Golf von Saros, die Dardanellen, der Golf von Edremit und der Kazdağ. Listrische Störungen, die sich in Folge der tektonischen Ereignisse bildeten, werden als Ursache der Rotation der Blöcke angesehen. Eine Auswirkung ist die bis heute andauernde Hebung der Region um den Kazdağ. Aufgrund der tektonischen Bewegungen änderte sich die Richtung der Entwässerungswege nach Norden. Mit dem Wasser des Flusses Karamenderes, welcher im Kazdağ-Massiv entspringt, gelangten im Quartär große Massen klastischen Materials in die Troas und wurden in einer alluvialen Ebene aufgeschüttet (OKAY 1991).

Entlang der Störungen der Biga-Halbinsel ist die seismische Aktivität groß. Erdbebenzonen befinden sich in der Saros-Bucht mit ihrer westlichen Verlängerung in den Nord-Ägäis-Trog und im westlichen Teil des Golfes von Edremit (YILMAZ 2003).

Bei der Kartierung wurden drei Störungen in der näheren Umgebung von Troia aufgefunden (Anlagen 1 und 2). Diese stehen mit dem Nordanatolischen Störungssystem in Zusammenhang. YILMAZ (2003) bestimmte die Periodizität der Erdbeben mit einer Magnitude von 6 auf der Richter-Skala auf 110 Jahre; Erdbeben mit Magnituden zwischen 5 und 6 treten alle 25 bis 30 Jahre auf. Dabei können Erdbeben mit Magnituden über 5 in Troia Schäden verursachen.

3.3 Orogenesen (PL)

KAYAN (1994) beschreibt die strukturelle Entwicklung der Türkei als Ergebnisse der paläotektonischen und die neotektonischen Phasen. Demnach überdauerte die paläotektonische Periode einen langen Zeitraum bis zum Ende der alpinen Gebirgsbildung, wobei sich die nördlichen und südlichen Gebirgsgürtel herausbildeten. Im Miozän kollidierten die Afrikanische und Arabische Platte mit der Eurasischen Platte. Dabei war die Geschwindigkeit der Drift der Arabischen Platte höher als die der Afrikanischen, wodurch sich die Erdkruste im östlichen Teil der Türkei verdickte und zu hohen Gebirgsmassiven geformt wurde. Entlang des Nordanatolischen Störungssystems wurden die Spannungskräfte in westliche Richtung abgeleitet.

Vor etwa 5 Millionen Jahren, nachdem in flachmarinen und lakustrinen Milieus die Sedimente abgelagert wurden, welche heute die Rücken des Kartiergebietes bilden, begann die Hebung und Deformation dieser Becken unter dem Einfluß neotektonischer Aktivitäten. Diese setzten sich im Pliozän fort und verringerten sich erst im Laufe des Quartärs. Während der tektonischen Ereignisse fand in den entsprechenden Gebieten intensiver Vulkanismus statt.

Bei der Entwicklung der Strukturen der Biga-Halbinsel spielen vor allem die triassische Karakaya-Orogenese, die alpidische Orogenese im frühen Tertiär sowie strike-slip-Bewegungen des frühen Miozän eine Rolle. In der Ezine-Zone zeigen sich die tektonischen Ereignisse der Trias in Form flach einfallender Überschiebungen (z.B. Çamköy Überschiebung), während im Karakaya-Komplex steile Störungssysteme und kilometergroße Blöcke entstanden. Im Zuge der alpidischen Orogenese wurden die Gesteine der Sakarya-Zone leicht gefaltet. Die Ophiolit-Komplexe der Biga-Halbinsel wurden dabei über die kontinentalen Gesteine gehoben. Dagegen beeinflussen strike-slip-Störungen seit dem frühen Miozän vor allem den Süden der Biga-Halbinsel. Lakustrine Becken sowie die Heraushebung des Kazdağ werden als Folge dieser Aktivitäten angesehen (OKAY et al. 1991).

3.4 Vulkanismus (PL)

Während der tektonischen Entwicklungen in der Türkei herrschte zumeist auch ein intensiver Vulkanismus. Weite Areale im Osten der Türkei sind von vulkanischen Gesteinen bedeckt, Abb. 4 zeigt die Verteilung der Vulkanite und Plutonite in Westanatolien. Vulkanische Aschen und Pyroklastite sind vor allem in Zentralanatolien anzutreffen.

In Westanatolien werden drei Phasen von intensivem Vulkanismus zwischen Oligozän und Pliozän unterschieden, in denen intrusive und extrusive Gesteine verschiedener Assoziationen entstanden. Plutonite mit granitischer Zusammensetzung wurden auf 20 — 35 Millionen Jahre datiert, während die intermediären Vulkanite 15 — 30 Millionen Jahre alt sind. Vor vier bis zehn Millionen Jahre begann eine zweite Phase vulkanischer Aktivität; dabei wurden u.a. die Basalte im Südwesten des Kartiergebietes gebildet (YILMAZ 1997).



Abb. 4: Verteilung junger Vulkanite und Plutonite in Westanatolien (nach YILMAZ 1997).

3.5 Entwicklungen im Tertiär und Quartär (PL)

Zu Zeit des frühen und mittleren Miozän war das Mittelmeeres mit dem Indischen Ozean verbunden. Nordwestanatolien war durch eine relativ ebene, von dichter Vegetation bedeckte Oberfläche geprägt. Warmes und humides Klima begünstigte die intensive Verwitterung der Gesteine in den Bergmassiven, wobei das erodierte Material innerhalb weiter, flacher Seen unter niedrig energetischen Bedingungen abgelagert wurde. Entlang der N–NE-verlaufenden Störungen entstanden Vulkane (KAYAN 1999). Vor ca. 15 Millionen Jahren begann die Hebung Anatoliens durch die Kollision mit der Afrikanischen und Arabischen Platte, wodurch sich weitere Becken, Gräben und Halbgräben entwickelten. Auch die Gesteine des Arbeitsgebietes entstanden während dieser Zeit.

Gegen Ende des Miozän stellte sich die Morphologie aufgrund der voran gegangenen tektonischen Ereignisse wesentlich unebener dar. Durch die nordwärts gerichtete Drift der Afrikanischen und Arabischen Platte gegen die Eurasische Platte wurde die Verbindung des Mittelmeerraumes mit dem Indischen Ozean unterbrochen. Im Gegensatz zu den warm-humiden Bedingungen zu Beginn des Miozän herrschte am Ende dieser Epoche ein arides bis semi-arides Klima und die Vegetation veränderte sich zu trockener Steppe. Während des Pliozäns fanden die Prozesse der tektonischen Hebung und der daraus resultierenden Erosion der Hochflächen sowie der terrestrischen Sedimentation in den alluvialen Ebenen ihre Fortsetzung (KAYAN 1999).

Vor allem klimatische Veränderungen sind für die morphologischen Entwicklungen im Quartär verantwortlich (KAYAN 1994). Vereisungen hatten zwar keinen direkten Einfluß auf die Troas, jedoch wurde das Gebiet aufgrund seiner küstennahen Lage von den glazial bedingten Meeresspiegelschwankungen betroffen. Änderungen des Küstenverlaufs und der Sedimentationsräume waren die Folge dieser Entwicklungen. Während der Regressionen des Meeresspiegels waren das Schwarze Meer und das Marmara-Meer Binnenseen; die Dardanellen und der Bosphorus waren Flüsse. Sinkende Temperaturen während der Glaziale führten zu einer verringerten Evapotranspiration und damit zu vermehrtem Wasserreichtum in den Fließgewässern, was wiederum zu verstärkter Erosion führte. Die weiterhin andauernde Hebung der Landmasse aufgrund neotektonischer Prozesse (Kapitel 3.4) begünstigte diese Entwicklung. Durch die Kraft des Wassers wurden morphologische Unebenheiten zum Teil ausgeglichen, in dem Material der kristallinen Bergländer durch die Flüsse in Täler und Ebenen transportiert und dort aufgeschüttet wurde.

4 DAS KARTIERGEBIET

4.1 Beschreibung des Kartiergebietes (PL)

Südwestlich von Istanbul, im Westen Anatoliens, erstreckt sich der Historische Nationalpark Troia. Çanakkale als nächst größere Stadt befindet sich etwa 25 km nordöstlich, Izmir ca. 300 km südlich des Arbeitsgebietes. Sechs Dörfer liegen innerhalb des Gebietes: Kalafat, Tevfikiye, Çıplak, Halileli, Akçapınar und Gökçalı (von W nach E). In Nordsüdrichtung durchquert die Straße von Çanakkale nach Ezine das Gebiet. In Abb.5 ist das Kartiergebiet dargestellt, welches eine etwa 50 km² große Fläche im nördlichen Teil des Nationalparks umfaßt. Im Norden der Biga-Halbinsel befinden sich die Yeniköy-, Kumkale- und Troia-Rücken mit ähnlicher genetischer Ausbildung. Hauptsächlicher Bestandteil des Kartiergebietes ist der Troia-Rücken, welcher sich von West nach Ost erstreckt und aus unterschiedlichen neogenen Sedimentgesteinen aufgebaut ist.

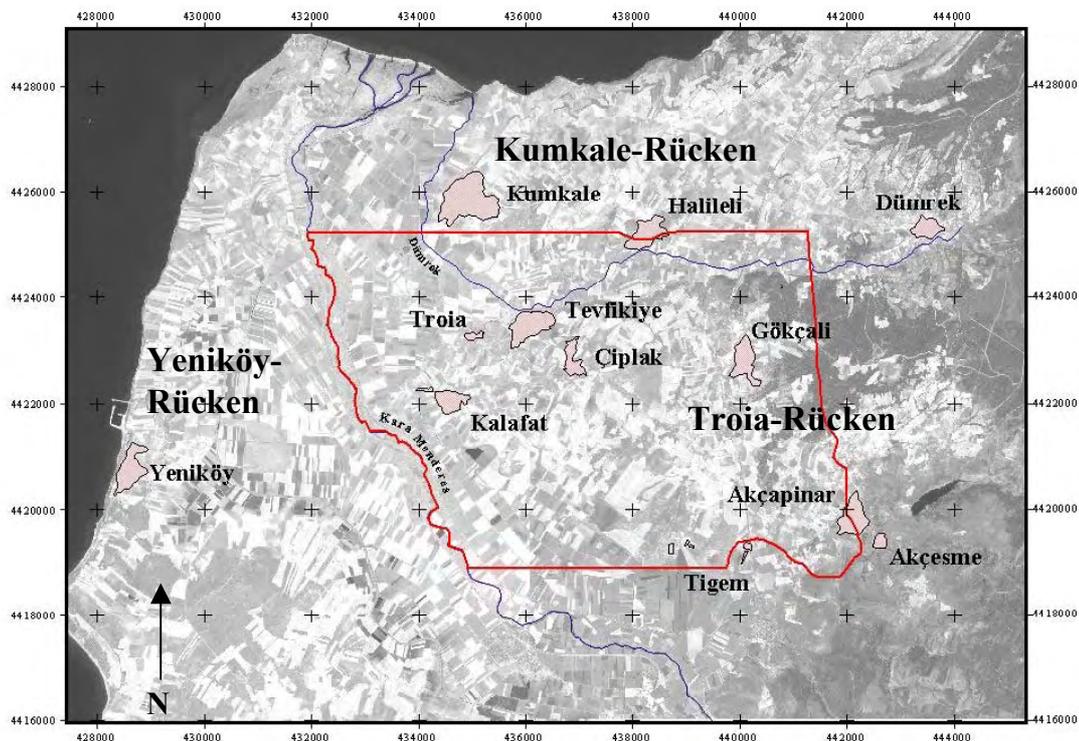


Abb. 5: Lage des Kartiergebietes auf der Biga-Halbinsel im Nordwesten der Türkei. Maßstab 1:72000; Koordinatensystem: UTM WGS 84, basierend auf Ikonos-Daten.

In Form einer flach nach Südwesten einfallende Hochebene, welche im Osten von tertiären Magmatiten und prä-neogenen Metamorphiten begrenzt wird, ist dieser Rücken im Gelände erkennbar. Entlang der steilen Böschung an der Nordseite des Rückens sind in Wasserrissen eine Vielzahl von Aufschlüssen zu finden. Weitere Profile befinden sich an der Straße zwischen Çanakkale und Ezine.

Den höchsten Punkt des Gebietes stellt der Çilin Tepe bei 4423610/440630 (UTM WGS 84) dar. Er erhebt sich 129 Meter über dem Meeresspiegel. Nördlich des Hanges erstreckt sich eine quartäre Ebene, welche Höhen von 10 – 20 Meter über dem Meeresspiegel aufweist. Kayan et al. teufte hier bereits mehrere Bohrungen ab und rekonstruierten die Entwicklung der Küstenlinie aus den ermittelten Bohrprofilen. Erläuterungen dazu befinden sich in Kapitel 4.7. Zwischen dem Troia- und dem Kumkale-Rücken, deren Lage in Abb.5 ersichtlich ist, windet sich das Flußbett des Dümrek von Ost nach West. In den Sommermonaten ist der Fluß größtenteils trocken; Gerölle lassen aber auf einen Durchfluß in den regenreichen Wintermonaten schließen. Etwa entlang des Flußbettes verläuft die nördliche Gebietsgrenze. Von Südost nach Nordwest fließt der Karamenderes und bildet die westliche Grenze des Gebietes. Dieser Fluß führt auch im Sommer Wasser und spielt, neben den zahlreichen Bohrungen in der Ebene, für die landwirtschaftliche Bewässerung eine entscheidende Rolle. Nordwestlich des Dorfes Kumkale münden Dümrek und Karamenderes in die Dardanellen. Zwischen Kalafat und Tigem taucht die nach SW einfallende tertiäre Hochfläche unter die alluviale Quartärebene ab. Dieser Kontakt verläuft weitgehend parallel zum Lauf des Karamenderes. Im Osten verläuft die Gebietsgrenze in Nord-Süd-Richtung zwischen Gökçalı und Akçapınar. Abb.5 zeigt die Ausdehnung des Kartiergebietes und den Verlauf der Grenzen.

In den Fünfziger- und Sechzigerjahren des 20. Jahrhunderts wurden politische Rückwanderer im Bereich der Troas angesiedelt. Sie schufen neue Ackerflächen, indem sie die Sümpfe drainierten und Kanäle und Dämme anlegten (Höfeld 2001). Zur Bewässerung der Ackerflächen wird darüber hinaus Wasser aus den oberflächennahen Aquiferen entnommen, teilweise werden auch tiefer liegende Grundwasserleiter genutzt.

4.2 Klima (KB)

Die Troas als westlicher Teil der Biga-Halbinsel wird dem mediterranen Klimabereich zugeordnet. Im Sommer steigen die Temperaturen auf über 40 °C an, während der Niederschlag ein Minimum von unter 10 mm pro Monat erreicht (Tab. 1). Im Durchschnitt liegen die Jahresmittelwerte bei 14,8 °C. Die Winter sind milder als in den gemäßigten Breiten Europas, jedoch kann es in der Troas in manchen Wintern zu Kälteeinbrüchen kommen. Nur an etwa 26 Tagen sinken die Durchschnittstemperaturen unter den Nullpunkt; es gibt durchschnittlich 4 Schneetage pro Jahr. Die Sommer sind wärmer und trockener als in Mitteleuropa, was eine verstärkte Nutzung der Grundwässer für die Landwirtschaft zur Folge hat.

Mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 635 mm fallen im Norden der Biga-Halbinsel ähnliche Niederschlagsmengen wie in Deutschland. Im Unterschied zu Deutschland fällt der Hauptanteil des Niederschlags hier im Winter, Frühjahr oder Herbst. Somit herrscht in der Troas ein Winterniederschlagsregime. Der Kazdağ bildet mit Gipfeln über 1700 mNN im Süden der Biga-Halbinsel eine natürliche Klimascheide, welche die Niederschlagsmengen in der Troas beeinflussen. Einen besonders regenarmen Landstrich in der Troas stellt die Schwemmebene des Karamenderes dar. Diese Trockenheit wird ebenfalls durch die starke Nutzung der Grundwässer für die Landwirtschaft begünstigt.

Tab. 1: durchschnittliche ($T_{\text{Ø}}$), maximale (T_{max}) und minimale (T_{min}) monatliche Temperaturen, durchschnittlicher monatlicher Niederschlag (P); Meßzeitraum: für $T_{\text{Ø}}$ und P 1951 bis 1990, für T_{max} und T_{min} 1961 bis 1990, Station Çanakkale (nach Hoare 2002)

| | Jan | Feb | März | April | Mai | Juni | Juli | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|--------------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| $T_{\text{Ø}}$ [°C] | 6,3 | 6,7 | 8,0 | 12,3 | 17,3 | 21,9 | 24,5 | 24,3 | 20,5 | 15,6 | 11,9 | 8,5 | 14,8 |
| T_{max} [°C] | 9,5 | 10,1 | 12,3 | 17,2 | 22,4 | 27,5 | 30,1 | 29,8 | 26,2 | 20,3 | 15,8 | 11,8 | 19,4 |
| T_{min} [°C] | 2,9 | 3,5 | 4,7 | 8,4 | 12,4 | 16,2 | 18,7 | 18,8 | 15,5 | 11,5 | 8,2 | 5,2 | 10,5 |
| P [mm] | 107,0 | 69,4 | 67,4 | 45,7 | 31,6 | 22,5 | 12,9 | 7,5 | 25,1 | 49,1 | 90,9 | 106,0 | 635,0 |

4.3 Flora/Fauna (PL)

Während die Troas vor der Besiedelung weitgehend bewaldet war, ist dieses Gebiet heute durch intensive Landwirtschaft geprägt. Vor allem Sonnenblumen, Baumwolle, Melonen, Oliven, Paprika, Tomaten und Mais werden heute im unmittelbaren Umfeld Troias angebaut. Seit der Trockenlegung der Sümpfe in den Fünfziger- und Sechzigerjahren ist dabei die Bewässerung der Felder notwendig und der Karamenderes wird als „Lebensader“ der Troas angesehen (HUTTER & SCHWADERER 2001).

Der von Kiefern dominierte Hochwald, welcher sich zur Zeit der ersten Siedler großflächig auf dem Bergland erstreckte, ist im Kartiergebiet nur noch östlich von Gökçalı anzutreffen. Entlang des Karamenderes wachsen feuchtigkeits-liebende Pflanzen wie Weiden, Pappeln und Tamarisken. Dagegen sind durch Trockenlegung die großen Schilfbestände in den ehemals sumpfigen Bereichen dezimiert worden. Seltene Irisarten, Orchideen und die Troia-Eiche sind im Gebiet zu finden (HUTTER & SCHWADERER 2001).

Als Rückzugsgebiet zahlreicher Vogelarten spielt die Troas eine entscheidende Rolle. Neben Wiedehopf, Rotkopfwürger und Bienenfresser brüten dort Weißstörche und Reiher. Weiterhin ist das Gebiet von Smaragdeidechsen, Schildkröten und Gottesanbeterinnen bevölkert. Aus archäologischen Befunden ist die Troas vor der anthropogenen Besiedlung als Lebensraum von Tieren wie Löwen, Bären, Wölfen und Schakalen bekannt. Knochenfunde belegen weiterhin, daß sich u.a. Pelikane, Adler, Geier und Flamingos in diesem Areal aufhielten (UERPMANN 2001).

4.4 Historische Stätte Troia (PL, KB)

4.4.1 Siedlungsgeschichte von Troia

Vor 5500 Jahren begann die Entwicklungsgeschichte von Troia. Seit dieser Zeit wuchs die Siedlung auf dem Hissarlık ungefähr 20 m in die Höhe. Neue Siedlungen wurden mit verändertem Grundriß über den vorherigen gebaut. Dabei wurden die existierenden Gebäude teilweise zerstört oder aufgearbeitet. Im folgenden wird in Anlehnung an BRANDAU (1997) ein kurzer Abriß zur Geschichte der Besiedlung am Hissarlık gegeben.

Maritime Troia-Kultur

Troia I: 3000 — 2500 v.u.Z.

Bereits die ersten Siedlungen bestanden aus befestigten Bauten. Ackerbau, Jagd und Fischfang stellten die Lebensgrundlagen der Bewohner dar; es wurde Handel betrieben.

Troia II: 2600 — 2500 v.u.Z.

In der zweiten Besiedlungsphase entstand auf dem Hügel ein Fürsten- oder Königssitz mit Handelsbeziehungen nach Mesopotamien und Nordsyrien. Ein bedeutender Fortschritt dieser Zeit war die Entwicklung der Töpferscheibe, die es ermöglichte, Keramikwaren besser und schneller herstellen zu können. Außerdem besaßen die Bewohner große Kunstfertigkeiten in der Metallverarbeitung, was Schatzfunde von SCHLIEMANN belegen.

Troia III: 2500 — 2300 v.u.Z.

Zur Zeit von Troia III war die Siedlung eher unbedeutend und hatte keinen Herrschersitz. Dicht gedrängte und scheinbar unbefestigte Häuser prägten das Bild der Stadt.

Nach einer Periode mit sehr dünner, teilweise sogar fehlender Besiedlung, schließt sich die anatolische Troia-Kultur an.

Anatolische Troia-Kultur

Troia IV: 2200 — 1900 v.u.Z.

In Troia IV wurden die Mauern wieder befestigt. An der Besiedlungsform änderte sich wenig. Als wichtigste Neuerung wird die Errichtung von Kuppelöfen angesehen.

Troia V: 1900 — 1750 v.u.Z.

Veränderungen traten in Troia IV nur in der Herstellung der Keramik auf.

Über die Siedlungsphasen III bis V ist nur wenig bekannt, da SCHLIEMANN diese bei den Ausgrabungen der von ihm als „verbrannten Stadt“ bezeichneten Periode Troia II weitgehend zerstörte.

Von 1750 bis 1700 v.u.Z. war der Hissarlık erneut dünn besiedelt.

Troianische Hochkultur

Troia VI: 1700 — 1250 v.u.Z.

Troia VI war die mächtigste Stadt in der Geschichte der Besiedlung und wurde von den Griechen zu einem Fürsten- und Königssitz ausgebaut. Von der Bedeutung der Stätte zeugen die gewaltigen Befestigungsmauern mit ihren Toren und Türmen, die schon SCHLIEMANN entdeckt hatte. Aus den Funden verschiedener Keramiken schließen die Archäologen auf Handelsbeziehungen mit dem gesamten Ägäis-Raum. Bei den Ausgrabungen wurden zahlreiche Knochenreste gefunden, die erstmals die Pferdehaltung in diesem Gebiet belegen. BLEGENS Ansicht nach wurde Troia VI durch ein Erdbeben zerstört.

Troia VII: 1250 — 1180 v.u.Z.

BLEGEN interpretierte die von Homer beschriebene Belagerung Troias und den Troianischen Krieg in diese Periode. Grund für seine Annahmen war die Veränderung der Bebauung von großen zu zahlreichen kleineren Häusern. Von Hand hergestellte Keramik deutete auf eine eventuelle Besiedelung durch neue Völker hin. Nachdem der Siedlungshügel durch einen Brand zerstört wurde, blieb er 400 Jahre unbesiedelt.

Griechische Zeit

Troia VIII: 700 — 85 v.u.Z.

Um 700 v.u.Z. besiedelten Äolier die Stadt und nannten sie Ilion. Von den neuen Siedlern wurden unter anderem den Athena-Tempel sowie das große Theater errichtet.

Römische und byzantinische Zeit

Troia IX: 85 v.u.Z. — 5. Jhdt. u.Z.

Nachdem die Römer die Stadt erobert hatten, zerstörten sie diese teilweise und bauten neue Tempel. Hierfür wurde die Spitze des Burgberges eingeebnet, wodurch sich die gesamte Struktur der Stadt veränderte. Wohnhäuser befanden sich nun in der neu errichteten Unterstadt südlich des Burgberges. Um 500 u.Z. wurde die Stadt durch ein Erdbeben zerstört und von der Bevölkerung nahezu verlassen.

Troia X: 12 — 13 Jhdt.

In der letzten Besiedlungsperiode wurde in Troia ein Bischofssitz gegründet. Im 14. Jahrhundert verließen die Bewohner nach dessen Auflösung endgültig die Stadt.

4.4.2 Geschichte der Ausgrabungen

1868 befand sich Heinrich SCHLIEMANN erstmals zu Forschungszwecken in der Troas. Er vermutete Troia zunächst in der Nähe des Ortes Pinarbaşı, ca. 25 km südlich des heutigen Ausgrabungsortes. Dort fand er jedoch keine Hinweise auf eine frühere Besiedlung. Frank CALVERT überzeugte SCHLIEMANN davon, Troia auf dem Hissarlık zu suchen, wo SCHLIEMANN 1870 schließlich eine Probegrabung durchführte. Von der Authentizität des Ortes überzeugt, unternahm er von 1871 bis 1873 und 1878/79 offizielle Grabungen. Während dieser 5 Kampagnen untersuchte er die Stratigraphie der Siedlung und teilte sie in 9 Perioden ein. 1882 und bei den Kampagnen 1889/90 wurde SCHLIEMANN von Wilhelm DÖRPFELD unterstützt, welcher nach dem Tod SCHLIEMANNs am 26.12.1890 die Leitung der Grabungen 1893/94 und 1924 übernahm. Von 1932 bis 1938 führte ein Team unter Carl BLEGEN, von der Universität Cincinnati, die Grabungen fort. Dabei wurden die von SCHLIEMANN unterschiedenen neun Perioden in insgesamt 46 Bauphasen gegliedert. Seit 1982 leitet Manfred KORFMANN (Eberhard-Karls-Universität Tübingen) die Arbeiten in der Troas. Zunächst unternahm er Grabungen in der Beşik-Bucht und auf dem Sivri- und Yassitepe, bevor er 1988 die Forschungen auf dem Hissarlık wieder aufnahm. Seitdem forscht ein Team internationaler Wissenschaftler in alljährlichen Kampagnen, um mehr über die Geschichte Troias zu erfahren.

4.5 Geomorphologie (PL)

Während der südliche Bereich der Biga-Halbinsel durch eine Folge tektonisch bedingter, NE—SW-orientierter Horst- und Grabenstrukturen gekennzeichnet ist, prägen flache Plateau-Rücken, bestehend aus tertiären Sedimentiten, das Landschaftsbild der nordwestlichen Biga-Halbinsel. Abb.6 zeigt die einzelnen morphologischen Elemente der Troas. Im Bereich des Kartiergebietes erhebt sich der Troia-Rücken 20 bis 130 m über dem Meeresspiegel. Entsprechend den Lagerungsverhältnissen der Sedimentschichten, welche mit geringen Beträgen nach Südwesten hin einfallen, paßt sich die Morphologie dem Untergrund an. Die höchsten Erhebungen befinden sich deshalb im Osten des Neogenrückens, welcher nach Norden von einem steil abfallenden, West—Ost-streichenden Hang begrenzt wird. Östlich schließen sich die tertiären Basalte und Metamorphite an.

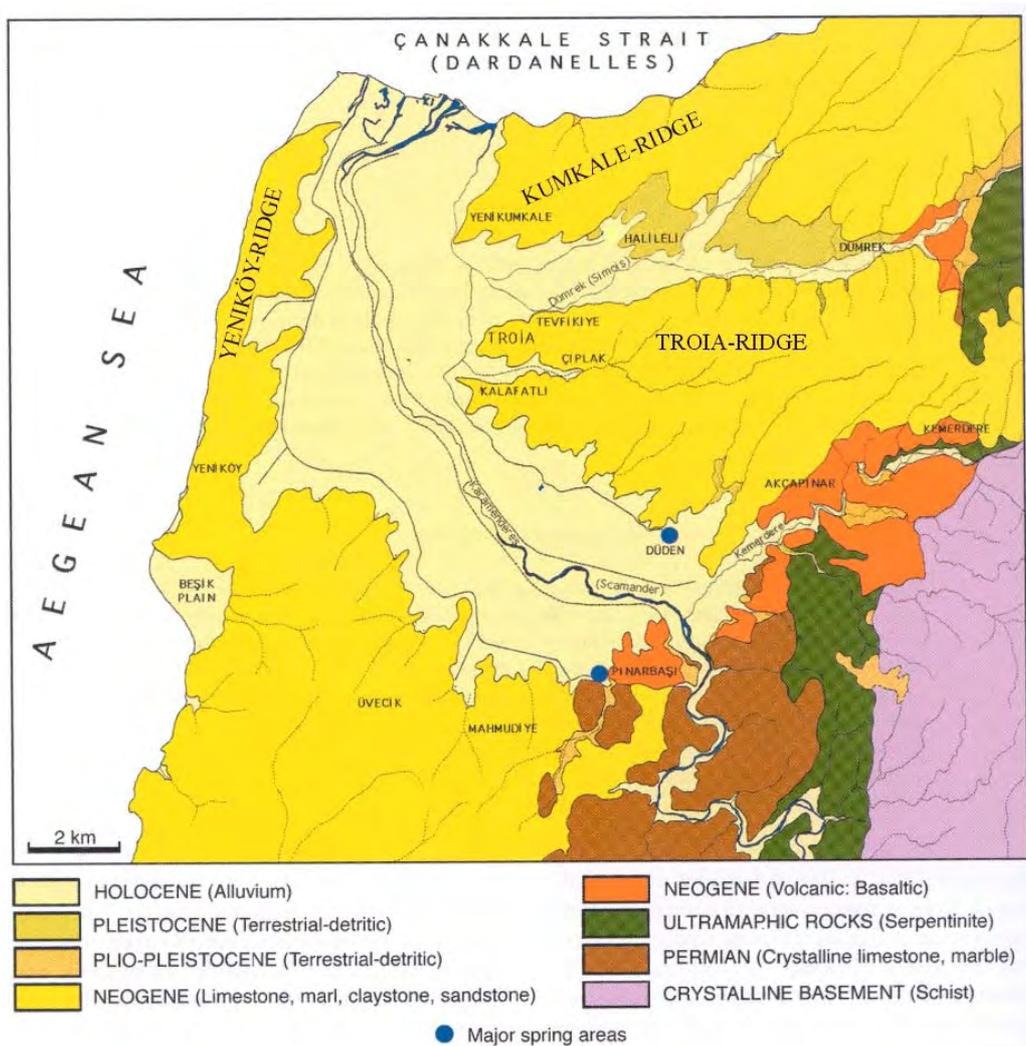


Abb. 6: Vereinfachte geologische Karte der Troas (nach KAYAN 2000).

Durch den Fluß Çıplak wurde die quartäre Ebene zwischen Troia und Kalafat geformt. Unter dem Flußbett wird eine Schwächezone vermutet, in welche sich der Çıplak von Ost nach West einschneidet und die daraufhin mit klastischem Material verfüllt wurde. Heute ist der durch Grundwasserabsenkungen ausgetrocknete Fluß als morphologische Senke im Gelände erkennbar.

Im Norden des Troia-Plateaus liegt, in Ost-West-Richtung orientiert, der Kumkale-Rücken, abgetrennt durch die alluvialen Ablagerungen des Dümrek. Wenige Kilometer nördlich schließt sich die Meerenge der Dardanellen an. Westlich des Hıssarlık befindet sich in Nord-Süd-Orientierung der Yeniköy-Rücken zwischen dem Schwemmland des Karamenderes und der Ägäis. Jede der drei Erhebungen ist aus neogenen Sedimenten aufgebaut, die zusammen unter ähnlichen Bedingungen abgelagert wurden.

Karamenderes und Dümrek schnitten sich in das neogene Gestein und verfüllten die Täler im Quartär mit klastischem Material aus dem Hinterland. Als Resultat dieser Entwicklung entstanden die flache Ebenen zwischen den Rücken.

4.6 Ausbildung des Neogens (KB)

Nach YALTIRAK (2000) wird das Tertiär der Biga-Halbinsel in sechs Einheiten unterteilt: Gazhanedere-, Kirazlı-, Alçıtepe-, Conkbayırı-, Özbek- und Marmara-Formation. Dabei wird das Untersuchungsgebiet in die pliozäne bis pleistozäne Conkbayırı- und die spätmiozäne Alçıtepe-Formation eingegliedert (Abb. 7).

Über dem prä-neogenen Basement lagert, teilweise diskordant, die Gazhanedere-Formation. Diese ist im nördlichen Teil des Golfs von Saros und entlang der Dardanellen weitverbreitet. Allgemein wird die Formation den Bildungen des frühen bis mittleren Miozäns zugeordnet. Typisch sind klastische Ablagerungen mäandrierender Flüsse und teilweise lakustrine Tonsteine, wobei die Mächtigkeiten zwischen 150 und 330 Metern schwanken. In einigen Tonsteinen wurden Süßwasser-Ostrakoden beschrieben (YALTIRAK 2002).

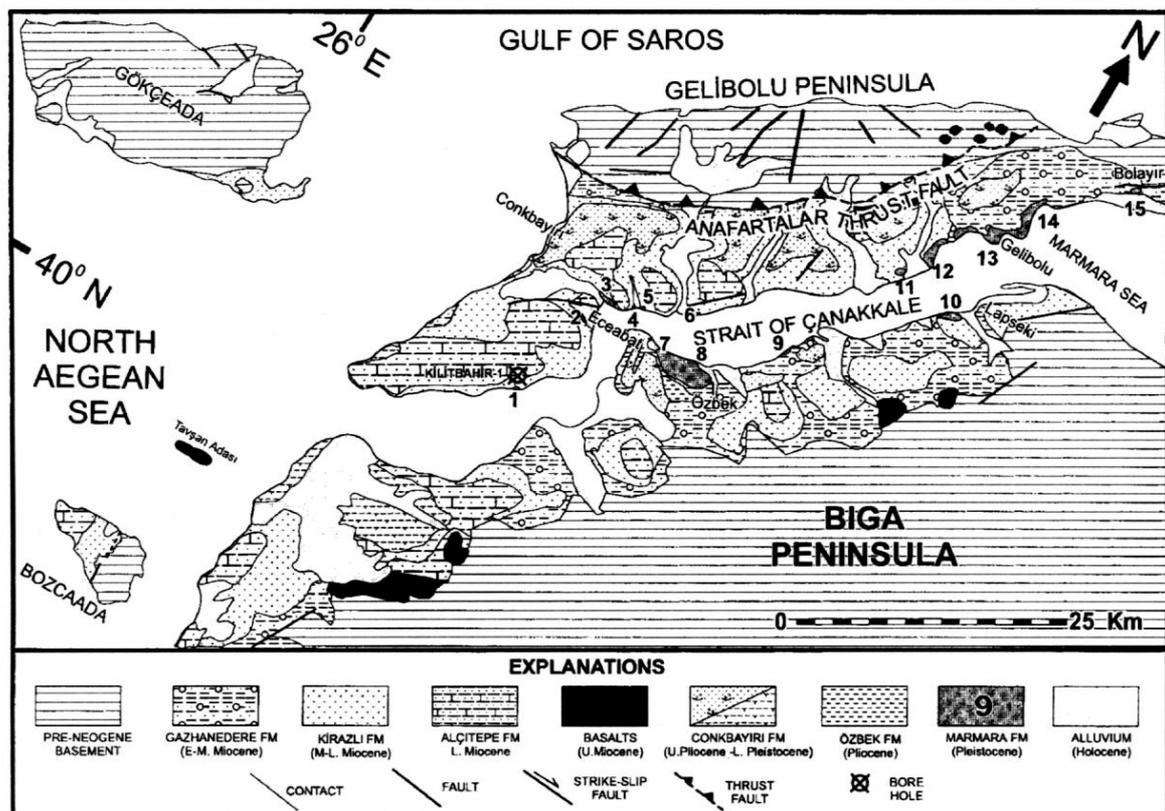


Abb. 7: Geologische Karte der Dardanellen (aus YALTIRAK 2000).

Darüber folgt die Kirazlı-Formation. Im Mittel- bis Spätmiozän lagerten sich fluviatile und Strandablagerungen ab, hauptsächlich massive Sandsteine mit Schluffsteinen. Makro- und Mikromammaliaresten wurden in diesen Schichten gefunden und zur Altersbestimmung genutzt. Im oberen Teil der Formation stehen rötliche Feinsandsteine mit Bivalvenschalenresten an. Vereinzelt Gipslagen sind in diese Sandsteinen eingeschaltet. Im Allgemeinen ist diese Formation 80 bis 120 Meter mächtig und von verfestigten Dünenablagerungen geprägt (YALTIRAK 2002). Im östlichen Teil des Kartiergebietes steht die Alçıtepe-Formation an. Diese lagerte sich im späten Miozän in einem flachmarinen oder lakustrinen Milieu in Form von sandigen und oolithischen Kalksteinen und Sandsteinen ab. Darüber hinaus befinden sich Konglomerate und Sandsteine im Hangenden der durchschnittlich 200 Meter mächtigen Einheit. Oft wurden marine Bivalvenreste, marine Ostrakoden, Fischreste und Mammaliaknochenbruchstücke beschrieben. Nur im Westen des Kartiergebietes ist das Hangende der Formation aufgeschlossen, welches von ÜNAL (1996) als sandiger Kalkstein, unterlagert von einem Sandstein, beschrieben wird. Diese Abfolge läßt sich im westlichsten Block des Troia-Rückens gut erkennen. Markant an der Alçıtepe-Formation im Gebiet ist ein rötlicher Sandstein mit auffallend häufig auftretenden Windkantern, welcher im Südosten ausstreicht (YALTIRAK 2002).

Den westlichen und damit größten Teil des Troia-Rückens bildet die oberpliozäne bis unterpleistozäne Conkbayırı-Formation. Charakterisiert wird diese durch alluviale Fans mit Tonsteinen als Basement, überlagert von Sandsteinen. Anhand von Süßwassermollusken, Sporen und Pollen wurde sie datiert. Im Kartiergebiet stellt sich die Formation als eine Abfolge wenige Meter mächtiger, meist karbonatischer Sand-, Ton-, Schluff- und Kalksteine in unregelmäßiger Reihenfolge dar. Auffällig sind zwei in der recherchierten Literatur nicht beschriebene stromatolithische Kalksteine, die bei der Geländearbeit als Markerhorizonte dienen, aber im größeren Maßstab lateral nicht verfolgbar sind. ÜNAL (1996) beschreibt das Basement der Conkbayırı-Formation als 30 bis 40 Meter mächtigen Feinsandstein, der von einem 80 Meter mächtigen Mergel überlagert wird. Bei der Geländearbeit wurden nur wenige Zentimeter bis Meter mächtige Schichten angetroffen und beschrieben, die eine solche Vereinfachung kaum zulassen.

In der Arbeit von YALTIRAK (2003) wird die Conkbayırı-Formation in die Truva- und die Özbek-Einheiten untergliedert. Details zur Ausbildung der Truva-Formation fehlen. Über der Conkbayırı-Formation (bzw. der Truva-Formation) lagerte sich im Pliozän diskordant

die Özbek-Formation ab. Hauptsächlich werden gut gerundete Konglomerate und Sandsteine mit karbonatischen Zementen beschrieben. Laut YALTIRAK (2003) steht diese Formation etwa 85 bis 115 Metern über dem heutigen Meeresspiegel an.

Im Pleistozän entstand die Marmara-Formation, für die eine stark detritische und aufgearbeitete Strandfazies charakteristisch ist. Abhängig von der morphologischen Ausbildung der Küstenlinie variiert die Mächtigkeit der Formation zwischen 2 und 36 m.

4.7 Entwicklung des Gebietes im Tertiär und Quartär (PL)

In flachmarinen und lakustrinen Milieus wurden während des Neogens verschiedene Sedimente abgelagert. Durch die tektonisch bedingte Hebung (Kapitel 3.6) brachen diese Schichtenabfolgen auseinander und wurden gering geneigt (KAYAN 1998). So entstanden die drei Blöcke, welche heute als morphologische Erhebungen zu erkennen sind: im Westen der Sigeion/Yeniköy-Rücken, im Norden der Kumkale-Rücken und im Südosten der Troia-Rücken. Flüsse folgten den Senken zwischen den gehobenen Gebieten und füllten diese mit alluvialem Material (KAYAN 1998).

In Abb. 8 wird die Entwicklung der Karamenderes-Ebene in den letzten 6000 Jahren dargestellt. Während eiszeitlich bedingter Regressionen im Holozän existierten der Bosphorus und die Dardanellen als Flüsse und der Karamenderes trat als Nebenfluß dieser großen Ströme auf. Dagegen wurden bei Meeresspiegelanstiegen in Interglazialen die Ebenen um Troia mit Meerwasser überflutet. Flachmarine Ablagerungen bildeten sich.

Bis vor 7000 Jahren lag die Küstenlinie in der Nähe von Pınarbaşı. Ausgedehnte Sumpfareale erstreckten sich in Folge in diesem Gebiet. Seit etwa 6000 Jahren liegt der Meeresspiegel, bis auf kleine Schwankungen, auf heutigem Niveau (KAYAN 1996, 2001). Wie in Abb. 8 ersichtlich, begannen Karamenderes und Dümrek in dieser Zeit, die flache Bucht schrittweise mit alluvialen Ablagerungen zu verfüllen. Diese Entwicklung dauert bis heute an.

Vor 5000 Jahren, zur Beginn der Besiedlung Troias, lag die Küste in der Nähe des Hissarlik. Eventuell hatte diese Tatsache Einfluß auf die Gründung der Siedlung. Es gibt Theorien, die den antiken Hafen Troias im Bereich der damals flachen Bucht vermuten.

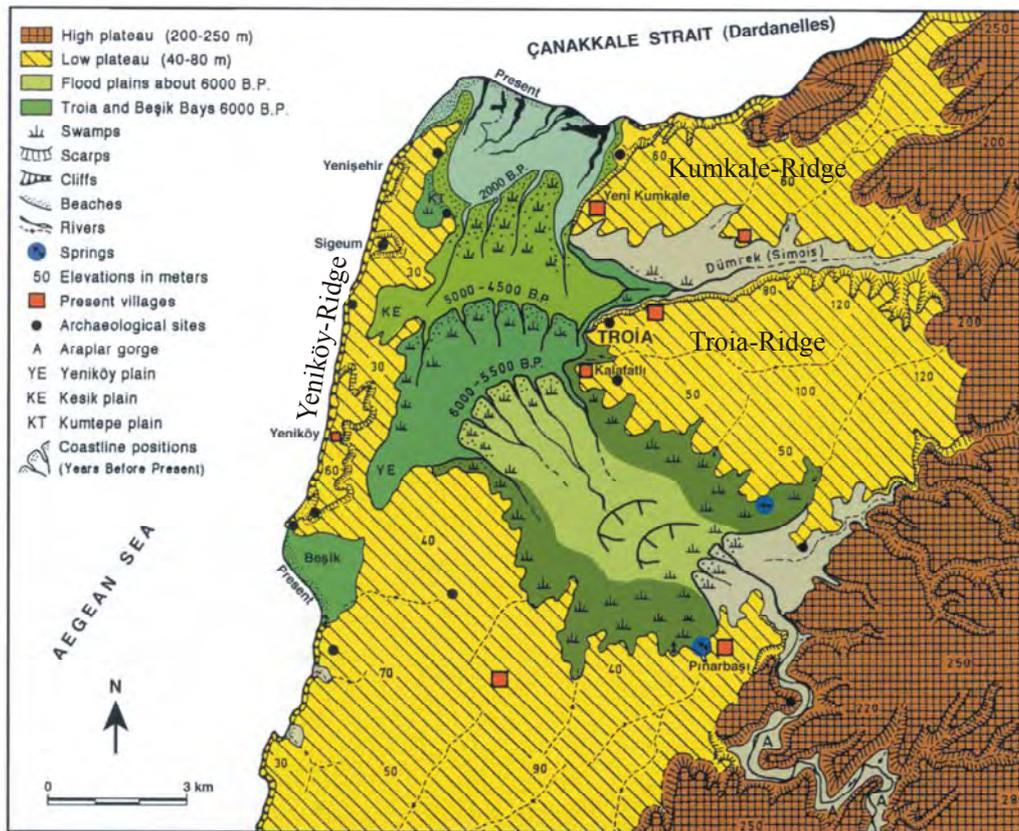


Abb. 8: Paläogeographische Rekonstruktion der Karamenderes-Ebene (nach KAYAN 2000).

4.8 Tektonik und Lagerungsverhältnisse (KB)

Durch zwei NE—SW-streichende Störungen wird der Troia-Rücken in drei Blöcke zerteilt. Entlang der Straße zwischen Çıplak und Halileli verläuft die westliche Störung, die Straße von Çanakkale nach Ezine wurde im Verlauf der östlichen Störung gebaut. Vermutlich sind die Blöcke nach Westen abgeschoben. Zwischen den Blöcken wurde mit Hilfe der stratigraphischen Profile von BERGMANN (2003) unterschiedliche Versätze festgestellt. Gegen den mittleren Block ist der westliche mit einem Betrag von etwa zehn Meter versetzt. Zwischen dem östlichen und dem mittleren Block ist die Verschiebung nicht quantifizierbar. Laut YALTIRAK (2002) steht im Osten des Gebietes die spätmiozäne Alçitepe-Formation an. Durch das flache Einfallen und die Konstruktion der Profile (BERGMANN 2003) wird deutlich, daß sich der mittlere um mehrere Zehnermeter gegen den Ostblock abgesenkt hat. Eine W—E-streichende Störung wurde in der Mitte des Troia-Rückens entdeckt. Vermutlich verlief der Fluß Çıplak entlang dieser Schwächezone und verfüllte sie zwischen Troia und Kalafat im Holozän mit alluvialen Ablagerungen. Ein Versatz von etwa zehn Metern an dieser Störung konnte durch einen markanten Stromatolithenhorizont im Gelände festgestellt werden. Als Resultat der Untersuchungen muß der Troia-Rücken in insgesamt sechs Blöcke unterteilt werden. Wahrscheinlich liegt die Basis der Störungen an der Grenze zum metamorphen Basement. Genauere Bezeichnungen und Beschreibungen der Störungen sind in BERGMANN (2003) zu finden.

Im Gebiet herrscht eine fast horizontale Lagerung der Schichten vor. Durchschnittlich fallen sie in einem flachen Winkel von $5-6^\circ$ nach WSW ein. Dabei entspricht das Einfallen der Blöcke dem der Schichten. Während der mittlere und der östliche Block steiler gestellt sind, fällt der westliche wesentlich flacher ein. Auch die Einfallsrichtungen schwanken stark, jedoch läßt sich eine Vorzugsorientierung von ca. 240° feststellen. Abb. 9 stellt die vor Ort gemessenen Fallrichtungen und -winkel im Schmidtschen Netz dar. Im Gelände war es oft nicht möglich, repräsentative Messungen aller Schichten durchzuführen, da einige Schichten unter den herrschenden Oberflächenbedingungen leicht lösliche Bindemittel enthalten, schwach verfestigt oder stark verwittert sind.

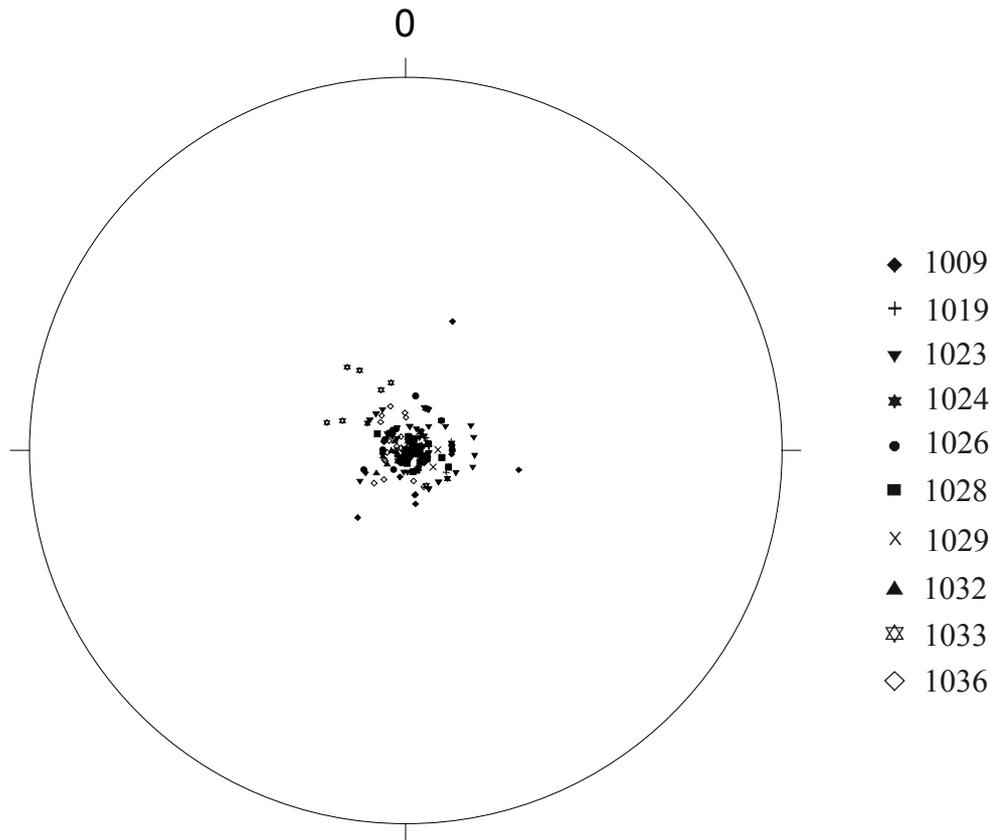


Abb. 9: Einfallen der Schichten in den Aufschlüssen 1009, 1019, 1023, 1024, 1026, 1028, 1029, 1032, 1033 und 1036 im Schmidtschen Netz, untere Halbkugel.

Bei der Messung der Klüfte wurde im Gelände das Vorhandensein einer Hauptkluftrichtung deutlich, in Abb. 10 sind die Klüftrosen der gemessenen Trennflächen dargestellt. Dabei variieren die Werte zwischen 120° und 160° und mit einem Winkel von 80 bis 90° fallen die Klüfte annähernd vertikal ein. Allerdings sind aufgrund der geringen Wertemenge (teilweise fünf oder sechs Werte) kaum gesicherte Rückschlüsse möglich. Schwierig ist auch die Interpretation der Trennflächen als Klüfte, da durch fehlende Bohrungen auf dem Troia-Rücken nicht belegt ist, ob es sich dabei zum Teil um Trockenrisse oder Verwitterungsbildungen handelt.

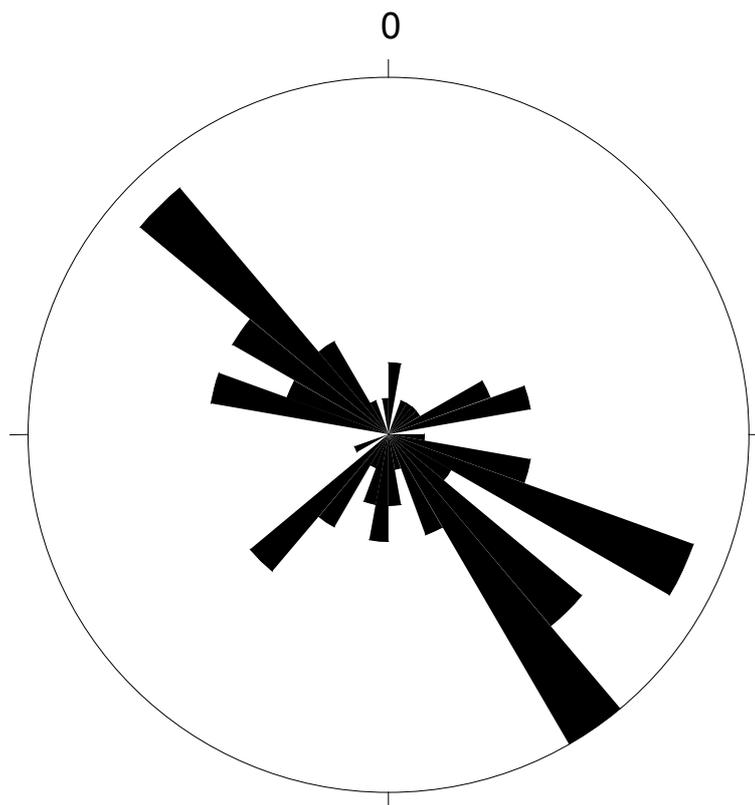


Abb. 10: Einfallen der Klüfte der Aufschlüsse 1023, 1024, 1029, 1033, 1035 und 1036 im Rosen-Diagramm, 10° Klassen.

4.9 Hydrogeologische Verhältnisse (KB)

In Zusammenhang mit der vorliegenden Kartierung untersuchten BLUME und WEBER das Gebiet unter hydrogeologischen Gesichtspunkten. Dabei wurde von BLUME ein hydrogeologisches Modell der nordwestlichen Troas erstellt, während WEBER die Grundwässer hydrochemisch untersuchte und einteilte. Im Untergrund des Troia-Rückens befinden sich karbonatische, tonig-schluffige und sandige Gesteine von denen aufgrund ihrer Petrographie niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte angenommen werden. Vermutlich sind die Gesteine insgesamt schlechte Grundwasserleiter oder bilden Geringleiter. Einige Sandschichten lassen höhere k_f -Werte erwarten und könnten somit Grundwasserleiter darstellen. Da die Schichten in einem flachen Winkel nach WSW einfallen, wird vermutlich auch der Troia-Rücken in diese Richtung entwässert. Vereinzelt wurden in den Profilen am Nordhang des Rückens natürliche Wasseraustritte beobachtet. Diese liegen in Bereichen stark verwitterter Biogenkalke mit herausgelösten Fossilienresten in Wechsellagerung mit dünnen Tonsteinen und mächtigeren Sandsteinen. Oft sind diese Schichten an ihrem Moosbewuchs erkennbar. Am Profil 1009 konnten an einer natürlichen Quelle Bearbeitungsspuren entdeckt werden, die laut Auskunft der Bevölkerung von einem früheren Ausbau der Quelle stammen. Gesondert untersucht wird von LIPPMANN (2003) die vermutlich wasserführenden Schichten der Quelhöhle südwestlich Troias.

Von den Flüssen Dümrek und Karamenderes, die das Gebiet am Nord- bzw. am Süd- und Westrand durchfließen, werden die hydrographischen Verhältnisse bestimmt. In den nördlichen Ausläufern des Kazdağ-Massivs (Ida-Gebirge) entspringt der Karamenderes. Er durchquert das Ezine-Bayramiç-Becken von Osten nach Westen und fließt in nördlicher Richtung durch eine alluviale Ebene in die Dardanellen. Im Salihler-Plateau entspringt der Dümrek und bildet auf dem Weg zu den Dardanellen ebenfalls eine alluviale Ebene aus. Durch die Troia-Ebene floß bis vor wenigen Jahrzehnten der Çıplak-Fluß. Dieser fließt heute auf einem weiten Stück nicht mehr, da durch die intensive Landwirtschaft und Grundwassernutzung der Grundwasserspiegel stark absank.

5 AUFSCHLUSSDOKUMENTATION

5.1 Geländearbeit (KB)

Zur Kartierung wurden folgende Hilfsmittel verwendet:

Zollstock

A5-Heft kariert mit festem Einband

Fotoapparat

Garmin GPS 12 (UTM-Zone 35, nördliche Hemisphäre, WGS 84)

Freiberger Geologenkompaß (nach Prof. Dr. Clar)

Lupe mit 10facher Vergrößerung

Geologenhammer

Als Grundlage für die Kartierung dienten Landsat-Karten der Biga-Halbinsel. Bei der ersten Geländebegehung wurde festgestellt, daß sich die meisten Profile am Nordhang des Troiarückens befinden. Durch den Bau der Straße zwischen Ezine und Çanakkale wurden mehrere Hügel im Kartiergebiet zerschnitten, wodurch drei Straßenaufschlüsse entstanden.

In großen Arealen des Gebietes stehen nur zentimeter- bis maximal dezimeter-mächtige Aufschlüsse an den Rändern der Felder an. Oft sind diese noch von Hangschutt überrollt. In den Profilen sind hauptsächlich Tonsteine, Ton/Sandsteine, Mergel und Kalksteine aufgeschlossen. Selten sind dünne Schluffsteine anzutreffen. Da es auf dem Troiarücken kaum Profile gibt, wurde versucht, markante und lateral verfolgbare Horizonte zu finden. Dazu eigneten sich die kompetenten Stromatolithenschichten. Jedoch treten vier Stromatolithen auf, die im Gelände nahezu die gleiche Ausbildung zeigen. Strukturelle Veränderungen einzelner Stromatolithenlagen (domartige Ausbildungen, gröbere klastische Lagen) können zu Verwechslungen führen, lassen sich aber durch laterale Änderungen im Ablageungsmilieu erklären. Dies erschwert eine Verfolgung des Markerhorizontes erheblich. Im Osten des Nordhanges fand sich ein kompetenter, grober, bunter Sandstein, der über den östlichen Nordhang bis zur Straße Ezine/Çanakkale verfolgbar ist. Danach taucht die Schicht unter die quartären Ablagerungen ab.

Von allen Profilen wurden Detailaufnahmen angefertigt. Eine Gliederung der Sedimentabfolgen in den Profilen ist im Gelände nicht möglich, da die Schichten lateralen Änderung und Faziesverzahnungen unterworfen sein können. Zur Charakterisierung eines Horizontes während der Profilbeschreibung gehören Farbe, Korngröße, Kompetenz, Klüftung, Organikgehalt, Fossilführung und sedimentologische Strukturen. Weiterhin wurden die aufgenommenen Schichten im Gelände auf ihren Karbonatgehalt mit 10 %iger HCl getestet. Insgesamt wurden 54 Sedimentschichten aus unterschiedlichen Profilen beprobt. Ziel war es, ein umfassendes Bild über die Ablagerungsverhältnisse und die Eignung der Schichten als Grundwasserleiter oder Grundwassernichtleiter zu ermitteln. In den Diplomarbeiten von BERGMANN und LIPPMANN sind die Methoden und Ergebnisse, sowie deren Interpretationen im einzelnen dargestellt.

5.2 Aufschlüsse (KB)

Tab. 2: Liste der Aufschlüsse (Lage, Hoch- und Rechtswert Anhang 1).

| Ausfluß- nummer | Beschreibung der Aufschlußlokalität |
|--------------------|---|
| 1009 | Wasserriß nordöstlich von Tefikiye |
| 1013 | trockenes Bett des Çıplak-Flusses südlich von Gökçalı |
| 1019 | nördlicher Straßenaufschluß an der neuen Straße Gökçalı bzw. zwischen Ezine/Çanakkale |
| 1020 | mittlerer der drei Straßenaufschlüsse an der neuen Straße Gökçalı bzw. zwischen Ezine/Çanakkale |
| 1021 | südlicher Straßenaufschluß an der neuen Straße Gökçalı bzw. zwischen Ezine/Çanakkale |
| 1022 | Wasserriß nördlich von Gökçalı |
| 1023 | Wasserriß östlich der neuen Straße Gökçalı |
| 1024 | Straßenaufschlüsse entlang der alten Straße von Gökçalı |
| 1026 | Wasserriß östlich von Gökçalı |
| 1027 | Wasserriß am Nordhang des Neogenplateaus zwischen 1026/1023 |
| 1028 | Wasserriß nordwestlich der neuen Straße von Gökçalı |
| 1029 | Wasserriß zwischen der neuen Straße von Gökçalı und der Straße Çıplak/Haleleli |
| 1030 | Wasserriß zwischen Çıplak und Halileli |
| 1031 | Wasserriß westlich der neuen Straße zwischen Çıplak/Halileli |
| 1032 = | Wasserriß westlich von 1031 westlich der neuen Straße zwischen |
| 1035 | Çıplak/Halileli |
| 1033 | Straßenaufschluß an der neuen Straße zwischen Çıplak/Halileli |
| 1034 | Graben auf dem Troia-Rücken östl. der Straße zwischen Çıplak/Halileli |
| 1036 | Quellhöhle südwestlich der Ausgrabungstätte Troia |
| 1037 | Wasserriß am Nordhang des Neogenplateaus mit Wasseraustritt |
| 1038 | Kiesgrube in der Quartärebene, westlich von der Siedlung Dümrek |
| 1040 | Südostseite des Berges südwestlich von Akçapınar |

5.3 Probenstücke (KB)

Tab. 3: Liste der Probenstücke mit Gesteinsbezeichnung, Mächtigkeit, angewandte Methoden; WL = Wechsellagerung, SA = Siebanalyse, DS = Dünnschliff, RD = Röntgendiffraktometrie.

| Probennummer | Lithologie | Mächtigkeit [cm] | SA | DS | RD | erläutert bei |
|--------------|-----------------------|---------------------|----|----|----|------------------|
| 1019-6 | Sandstein | 20 — 43 | | x | | KB |
| 1019-8 | Sandstein mit Schill | 38 | x | | | KB |
| 1019-16 | Sandstein | 150 | x | x | | KB |
| 1019-26 | Tonstein-Sandstein-WL | 130 | x | | | KB |
| 1019-37 | Schlufftonstein | 20 | | | x | KB |
| 1019-42 | Tonkalkstein, salzig | 57 | x | x | x | KB |
| 1019-51 | Tonstein | 100 | x | | x | KB |
| 1019-67 | Tonstein-Sandstein-WL | 110 | x | | | KB |
| 1019-87 | Sandstein | 210 | x | x | | KB |
| 1019-97/89 | Tonstein-Sandstein-WL | 115 | x | x | | KB |
| 1019-103 | Kalkstein | 30 | | x | | KB |
| 1019-105 | Kalkstein | 75 | | x | | KB |
| 1019-114 | Sandstein | 100 | x | | | KB |
| 1019-115 | Kalkstein | 100 | | x | | KB |
| 1019-117 | Kalkstein | 20 — 25 | | x | | KB |
| 1021-1 | Tonkalkstein | 30-35 | x | | | KB |
| 1021-2 | Sandkiesstein | 220 | x | | | KB |
| 1022 | Kalkstein | 20 — 30 | | x | | KB |
| 1023 | Tonstein-Sandstein-WL | 105 | x | | | KB |
| 1024 | Kalkstein, versintert | 110 | | x | | KB |
| 1026-1 | Toniger Sandstein | 10 | x | | | KB |
| 1026-2 | Feinsandstein | 12 | | x | | KB |
| 1026-3 | Sandstein | 60 | | x | | KB |
| 1029-1 | Kalkstein | 120 | | x | | KB |
| 1030-4 | Biogenkalkstein | 9 | | x | | KB |
| 1033-8 | Stromatolith | 30 | | x | | KB |
| 1035-4 | Biogenkalk | 80 | | x | | KB |

| Probennummer | Lithologie | Mächtigkeit [cm] | SA | DS | RD | erläutert bei |
|--------------|------------------------|---------------------|----|----|----|------------------|
| 1036-1 | Tonschluffstein | 15 | x | | x | PL |
| 1036-2/1 | Tonschluffstein | 50 | x | x | | PL |
| 1036-2/2 | Tonschluffstein | 50 | | | x | PL |
| 1036-3a/1 | Tonstein | 20 | x | | | PL |
| 1036-3a/2 | Tonstein | 20 | | | x | PL |
| 1036-3b | Tonstein | 45 | x | | | PL |
| 1036-4/1 | Tonstein | 13 | | | | PL |
| 1036-4/2 | Tonstein | 13 | x | | x | PL |
| 1036-4/3 | Tonstein | 13 | | | | PL |
| 1036-5 | Tonschluffstein | 0 — 40 | x | x | | PL |
| 1036-6/1 | Sandstein | 70 | x | | | PL |
| 1036-6/2 | Sandstein | 70 | | | | PL |
| 1036-7 | schluffiger Sandstein | 10 | | x | | PL |
| 1036-8 | Sandstein | 60 | | x | | PL |
| 1036-9 | toniger Sandstein | 120 | x | | x | PL |
| 1036-10 | Tonstein | 20 | x | | | PL |
| 1036-11 | Biogenkalk | 10 | x | | | PL |
| 1036-12 | Oolithischer Sandstein | 240 | | x | | PL |
| 1037-1 | Tonstein | 80 | x | | x | KB |
| 1037-2 | Kalkstein, schillreich | 18 | | x | | KB |
| 1037-5 | Tonkalkstein | 60 | x | | x | KB |
| 1037-6 | Tonstein | 3 | x | | | KB |
| 1037-7 | Sandstein | 10 | x | | | KB |
| 1037-8 | Biogenkalk | 130 | | x | | KB |
| 1038-1 | Sandstein | > 250 | x | | | KB |
| 1038-2 | Sandstein | 350 | x | x | | KB |
| 3004-2 | Basalt | 4000 | | x | | KB |

Die in der Tabelle aufgeführte Aufschlußnummer 3004 beruht auf der Bezeichnung der Bearbeiterinnen Blume & Weber (2003). Analysen und Ergebnisse der Probenaufbereitung sind bei Bergmann (2003), bzw. bei Lippmann (2003) für den Aufschluß 1036, beschrieben.

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Institut für Geologie

Studiengang Geologie



Diplomarbeit

Geowissenschaftlich-Montanistische Untersuchungen an der Quelhöhle ("KASKAL.KUR") Troias

vorgelegt von

cand.-geol. Pia Lippmann

betreut von

Prof. Dr. Broder Merkel

und

Dr. Christian Wolkersdorfer

TU Bergakademie Freiberg

Institut für Geologie

Lehrstuhl für Hydrogeologie

6 ZIELSTELLUNG

Schon SCHLIEMANN fand 1879 bei seinen Grabungen südwestlich der historischen Stätte Troia eine Höhle, deren Wasseraustritte er mit den von HOMER beschriebenen warmen und kalten Quellen in Verbindung brachte (Ilias XXII V. 147). Seit 1997 wird sie nun unter der Leitung von Manfred Korfmann archäologisch erschlossen. Daß es sich hierbei um eine künstliche Höhle handelt, kann an Abbauspuren zweifelsfrei belegt werden. Vor ca. 5000 Jahren wurden erste Teile davon in das anstehende Sedimentgestein gegraben. Kanäle, Tonröhren, Brunnen und Becken im Inneren der Höhle deuten ebenso auf eine Funktion als Wasserspeicher und -leitung hin wie die an den Höhlenwänden teilweise sichtbaren Sinter und Wasserstandsmarken.

Mit Hilfe geowissenschaftlicher Untersuchungen soll die Fragen nach der Nutzung der Höhle zur Wassergewinnung geklärt werden. Dafür wurden sowohl in der Höhle selbst als auch in der näheren Umgebung die anstehenden Schichten dokumentiert. Es handelt sich dabei um eine Abfolge leicht verfestigter Ton-, Schluff-, Sand- und Kalksteine, welche direkten Einfluß auf die Wasseransammlungen in der Quelhöhle haben. Um die Durchlässigkeitsbeiwerte des Gesteins zu bestimmen, wurden zwölf Proben entnommen und an der TU Bergakademie Freiberg unter sedimentologischen Gesichtspunkten analysiert. Dafür wurden die Methoden der Korngrößenanalyse und der daraus resultierenden Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes sowie der Beschreibung des Modalbestandes des Materials, der Dünnschliffmikroskopie und der Röntgendiffraktometrie an den jeweils dafür geeigneten Probensubstanzen angewandt.

Vor Ort erfolgte die Bestimmung physikochemischer Parameter des Wassers der Höhle an verschiedenen Meßpunkten. Des weiteren wurde die Schüttung der Höhle bestimmt. Auswertungen und Interpretationen der ermittelten Werte wurden ebenfalls in Freiberg durchgeführt und sind Teil dieser Arbeit. An Hand der Resultate der Untersuchungen wird erläutert, welche Schichten als Grundwasserleiter oder -nichtleiter geeignet sind und wie das Wasser in der Höhle transportiert wird.

Auf Grundlage geodätischer Vermessungen wird das Fassungsvermögen der Höhle berechnet und die maximale Wassermenge ermittelt, welche durch die Gesteine in die Höhle eindringen kann.

Letztendlich wird versucht, eine Interpretation der Quelhöhle bezüglich ihrer Funktion zu entwickeln.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Vor ca. 5000 Jahren wurden im Südwesten der Siedlung Troia erste Teile einer Höhle in die neogenen Sedimentgesteine gegraben. Seit 1998 wird sie von einem internationalen Grabungsteam erschlossen. Sie gliedert sich in einen Hauptgang und 3 Nebenarme, welche in unterschiedlichen Epochen aufgeföhren wurden, vier bislang bekannte Schächte verbinden die Höhle mit der Erdoberfläche. Um ihre archäologische Bedeutung im Hinblick auf die Wasserversorgung der historischen Stätte zu klären, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die anstehenden Gesteine dokumentiert und ihre potentiellen Durchlässigkeitsbeiwerte eingeschätzt. Dafür wurden die Gesteine mittels Korngrößenanalyse, Dünnschliffmikroskopie und Röntgendiffraktometrie untersucht und der Modalbestand mikroskopisch erfaßt. Es handelt sich um eine etwa 3 m mächtige Abfolge toniger Schluffsteine mit sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwerten, überlagert von ca. 0,6 m feinkörnigem, dichtem Sandstein. Die Grenze zum darüberliegenden Kalkstein markiert die Firste in einigen Teilen der Höhle. Zudem treten an diesem Übergang Sinterbildungen auf. Ein oolithischer Sandstein mit einer Mächtigkeit von 6 — 7 m und einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-5} m/s stellt den Grundwassergeringleiter dar, aus dem das Wasser der Quelhöhle stammt. Messungen der Schüttungsmengen der Quelhöhle ergaben durchschnittliche Abflußmengen von 0,5 L/min. Weiterhin wurden Temperatur, Leitfähigkeit, Gesamtmineralisation, pH-Wert und Redoxpotential des Wassers an verschiedenen Stellen der Höhle bestimmt, woraus sich eine Ähnlichkeit aller beprobten Wässer ergab und der Eintrag des Wassers aus einer gemeinsamen Schicht belegt wird.

Da die Brunnen unter den Schächten 2 und 4 bis in einen zweiten Grundwasserleiter abgeteufert wurden, tritt zusätzlich Wasser in die Höhle ein. Jedoch entspricht der Zufluß in etwa dem Abfluß des Wassers in diesem Bereich, so daß der Wasserhaushalt in der Höhle nur geringfügig beeinflusst wird.

Es konnte keine direkte Verbindung der Quelhöhle mit dem römischen Aquäduktsystem nachgewiesen werden, ebenfalls handelt es sich nicht um ein Qanatsystem. Der Bau der Höhle zum Zweck der Wasserversorgung ist nicht nachweisbar, vielmehr deuten flache Kanäle und Rinnen der ersten Bauphasen auf geringe Wassermengen hin, welche aus der Anlage geleitet wurden. Später erfolgte die Verbindung des Höhlensystems mit einem bestehenden Brunnen und der Ausweitung in südöstliche Richtung. Erst zur römischen Zeit erfolgte die Anlegung von Staumauern innerhalb der Höhle sowie mehrerer Becken außerhalb, weshalb die Nutzung als Wasserspeicher angenommen werden kann.

SUMMARY

About 5000 years ago a cave was dug into the neogene sediments southwest of the settlement of Troia. Since 1998 this cave is made accessible due to the work of an international excavation team.

It consists of one main corridor and three branches which were dug during different ages. Four shafts connect the interior of the cave with the earth surface. For a better understanding of the archaeological background, particularly the water supply of the ancient city, the outcropping rocks were characterised and their potential hydraulic conductivity was estimated. Therefore, the grain-size distribution of the rocks was ascertained, and thin sections, x-ray diffractometry as well as microscopical investigations of the sieved material gave conclusions of the modal compositions of the rock samples. The results show that there is a 3 m thick sequence of clayey siltstones with low grades of hydraulic conductivity, overlain by ca. 0,6 m finegrained, massive sandstone. The border to the following limestone (0,1 m) marks the roof of the corridors in several parts of the cave and in addition, sinters occur at this lithological change. The aquifer which supplies the water to the cave was characterised as an oolitic sandstone with a thickness of 6 — 7 m and an approximated hydraulic conductivity of 10^{-5} m/s.

Measurements of the outflow from the cave show average amounts of 0,5 L/min. Temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, pH-value and redox potential were measured at different locations in the cave and the similar values prove the origin of the water at this places from one common aquifer. Under shafts 2 and 4, wells were dug into deeper strata and penetrate an lower aquifer, but its water does not directly influence the amount of outflowing water or the physical and chemical parameters of the water at the measuring points.

A connection to the roman aqueduct system could not be verified and the cave is not part of a qanat. The meaning of the cave concerning the water supply is not established for all epochs of settlement in Troia. Flat channels inside the cave prove that there have been small amounts of water which were transported out of the system at least in the first periods. Later the expansion in south-eastern direction and the connection with the preexisting well (shaft 4) took place. In roman and byzantine times (85 BC — 5th century AD) walls for accumulating water and basins in front of the cave were made and they show the utilisation of the cave for the water supply.

8 DIE QUELLHÖHLE

8.1 Der Name KASKAL.KUR

In einem Vertrag des hethitischen Großkönigs Muwatalli II mit Alaksandu von Wilusa von 1280 v.u.Z., welcher den Vasallenstatus des Landes Wilusa begründet, werden Götter als Zeugen genannt. Während die Eidgötter der Hethiter 26 Zeilen füllen, werden für Wilusa nur drei Götter namentlich erwähnt. Neben dem Wettergott der Armee und Apaliunas, welcher mit Apollon gleichgesetzt wird, spielt ein dritter Gott namens KASKAL.KUR eine Rolle (KORFMANN 1998). Dieser sumerische Begriff (HANSEN 1998) diene als Bezeichnung für unterirdische bzw. verschwindende und wieder auftauchende Wasserläufe, wie sie in Karstgebieten auftreten. KASKAL wird mit „Weg“ oder „Tunnel“ übersetzt, KUR bedeutet „Unterwelt“ oder „unter der Erde“ (KORFMANN 1998).

Der Begriff KASKAL.KUR findet ähnliche Verwendung wie der türkische Begriff „düden“ (HANSEN 1998), der u.a. für eine Quelle 5 km südlich der Ausgrabungsstätte Troia verwendet wird.

Die Entdeckung der Quellhöhle und die erläuterte Assoziation mit dem Vasallenvertrag Wilusas gibt neben anderen Argumenten Anlaß zur Vermutung, daß die Lokalität Wilusas mit der Troias identisch ist. Einen weiteren Hinweis auf diesen Zusammenhang sehen KORFMANN (1998, 1999, 2000) und LATACZ (2001) in der Ähnlichkeit der Namen (W)Ilios und Wilusa.

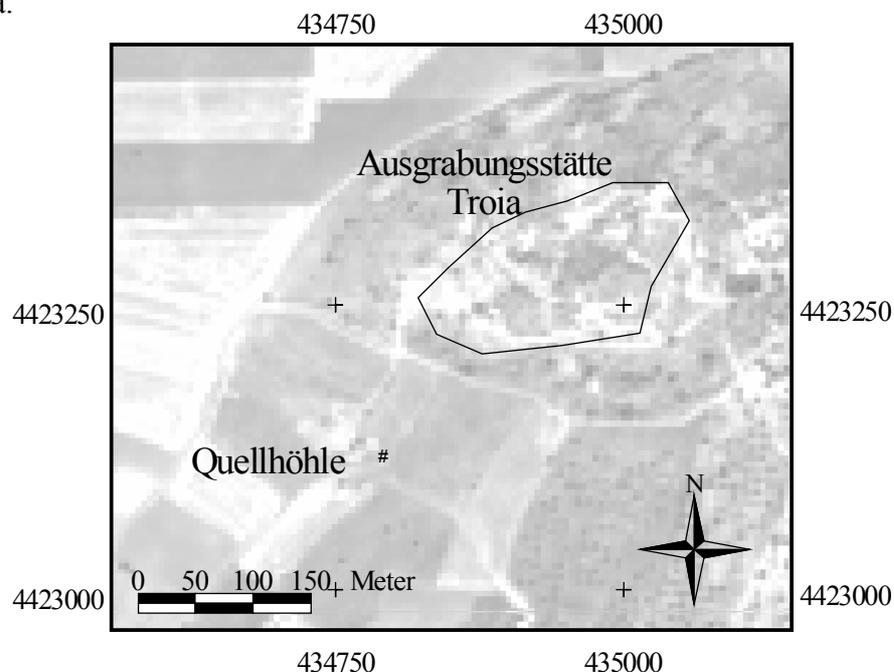


Abb. 11: Lage der Quellhöhle südwestlich der Ausgrabungsstätte Troias auf dem Hissarlık. Basierend auf Ikonos-Daten, Koordinatensystem UTM Zone 35 WGS 84, Maßstab 1:5000.

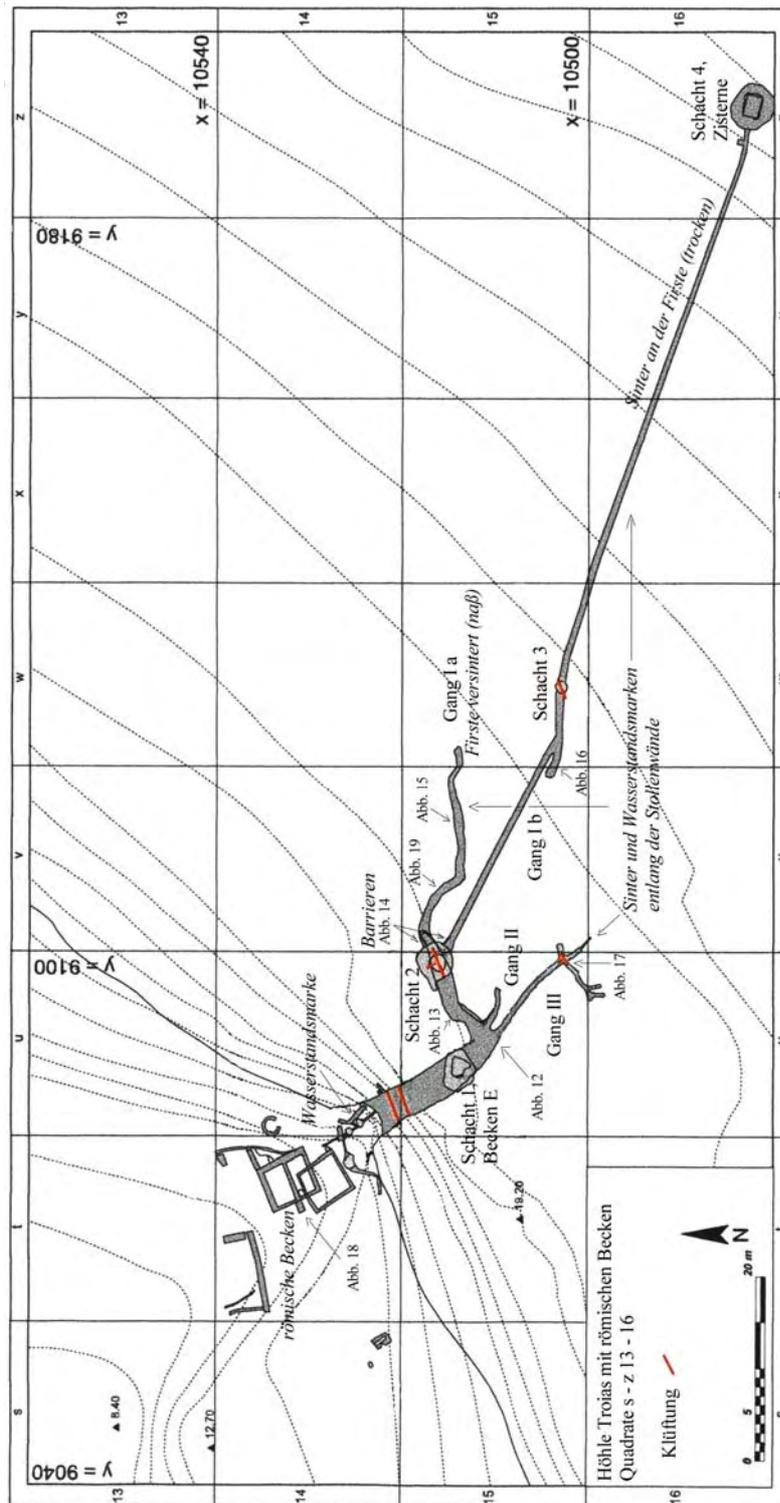


Abb. 12: Plan der Höhle mit römischen Becken vor dem Höhleneingang mit Kennzeichnung der Meßpunkte, sichtbaren Klüftungen, Sintern und Wasserstandsmarken sowie Lage der Fotomotive. Koordinatensystem nach DÖRPFELD (Bezugspunkt: Schwellenstein des Propylon II C in der Ausgrabungsstätte).

8.2 Beschreibung der Höhle

Abb. 11 zeigt die Lage der Quelhöhle südwestlich der Ausgrabungsstätte Troias und die Aufteilung der Höhle in einen Hauptgang und drei Nebenarme ist in Abb. 12 dargestellt. Außerdem sind die römischen Becken sowie Sinterbildungen, Wasserstandsmarken, Klüftungen und die Lage der in dieser Arbeit dargestellten Fotomotive darin verzeichnet. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente auf der Basis von Einträgen in Grabungstagebüchern, publizierten Berichten und eigenen Beobachtungen beschrieben.

SCHLIEMANN (1884) beschreibt den Hauptgang als „3 m breiter, 1,68 m hohen Gang“. Bei den Vermessungen der Höhle durch das aktuelle Grabungsteam wurde eine Höhe von 2 m ermittelt. Die Differenz kann durch Erosionseffekte erklärt werden. ENE—WSW-gerichtete Klüfte sind im Hauptgang in der Nähe des Eingangs in einer Sandsteinschicht erkennbar. Keramikfunde belegen die Nutzung der Anlage in vorderen Bereich der Höhle in römischer und byzantinischer Zeit (KORFMANN 1999).

Ca. 10 m hinter dem Eingang befindet sich ein vertikaler Schacht, der den Höhlengang mit der Erdoberfläche verbindet. Dieser von SCHLIEMANN (1884) als Licht- und Luftzugang interpretierte Schacht 1 hat einen Durchmesser von ca. 1 m. Darunter wurde ein Becken mit 180 cm Länge und 90 cm Breite in „weißem Lehm“ (Grabungstagebuch 2000) abgeteuf. Im mittleren Bereich ist das Becken E 35 cm tief, es ist mit Wasser gefüllt. Mittels Multiparametersonde (Diver®) wird seit 31.07.2002 die Temperatur des Wassers im Becken in regelmäßigen Abständen gemessen. Entlang der SW-Wand des Korridors verläuft ein 5 bis 7 cm tiefer, 7 bis 12 cm breiter Kanal, welcher Wasser aus den hinteren Bereichen der Höhle über das Becken E zum Höhlenausgang leitet.

18 m hinter der Eingangsmauer teilt sich der Hauptgang in 3 Arme, die sich nach NE, ESE bzw. SE erstrecken. In Abb. 13 sind die Gänge II und III vom Hauptgang aus gesehen dargestellt. Der nordöstliche Gang kann als Verlängerung des Hauptganges angesehen werden. Er ist in Richtung der im Hauptgang auftretenden Klüfte orientiert. Eine „Wasserleitung sehr primitiver Art“ wird von SCHLIEMANN (1884) am Boden dieses Ganges beschrieben. Sie ist mit „unbearbeiteten, ohne Mörtel zusammengesetzten Kalksteinen“ (SCHLIEMANN 1884) eingefasst und in Abb. 14 erkennbar. KORFMANN (1998) erkennt Ähnlichkeiten zu einem Kanal der Periode VII a im südlichen Tor der Burganlage. Über der Wasserleitung verläuft ein Tonrohr, welches aus der äolischen Periode stammt und ebenfalls zum Wassertransport benutzt wurde.



Abb. 13: Abzweig der Gänge II (links) und III (rechts) vom Hauptgang aus, Blick in südöstliche Richtung. Höhe der Gänge ca. 1,60 m.



Abb. 14: Gang I a zwischen dem Hauptgang und Schacht 2, abgedeckter Kanal an der Sohle. Höhe des Ganges ca. 1,30 m.

10 m nach dem Abknicken des Seitenarmes wurde ein zweiter Schacht abgeteuft. Sein Durchmesser beträgt ca. 1,2 m und der Querschnitt ist annähernd rund. Im Bereich des Schachtes ist das NE—SW-orientierte Kluftsystem in derselben Sandsteinschicht wie im Hauptgang erkennbar. Unter Schacht 2 befindet sich ein Brunnen mit einem Durchmesser von 1,65 m. Bei den Ausgrabungen im Jahre 2000 stauten sich über Nacht 0,6 bis 1,2 m Wasser an, was einem Volumen von 1,3 bis 2,6 m³ entspricht. Der Brunnen wurde bis auf ein Niveau von 8,82 m über Normalnull, also ca. 5,40 m tief erschlossen. Bislang wurden keine Parameter des Wassers im Brunnen ermittelt.

Hinter dem Schacht teilt sich der Gang in 2 kleinere Stollen. Die Eingänge sind mit Mauern aus römischer Zeit weitgehend blockiert, ein Spalt zwischen Mauer und Höhlenfiste erlaubt den Zugang zu den dahinter liegenden Stollen (Abb. 15). Die Blockaden verhindern weitgehend das Abfließen des Wassers, so daß es in den Gängen I a und I b während der Grabungsperiode 2002 etwa 0,5 m hoch stand. Eine Metallverrohrung wurde 2001 in die Mauer, welche Gang I b abtrennt, eingebracht. Dort wurden im wesentlichen die Messungen der physikochemischen Parameter und des Durchflusses durchgeführt, da fast das gesamte in der Höhle abfließende Wasser aus diesem Bereich stammt.



Abb. 15: Zugang zu Gang I a über Barrieren der römischen Epoche unter Schacht 2. Maßstab: eingeklappter Zollstock im linken Bildbereich.

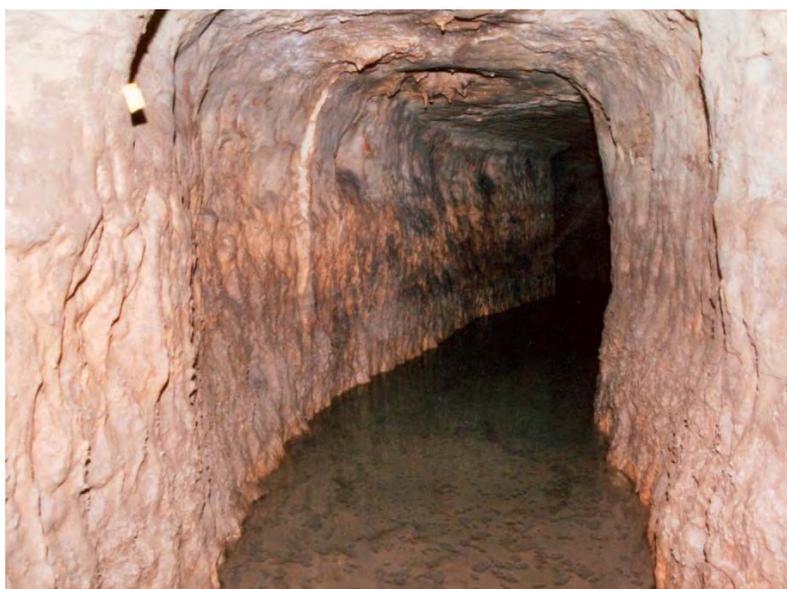


Abb. 16: Sinterbildungen an den Wänden von Gang I a, Blick nach Südosten.

Gang I a erstreckt sich von Schacht 2 aus zunächst in nordöstliche Richtung und beschreibt einen Bogen nach SE, bevor er sich schließlich nach E windet. Seine Länge beträgt 25 m und er ist breiter und flacher angelegt worden als die Gänge II und III; Abb. 16 zeigt den Querschnitt des Ganges mit Sinterbildungen an den Wänden. Aus geologischer Sicht sind keine Gründe erkennbar, aus denen der Vortrieb an dieser Stelle unterbrochen wurde. Bei 14,46 m über Normalnull wurde der Wasserspiegel eingemessen und fast im gesamten Gang ist Wasser anzutreffen. Nur die letzten 7 m des Ganges sind trocken, da das Höhenniveau in diesem Bereich höher liegt. Im vorderen Teil ist Deckenkolk zu erkennen, im hinteren haben sich Stalaktiten ausgebildet. In diesem Gang wurde am 07.08.1999 die Wassertemperatur mit 15 °C bestimmt.

Mit einer Höhe von 1,30 m und einer Breite von 0,85 m an der Firste bzw. 0,75 m an der Sohle bietet der Gang, welcher von Schacht 2 aus in südöstliche Richtung getrieben wurde, Platz für eine Person, seine Länge beträgt 25 m. Die Firste befindet sich weitgehend an der Grenze zwischen dem Sandstein und dem festeren Kalkstein. An dieser Schichtgrenze tritt Wasser aus. Im Gang wurde der Wasserspiegel bei 15,15 m über Normalnull angetroffen und die Wassertemperatur betrug vom 25. bis 28.08.01 ca. 18 °C. Während der Grabungsperiode 2002 lag der Gang weitgehend trocken, nur im Bereich hinter der Barriere, die den Gang von der Vorkammer des Schachts 2 abtrennt, sowie in der Zisterne unter Schacht 4 bzw. in der dazugehörigen Vorkammer stand das Wasser.

Im beschriebenen Stollen ist die Auffahrriichtung anhand der Schrämspuren ableitbar. Diese sind besonders in der Sandsteinschicht anzutreffen. Der Höhlengang erstreckt sich geradlinig nach 130° Südost, bevor er in einem flachen Winkel auf einen W—E-streichenden Gang trifft. Die Schrämspuren der beiden Abschnitte sind gegenläufig und der W—E-verlaufende Stollen überragt den NW—SE-gerichteten um ca. 1 m, er ist in Abb. 17 dargestellt. Diese Tatsachen werden als Hinweis angesehen, daß das System in diesem Bereich im Gegenortbetrieb ausgebaut wurde (WOLKERSDORFER 2001). Ausgangspunkt für den von ESE nach WSW aufgefahrenen Gang ist eine weitere Verbindung zur Erdoberfläche, welche als Schacht 3 bezeichnet wird. Mit einem ovalen Querschnitt – die Wände sind 2,04 bzw. 1,80 m voneinander entfernt – ist dieser Schacht der einzige in der Quelhöhle, unter dem sich kein Wasserspeicher befindet. Ein 0,56 bis 0,65 m breiter Wasserkanal ist unterhalb des Schachtes erhalten und die Sohle befindet sich ca. 0,27 m höher als in den südöstlichen Bereichen der Höhle.



Abb. 17: Blinder Stollen im Gang I b zwischen Schacht 2 und 3, von Schacht 3 aus gesehen.

Ausgehend von Schacht 3 führt ein 72 m langer Gang nach 125° Südost. Seine Höhe beträgt 1,60 m bei einer Breite von 0,50 m an der Firste und 0,20 m an der Sohle. In der Nähe von Schacht 4, welcher den Stollen im SE begrenzt, ist der Gang 1,30 m hoch und 0,65 m bzw. 0,40 m breit. Anhand der Schrämspuren läßt sich die Auffahrriichtung von Schacht 3 zu Schacht 4 rekonstruieren. Entlang des Ganges ist ein Wasserstandslinear erkennbar und im südöstlichen Abschnitt befinden sich trockene Sinter an der Firste.

Eine 2,15 m hohe und 2,00 m breite Vorkammer stellt den Übergang vom Gang zu Schacht 4 dar. Dieser Schacht mißt an der Erdoberfläche 2,40 m Länge und 1,70 m Breite, wobei der Querschnitt nach unten größer wird. Die maximale Entfernung der Schachtwände beträgt 2,70 m x 2,00 m. Sichtbare Wasserstandmarken existieren im Bereich der Vorkammer bei 14,72 müNN und bei 15,50 müNN im Schacht. Aufgrund der Sinterbedeckung ist der Querschnitt des Schachtes teilweise auf 1,40 m verengt.

Unter Schacht 4 wurde eine fast runde Zisterne errichtet. Diese hat im oberen Bereich einen Durchmesser von ca. 5 m und die Wände fallen mit 16° Neigung nach unten ein. Der Wasserspeicher ist im Jahre 2001 bis auf ein Niveau von 12,07 m über Normalnull ausgegraben worden, nach den Ergebnissen von Bohrungen liegt die untere Grenze mindestens drei Meter tiefer und ein Volumen von ca. 60 m³ ergibt sich aus den Meßdaten, wobei zum momentanen Stand der Ausgrabungen etwa 33 m³ erschlossen und mit Wasser gefüllt sind. Während der Erschließung kam es zu Wassereinbrüchen sowohl aus dem Gang als auch aus den anstehenden Schichten und ein Auspumpen war an den entsprechenden Tagen (09.08.01 — 16.08.01) notwendig. Eine Verbindung der wasserführenden Schichten unter Schacht 2 und 4 wird vermutet (Kapitel 10.5). Im 3. Jahrtausend v. u. Z. wurde diese Zisterne als Wasserspeicher angelegt. (pers. Mitt. M. KORFMANN 26.07.02)

Im Kreuzungspunkt des Hauptganges entspringt der südöstliche Seitenarm und erstreckt sich relativ geradlinig über eine Länge von ca. 14 m. In Gang III ist ein Linear im Sinter auf den gegenüber liegenden Wänden in einer Höhe von ca. 15,50 müNN verfolgbar, d.h. 1,60 m über der Sohle. Schräm Spuren treten am Ende des Ganges auf, dort teilt sich der Stollen in 3 senkrecht aufeinander stehende Arme, welche sich nach NE, SE bzw. SW erstrecken. Abb. 18 zeigt die nach Südosten bzw. Südwesten verlaufenden Seitenarme. Sie befinden sich ca. 0,80 m über der Sohle des Ganges und 0,30 m unter der Firse und ihre Höhe beträgt ca. 0,40 m. Der nordöstliche Seitenarm hat eine Länge von ca. 1,5 m, der nach SE verlaufende Abzweig mißt ca. 3,5 m, während der Arm in Richtung SW über eine Länge von ca. 5,5 m erschlossen ist. Letzterer teilt sich kurz vor seinem Ende erneut in drei kleine Arme auf, welche wiederum jeweils ca. 1 m lang sind. Ein Nutzen für die Wassergewinnung kann im Falle der kleineren Seitenarme derzeit nicht angenommen werden. Im Kreuzungsbereich ist das Kluftsystem erkennbar, welches im Hauptgang und an den Schächten 2 und 3 beobachtet werden konnte und Sinterbildungen sind in diesem Abschnitt der Höhle vorhanden.

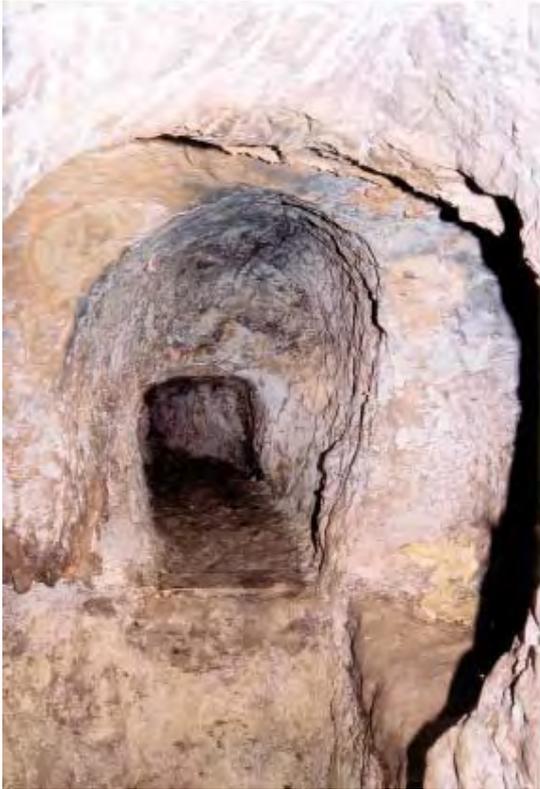


Abb. 18: Abzweig der kleinen Seitenarme in südöstliche (Bildmitte, Breite etwa 40 cm) und südwestliche Richtung (rechts), Schrämmpuren am oberen Bildrand.

Vom Hauptgang aus windet sich ein ca. 7 m langer Gang nach ESE. Schrämmpuren sind am Beginn des Ganges sowie an dessen Ende sichtbar. Dort enden die Meißelpuren in einer verhärteten Sandsteinschicht. Möglicherweise handelt es sich dabei um die Schicht, welche in den aufgenommenen Profilen auf höher liegendem Niveau angetroffen wurde. In diesem Fall sollte entlang einer Störung ein Versatz erkennbar sein, allerdings ist in der Höhle nichts derartiges beobachtet worden. Denkbar ist daher ein lithologischer Wechsel innerhalb der Schicht, z.B. durch channel-Bildungen, die im Kartiergebiet mehrfach beobachtet werden konnten. Sinter treten in diesem Stollen sowohl an den Wänden als auch an der Firste auf.

Direkt vor der Höhle, östlich des Eingangs, wurde eine Mauer aus Kalksteinen errichtet, auf denen eine Wasserstandsmarke sichtbar ist. Sie kann über den Bereich der Mauer verfolgt werden. Anhand dieses Linears ist die Existenz eines Wasserspeichers vor der Höhle ableitbar. Ca. 4,50 m von der Eingangsmauer entfernt befinden sich Steinquader, welche als Relikte einer „Staumauer“ gedeutet werden können. Sowohl an der beschriebenen Mauer als auch am gegenüberliegenden Hang, welcher heute stark erodiert ist, sind sie zu finden. Ausgehend von einer Höhe der Wasserstandsmarke von ca. 0,65 m über dem Niveau der Waschmulden und einer Breite des Wasserbeckens von 1,85 m kann das Volumen des angestauten Wassers auf $5,4 \text{ m}^3$ geschätzt werden.

Neben drei Vertiefungen mit rundem bis elliptischem Querschnitt direkt vor dem Höhleneingang befinden sich in etwa 10 m Entfernung drei weitere Becken, welche in die römische und byzantinische Zeit datiert werden. 1998 erschloß man diese übereinanderliegenden, rechteckigen Becken. Im ältesten, mindestens 6 m breiten Becken, wurden große Kalksteinplatten über dem anstehenden Gestein verlegt und die Wände teilweise wasserdicht versiegelt. Darüber wurden zwei Becken errichtet, die ebenfalls rechteckig sind. Deren Sohlen sind mit rechteckigen oder quadratischen Platten bedeckt und in einem davon ist teilweise das unabgedeckte Gestein erkennbar (Abb. 19). Aufgrund der einheitlichen Versiegelung aller drei Becken wird eine zeitgleiche Nutzung angenommen. Tonröhren in den Wänden des mittleren Beckens werden als Hinweis auf die Züchtung von Fischen, insbesondere von Aalen, angesehen. Anhand keramischer Funde wird der Bau der jüngeren Becken auf 150 u.Z. geschätzt (ROSE 1999).



Abb. 19: Römische Becken vor dem Höhleneingang, im Vordergrund eine Wasserleitung. Blick nach Westen.

8.3 Volumen

Basierend auf den geodätischen Messungen von HARTMANN (2001) und den in den Grabungstagebüchern angegebenen Maßen wurde das gesamte Volumen der Höhle mit ca. 360 m^3 ermittelt. Dabei wurden der Hauptgang, die Gänge II und III sowie der Stollen I mit den Seitenarmen I a und I b einbezogen. Darüber hinaus sind die Volumina der Becken unter Schacht 1, 2 und 4 integriert.

Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, daß die einzelnen Gangabschnitte Quadern bzw. Zylindern ähneln. Die Rundungen der Stollenwände konnte nicht immer berücksichtigt werden, damit stellt das berechnete Volumen einen maximalen Näherungswert dar. Weiterhin ist zu beachten, daß durch Erosionseffekte das Volumen der Höhle vergrößert wurde. Ursprüngliche Maße liegen nicht vor. Jedoch gibt SCHLIEMANN (1884) z. B. die Höhe des Hauptganges mit 1,68 m an; bei der Vermessung 2001 ermittelte HARTMANN dagegen eine vertikale Ausdehnung von 2,04 m im selben Bereich.

Bei einem täglichen Pro-Kopf-Verbrauch von 5 — 10 L für Essen und Trinken in der Bronzezeit würden 360 m^3 Wasser für eine Person 36000 — 72000 Tage reichen, 1000 Personen könnten dementsprechend 36 — 72 Tage davon leben. Unter römischen Verhältnissen, als der durchschnittliche Verbrauch etwa 1000 L/d betrug, hätten 360 Menschen für einen Tag bzw. 51 Personen eine Woche mit Wasser versorgt werden können. Grundlage der Berechnung ist das gesamte Volumen, jedoch ist die Höhle zumindest in der Bronzezeit vermutlich noch nicht soweit aufgefahen worden, wie es dem jetzigen Stand der Erschließung entspricht. Dadurch verringert sich das in dieser Zeit zur Verfügung stehende Volumen.

8.4 Sinter und Wasserstandsmarken

Da Höhlen offene Systeme darstellen, kommt es beim Eintritt von Wasser zum Ausgleich zwischen den Partialdrücken des Wassers und der Atmosphäre. Die Löslichkeit von CaCO_3 im Grundwasser ist stark vom Druck beeinflusst und sinkt beim Eintritt in aerobe Verhältnisse. Dadurch wird die Ausfällung von CaCO_3 in Höhlen verursacht, es lagert sich im Fall der Quelhöhle in Krusten an den Höhlenwänden und kleinen Stalaktiten an den Firsten ab. CaCO_3 ist in den neogenen Sedimentgesteinen des Troia-Rückens vorhanden.

FRANK & MANGINI (2002) datierten die Kalkbeläge im Hauptgang in der Nähe des Schachtes 1 und im vorderen Bereich von Gang III anhand der $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode. Zusätzlich wurde eine Probe im Gang I b neben Schacht 3 genommen. Dabei stellte sich heraus, daß die Sinter im Kontakt zum Sedimentgestein eine hohe Porosität aufweisen und mit abnehmendem Alter laminiert werden, wobei der Anteil von Detritus zunimmt. Auch Holzkohlepartikel wurden in den Lagen gefunden, wodurch die Nutzung von Feuer innerhalb der Höhle belegt wird.

Alter zwischen $2,55 * 10^3 \pm 0,09$ a im Hauptgang und $4,59 * 10^3 \pm 0,54$ a im Gang III wurden bestimmt. Dabei stellt sich der vordere Bereich des Ganges III wesentlich jünger dar, die Sinter an diesen Stellen wurden auf $1,74 * 10^3 \pm 0,07$ bzw. $2,72 * 10^3 \pm 0,06$ Jahre datiert. Für die Probe aus dem Gang zwischen Schacht 3 und 4 ergab sich ein Alter von $2,06 * 10^3 \pm 0,03$ a. Datierungsergebnisse stellen Zeiten dar, in denen die Abschnitte der Höhle nicht mehr genutzt wurden und sich Sinterbeläge bilden konnten. Steht Wasser in den Gängen oder Wasserspeichern, kann der Druckausgleich zwischen Wasser und Atmosphäre nicht erfolgen und die Ausfällung von CaCO_3 wird verhindert. Zu den angegebenen Zeiten kann daher kein Wasser in den entsprechenden Bereichen gespeichert worden sein.

Während im Hauptgang aufgrund der Erosionseffekte kaum Sinterbildungen zu erkennen sind, bedecken zentimetermächtige Krusten weite Teile der Seitenarme sowie der Schächte und Brunnen. An den Firsten der Gänge I a, I b sowie am östlichen Ende des Ganges II treten stalaktitische Bildungen auf, welche als Knöpfchensinter bezeichnet werden. Derartige Calcit ausfällungen sind auch im Gang I a anzutreffen (Abb. 20), dort tropft das Wasser noch immer. Auch die Firste des südöstlichen Abschnitts des Ganges I b zwischen Schacht 3 und Schacht 4 ist mit stalaktitischen Belägen überzogen, dort sind sie allerdings trocken. Meist befinden sich die Stalaktiten am Übergang der feinkörnigen Sandsteinschicht zum darüberliegenden dichten Kalkstein (Kapitel 9.1), im Hangenden befindet sich der Grundwassergeringleiter, aus dem das Wasser der Quelhöhle stammt.



Abb. 20: Sinter an der Firste des Ganges I a. Länge der Stalaktiten 2 — 4 cm.

Bei konstantem Wasserspiegel können sich Wasserstandsmarken ausbilden; in der Quelhöhle sind sie als Wülste in den Sinterschichten zu erkennen, meist in mehreren Generationen in unterschiedlichen Höhen. In den Gängen I a und I b befinden sich markante Wasserstandsmarken 0,65 — 0,75 m über der Sohle, das Volumen des Wasser betrug demnach insgesamt ca. 55 m³. Unter der Annahme, daß die gemessenen durchschnittlichen Schüttungen (0,5 L/min) für beide Stollensysteme gelten, wären zehn Wochen notwendig, um die Gänge bis auf die genannte Höhe mit Wasser zu füllen. Bei einem Verbrauch von 5 — 10 L pro Tag und Einwohner, was dem bronzezeitlichen Bedarf entspricht, könnten 750 — 1500 Menschen eine Woche mit dem angestauten Wasser versorgt werden. Zur Zeit der römischen Besiedlung, als etwa 1000 L/d benötigt wurden, hätte das gesammelte Wasser dementsprechend für etwa 10 Menschen ausgereicht.

Wasserstandsmarken befinden sich auch auf den gegenüberliegenden Wänden in Gang III in einer Höhe von etwa 1,60 m, was einem Volumen von etwa 17 m³ entspricht. Reste von Staumauern sind nicht vorhanden, jedoch befanden sie sich vermutlich direkt am Eingang des Stollens. Das Sohlenniveau ist heute am Beginn des Ganges am höchsten, wodurch das wenige Wasser im Gang am Abfließen gehindert wird. Auch vor der Höhle wurde das Wasser angestaut, was durch eine Wasserstandsmarke auf der Mauer östlich des Eingangs belegt wird. In der Beschreibung der Höhle (Kapitel 8.2) wird das Volumen des ehemaligen Beckens mit 5,4 m³ angegeben. Wie an den Wasseraustritten in den Gängen I a und b zu erkennen, fließt auch heute noch Wasser in die Quelhöhle und die Sinterbildung dauert noch immer an. Zur Klärung der Funktion der Höhle als Wassergewinnungsanlage wäre eine Datierung der Wasserstandsmarken sinnvoll, da diese darüber Aufschluß geben können, wann die Wasserspeicher angelegt und genutzt wurden.

8.5 Römisches Aquäduktsystem

Während der Hebung des Gebietes im Miozän schnitt sich der Fluß Kemerdere südöstlich des Kartiergebietes entlang von Schwächezonen in die neogenen Gesteine ein und legte die unterlagernden Basalte frei. Meteorische Wässer intrudierten in die Hohlräume der Magmatite, welche durch die tektonischen Aktivitäten zusätzlich eine starke Klüftung erhielten. Für das Grundwasser undurchdringliche Serpentine existieren im Liegenden der Basalte. Am Übergang des porösen Basaltes zum dichten Serpentin entstanden zahlreiche Quellen, deren Wasser in römischer Zeit nach Troia geleitet wurde. Reste von insgesamt 9 Brücken, zahlreiche Funde von Tonröhren und unterirdische Kanäle lassen die Rekonstruktion des Verlaufs der Wasserleitung zu, jedoch ist die Leitung nur in Fragmenten erhalten. Die Wasserscheide im Bereich zwischen Camlıca und Hayrettin Tepe, in der bergigen östlichen Troas, wird als Ursprung des Aquäduktsystems angesehen. Von dort aus erstreckt es sich in nordwestliche Richtung bis zum Tal des Kemerdere, eines der größten Aquädukte römischer Zeit in der Türkei überspannt die Schlucht (Abb. 21). Nach Westen erstreckt sich die Leitung weiter bis Çivler, bevor sie in nordwestliche Richtung durch das hügelige Gebiet des Troia-Rückens mäandriert und schließlich in der Nähe von Troia endet. In Tevfikiye wurde ein unterirdischer Kanal gefunden, welcher mit Mauerwerk abgedeckt wurde und einen Teil des römischen Systems darstellt. Insgesamt erstreckt sich die römische Wasserleitung über 25 — 30 km und etwa 400 Höhenmeter, das Gefälle beträgt etwa 1,5 % (AYLWARD et al. 2002), wobei die Leitung weitgehend dem topographischen Gradienten folgt (KAYAN 2000).

Über weite Strecken erfolgte der Transport des Wassers in Tonröhren, deren Innenwände teilweise mit Sinter überzogen sind. Dabei wurden im südöstlichen Bereich des Aquäduktsystems, zwischen İncirli Dere und Suçuktı Deresi, in situ erhaltene Tonröhren gefunden, die nur am Boden und an den Seiten Sinterbildungen aufweisen und den Wasserfluß aufgrund der Gravitationskraft belegen. Dagegen herrschen in der Nähe von Troia Röhren vor, deren Innenwände vollständig mit bis zu drei Zentimeter mächtigen calcitischen Krusten bedeckt sind (AYLWARD et al. 2002). Die gleichmäßige Verteilung läßt auf eine vollständige Wasserfüllung schließen, demnach ist Röhrensystem als Druckleitung angelegt worden. Auch die Mächtigkeiten der Tonwände von ca. 3 cm legen diese Schlußfolgerung nahe (WOLKERSDORFER & PERNICKA 2001). Derartige Systeme wurden in zahlreichen Stätten griechischer und römischer Zeit gefunden und die ältesten Druckleitungen wurden im nordostgriechischen Olynthos im sechsten oder fünften Jahrhundert v.u.Z. verlegt (CROUCH 1993).

Zur Verminderung des hydrostatischen Drucks wurden Brücken über morphologische Unebenheiten errichtet, deren Gefälle wesentlich geringer waren als das der gesamten Anlage. Nur 0,25 % Neigung weist das Kemerdere-Aquädukt (Abb. 21) auf. In einer offenen Rinne wurde das Wasser darüber geleitet, jedoch sind keinerlei Sinterbildungen erhalten. Eventuell erfolgte der Transport durch zwei parallele Tonröhren innerhalb des offenen Kanals. Reste vollständig versinterter Tonröhren sind im Flußbett des Kemerdere gefunden worden und stammen möglicherweise vom Aquädukt. (AYLWARD et al. 2002).

An Hand des hohen Wasserverbrauchs der römischen Siedler ist die Anlage dieses Wasserleitungssystems eventuell zu begründen. DUNGER (1994) gibt den Verbrauch der Stadt Rom mit 1000 L pro Tag und Einwohner an, was dem Siebenfachen des heutigen durchschnittlichen Verbrauchs in Deutschland entspricht. Möglicherweise war die Errichtung der Wasserleitung auch notwendig, weil die Qualität des zur Verfügung stehenden Wassers schlechter wurde. In den folgenden Epochen wurde das Aquäduktsystem nicht mehr genutzt. Wahrscheinlich war der Wasserverbrauch aufgrund der Abnahme der Bevölkerungszahl rückläufig (KAYAN 2000). Reste der römischen Wasserleitung befinden sich in der Nähe des Aquäduktes und in etwa auf einer Südost—Nordwest-verlaufenden Linie zwischen dem Kemerdere-Aquädukt und der heutigen Ausgrabungsstätte. Aus den Lokalitäten der Funde wird der Verlauf der Leitung in diesem Bereich rekonstruiert.

Auch in der Quelhöhle wurden Tonröhren im Bereich von Gang I gefunden, direkt oberhalb des älteren Wasserkanals (SCHLIEMANN 1884), ebenso vor dem Eingangsbereich. Eine Verbindung des römischen Aquäduktes mit der Quelhöhle konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, da sich die Wasserleitung aus Südosten direkt in die Siedlung Troia erstreckte und nicht im Bereich der Quelhöhle verlief.

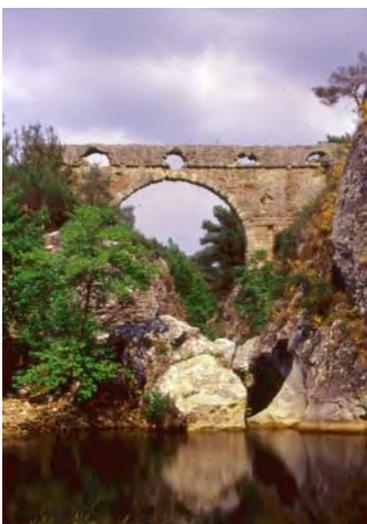


Abb. 21: Römisches Aquädukt über den Fluß Kemerdere.

9 SEDIMENTOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

9.1 Schichtenbeschreibung

Während der Arbeiten in der Quelhöhle wurden 6 Profile im Bereich des Hauptganges bzw. unter Schacht 2 aufgenommen. Darüber hinaus wurden, soweit möglich, die Schichten im Liegenden und Hangenden der Abfolge untersucht. In Abb. 22 ist das Normalprofil der Abfolge graphisch dargestellt und eine Korrelation der Einzelprofile befindet sich in Abb. 23.

Zusammenfassend werden an dieser Stelle die einzelnen Sedimentgesteinsschichten vom Liegenden zum Hangenden charakterisiert. Dabei werden die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchungen, der Siebanalysen und Lumosed-Messungen mit einbezogen. Als Ergebnis der röntgenographischen Analyse kann allgemein für alle Schichten angemerkt werden, daß vor allem nicht quellfähige Tonminerale (Kaolinit, Illit) enthalten sind. Quellfähiger Montmorillonit tritt meist in Wechsellagerung mit Illit auf, zum Teil in recht hohen prozentualen Anteilen. Eine Wasserspeicherfähigkeit der Sedimentgesteine kann daher angenommen werden. Nähere Beschreibungen zur Methodik und den Ergebnissen der Röntgendiffraktometrie sind im Kapitel 9.4 zu finden. In den Kapiteln 9.2 und 9.3 werden die Korngrößenanalyse bzw. der mikroskopische Modalbestand der Proben und die Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie dargestellt.

In einem Graben, ca. 50 m vom Höhleneingang entfernt, sind die Schichten im Liegenden der Abfolge aufgeschlossen. Ein mindestens 120 cm mächtiger toniger Schluffstein mit einem Tongehalt von ca. 15 % bildet die unterste aufgeschlossene Schicht. Das Material ist homogen und karbonatisch. Ostrakoden der Gattung *Cyprideis* bilden den Hauptanteil der Komponenten; weiterhin treten schlecht gerundete Quarze, bräunliche und grünliche Glimmer und Fragmente älterer Biogenkalke auf. Darüber hinaus wurden Knochenbruchstücke, wahrscheinlich Relikte von Fischen, mikroskopisch identifiziert. Ein aquatisches Ablagerungsmilieu mit geringer kinetischer Energie ist aufgrund der Fossilführung und der Korngrößenverteilung wahrscheinlich. Auf Grundlage der Siebanalyse sowie der Messungen mit Lumosed wurde ein Durchlässigkeitsbeiwert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s (nach BEYER) berechnet. Die Schicht, aus welcher Probe 1036-9 stammt, stellt damit einen Grundwassernichtleiter dar.

Darüber lagert ein hellgelber toniger Schluffstein. Zur Korngrößenanalyse ist das Material weniger geeignet, Resultat von Schlämmung und Siebung stellten zahlreiche Bruckstücke des Materials dar und die ursprünglichen Korngrößen konnten nicht ermittelt werden. Neben den Aggregaten sind mikroskopisch Gesteinsbruchstücke metamorphen, magmatischen und sedimentären Ursprungs, Quarze und dunkle Glimmerminerale sowie fossile Ostrakoden (*Cyprideis*) und angelöste Mollusken zu unterscheiden. Diese 20 cm mächtige Schicht weist einen fühlbaren Feuchtigkeitsgehalt auf. Aufgrund seiner Feinkörnigkeit ist das Material als Grundwassernichtleiter einzuordnen. Probe 1036-10 repräsentiert diese Lage.

Im Hangenden folgt ein 10 cm mächtiger, schwach kompakterter Biogenkalk, der sich aus Steinkernen zusammensetzt. Die Schalen sind aufgelöst, eine Eisenoxid-Schicht markiert die ehemaligen Schalen. Als Probe 1036-11 wurde das Material untersucht, allerdings war es sowohl für die Dünnschliffherstellung als auch für röntgenographische Untersuchungen nicht geeignet. Auch die Korngrößenanalyse liefert nur bedingt Aussagen zum Material, da bei der Aufbereitung das karbonatische Bindemittel nicht zerstört werden konnte. Porenräume sind im Gestein enthalten, sie entstanden durch das Herauslösen der Molluskenschalen und wurden zum Teil mit Calcit verfüllt.

Die Abfolge wird von einer 50 cm mächtigen Bodenschicht bedeckt. Westlich des Höhleneingangs ist die Abfolge weiter aufgeschlossen. An der Basis steht eine mindestens 5 cm mächtige Biogenkalkschicht an. Diese feste Lage ist hellgrau und beinhaltet Ooide und wenige eingeregelt Steinkerne. Aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit der darunterliegenden Schicht wurde sie nicht einzeln beprobt. Im Hangenden folgen die Schichten, die auch im Höhleninneren anzutreffen sind und an verschiedenen Punkten in der Höhle angesprochen wurden.

Als Basis des ersten Höhlenprofils, dessen Aufnahme ca. 1,5 m hinter der Eingangsmauer im Hauptgang erfolgte, steht ein hellgrauer, toniger Sandschluffstein an. Nach der sedimentologischen Analyse setzt er sich aus ca. 10 % Ton, 55 % Schluff und etwa 35 % sandigen Komponenten zusammen. In Anlage 3 sind die Ergebnisse der Korngrößenanalyse dargestellt. In dieser Schicht treten Lagen mit höheren Tongehalten bzw. sandige Partien im mm- bis cm-Bereich auf. Zwei Drittel des Materials bilden Ooide, Quarzkörner treten nur untergeordnet auf. Weiterhin wurden Schalenreste von Mollusken und Gastropoden nachgewiesen. Glimmerminerale, Eisenoxidaggregate und Gipsblättchen sind akzessorisch enthalten. Innerhalb der Höhle fühlt sich diese Ablagerung feucht an,

wobei der Feuchtigkeitsgehalt nach oben hin abnimmt. Die Schicht ist etwa 15 cm mächtig und wurde nur in diesem Profil angesprochen, da in anderen Punkten der Höhle keine wesentlichen Unterschiede zur darüberliegenden Schicht festgestellt werden konnten. Nach BEYER wurde der Durchlässigkeitsbeiwert der Probe 1036-1 von $2,4 * 10^{-8}$ m/s ermittelt, die Schicht stellt einen Grundwassernichtleiter dar.

Darüber lagert ein weiterer toniger Schluffstein, der Tongehalt ist geringer als in der unteren Schicht. Ein geringer Feinsandanteil und wenige größere Klaster bis 0,7 cm sind in dem Gestein enthalten. Es ist wenig verfestigt und feucht. In einzelnen zentimetermächtigen Lagen ist das Material stärker verfestigt, zeigt aber keine lithologischen Wechsel. In dieser Schicht treten fossile Molluskenschalen auf. Quarzkörner, Gesteinsbruchstücke, Glimmerminerale, organische Substanz und Eisenoxide konnten im Dünnschliff unterschieden werden. Dabei sind die Komponenten regellos im Gestein verteilt, mikroskopisch ist keine Lamination erkennbar. Eine Beschreibung des Dünnschliffes ist unter 9.3.1 nachzulesen.

Schicht 3 ist ein toniger Schluffstein mit 10 — 15 % Tonanteil. Eine Lamination ist erkennbar. Farblich variieren die einzelnen Lagen zwischen weißlich-grau, bräunlich, rötlich bzw. gelblich. Zum Teil sind lokale Verockerungen in die Lagen eingebettet. Die Laminae sind eben und parallel. Im unteren Bereich liegen sie horizontal, im oberen fallen sie leicht im Profilverlauf 1 in der Höhle nach N hin ein. Grund dafür ist eine weitere Schicht, die weiter südlich im Höhleninneren zwischen den Schluffsteinlagen auftritt. Die Teilschichten werden in den Profilen als 3a und 3b bezeichnet. In Schicht 3 a treten Ostrakoden auf, von denen etwa 50 % zerbrochen sind. Eisenoxidaggregate und Glimmerminerale kommen ebenfalls vor, allerdings in geringerer Häufigkeit. 3 b dagegen ist von einem hohen Anteil von Quarzkörnern und Gesteinsfragmenten gekennzeichnet. Biogene sind nur bruchstückhaft erhalten und teilweise mit Eisenoxidkrusten überzogen. Mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $3 * 10^{-8}$ m/s (nach BEYER) sind beide Teilschichten als Grundwassernichtleiter einzuordnen, die Probennummern 1036-3a und 1036-3b entsprechen diesen Schichten.

Bei der Zwischenschicht 4 handelt es sich um einen tonigen Schluffstein mit ca. 12 % Ton und Spuren von Feinsand. Sie keilt südlich des Profils 1 aus, verläuft im Höhleninneren und trennt die Schichten 3a und 3b. Quarz, Glimmer, Eisenoxide und Gipsblättchen sind in diesem Material enthalten. Im unteren Teil der Schicht sind Muschelschalen gehäuft. Die Mollusken liegen als Steinkerne vor, die Schalen sind gelöst. Diese 11 cm mächtige

Schicht ist hellbraun bis hellgrau und feinlaminiert. Klüfte zerteilen die Lage in cm-große Blöcke. Nach BEYER beträgt der k_f -Wert der Probe 1036-4 $3,2 * 10^{-8}$ m/s, d.h. die Schicht ist ein Grundwassernichtleiter.

Die darauffolgende Schicht 5 endet ca. 3,90 m hinter der Eingangsmauer. Maximal ist sie 40 cm mächtig. Dieser sandige, tonige Schluffstein enthält regellos verteilte Abdrücke von Mollusken, teilweise sind sie von eisenoxidischen Belägen markiert. In dieser relativ festen Schicht ist keine Schichtung erkennbar.

Bei der Betrachtung dieses matrixgestützten Gesteins im Dünnschliff sind wenige Quarze sowie Pelloide erkennbar. Im Kapitel 9.3.1 befindet sich eine Beschreibung des Dünnschliffes. Auch diese Schicht ist aufgrund des hohen Anteils der Schlämmkornfraktion mit einem k_f -Wert von $3,2 * 10^{-8}$ m/s (nach BEYER) als Grundwassernichtleiter anzusehen.

Über der beschriebenen Abfolge der tonigen Schluffsteine liegt ein ca. 60 cm mächtiger graubrauner Sandstein mit einem Schluffanteil von ca. 30 %. 60 % der Komponenten liegen der Korngröße nach im Feinsandbereich. Algen bewachsen die Oberfläche des Sandsteins innerhalb der Höhle, welche aufgrund von Verwitterungseffekten schalig, blättrig wirkt. ENE—WSW-gerichtete Klüfte erstrecken sich in diesem Gestein, sie sind im Eingangsbereich der Höhle und unter Schacht 2 sichtbar und kalzitisch verfüllt. Eine Schichtung innerhalb des Sandsteins ist nicht erkennbar. Bei der Aufbereitung der Probe 1036-6 zur Korngrößenanalyse konnte auch bei dieser Schicht keine vollständige Trennung der Komponenten erfolgen, die Anteile der Körner im Mittelsandbereich sind wahrscheinlich zu hoch. Auf Grundlage der verschobenen Kornverteilungskurve wurde der Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von 10^{-5} m/s bestimmt. Demnach stellt diese Schicht einen Geringleiter dar. Am Übergangsbereich zur darauffolgenden Schicht konnten teilweise Wasseraustritte beobachtet werden. Ebenfalls bildet dieser Übergang in verschiedenen Abschnitten die Firste der Gänge.

Ein 10 cm mächtiger, kompetenter Kalkstein mit Schluff- und Feinsandanteilen bildet einen deutlichen Vorsprung über dem Höhleneingang. Dabei sind die Ober- und Unterkanten dieser Schicht wellig bis löchrig. Mikroskopisch sind neben Quarzkomponenten und Gesteinsbruchstücken vereinzelt Ooide und zweiklappige Molluskenschalen sichtbar. Ein Durchlässigkeitsbeiwert der Probe konnte aufgrund der Verfestigung nicht ermittelt werden, sie kann allerdings aufgrund der Dichte des Materials als Nichtleiter angesehen werden.

Es folgt ein oolithischer Sandstein mit Mittel- und Grobsandkomponenten. Darüber hinaus ist ein Feinkiesanteil enthalten, die Zusammensetzung variiert in verschiedenen Bereichen. Grobsandreiche Partien befinden sich im unteren Teil der Schicht, an anderer Stelle herrschen Kiese vor. Außerdem ist die Kompetenz der Schicht uneinheitlich. Mächtige kompetente Bereiche wechseln mit inkompetenten Zwischenlagen ab. Mikroskopisch ist die ooidische Umhüllung der kanten bis gut gerundeten Komponenten zu sehen. Interpartikuläre Zwischenräume sind mit karbonatischer Matrix verfüllt, der sichtbare Porenraum nimmt 5 — 10 % ein, wobei die Poren weitgehend isoliert sind. Da es sich bei dieser Schicht um den Grundwassergeringleiter handelt, der das Wasser in die Quelhöhle transportiert, wurde er an verschiedenen Stellen beprobt. Während die Probenummern 1036-8 aus dem unteren Bereich der mindestens 2,40 m mächtigen Schicht stammt, repräsentiert Probe 1036-12 den oberen Teil der aufgeschlossenen Einheit. In den Dünnschliffen beider Proben sind Ooide mit unterschiedlich ausgeprägten Hüllen und Quarzkörnern oder Gesteinsbruchstücken als Kerne erkennbar, die einzelnen Bereiche der Schicht ähneln sich stark. Mikroskopisch konnten allerdings Unterschiede im Porenraum festgestellt werden. Während die sichtbare Porosität der Probe 1036-8 5 — 10 % beträgt, nehmen die Hohlräume in 1036-12 nur 3 — 5 % ein.

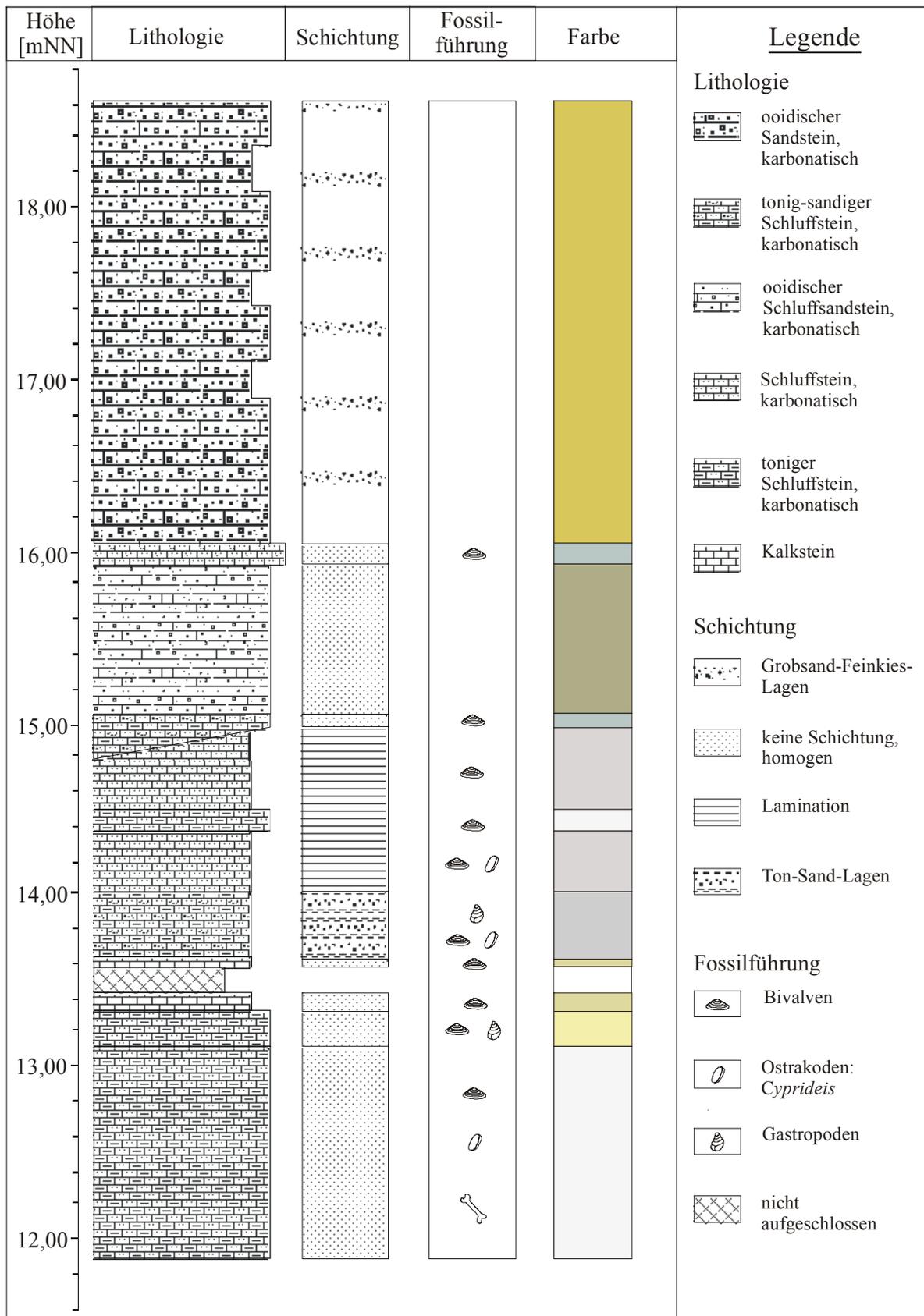


Abb. 22: Normalprofil der lithologischen Einheiten.

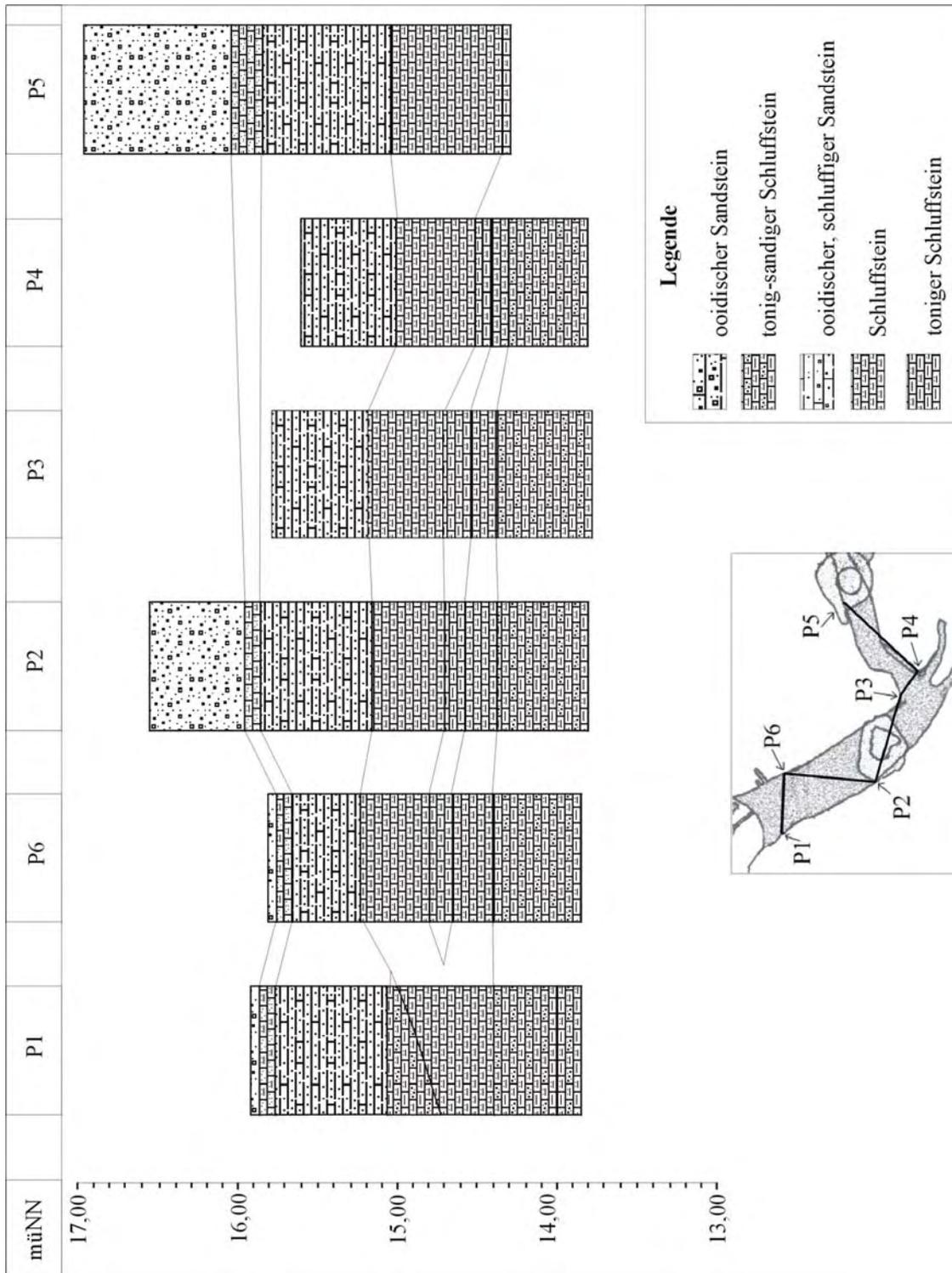


Abb. 23: Korrelation der in der Höhle dokumentierten Profile

9.2 Korngrößenanalyse

9.2.1 Theoretische Grundlagen

9.2.1.1 Siebanalysen

Wichtige Hinweise zu Art, Entstehung und Eigenschaften liefert die Verteilung der Korngrößen eines Sedimentes. Mit Hilfe der Siebung können die einzelnen Körner in Fraktionen mit regelmäßigen Größenintervallen eingeteilt werden. Der Siebsatz besteht aus unterschiedlich feinen Einzelsieben, die je nach Aufgabenstellung zusammengestellt werden können. Dabei befindet sich das Sieb mit der kleinsten Maschenweite unten, nach oben hin nehmen die Lochgrößen zu. Unter den Sieben befindet sich eine Pfanne, die die feinsten Partikel auffängt. Auf einem Rüttler wird das Material im Siebsatz aufgeteilt, wobei ein Zeitintervall von 10 bis 30 Minuten eingehalten werden sollte (TUCKER 1996). Anschließend wird das Probenmaterial mit Bürste und Pinsel aus den Sieben entfernt und die Masse der einzelnen Fraktionen bestimmt.

Vor der Trockensiebung ist es sinnvoll, die Gesamtprobe auf Aggregierungen, die während eines Trocknungsprozesses entstehen können, zu überprüfen. Ebenso müssen die Siebe gründlich gereinigt werden, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden.

In Abhängigkeit von der Kornform benötigen einzelne Körner mehr oder weniger Zeit für einen Siebdurchgang. Sphärische Objekte mit ausgeglichener Oberflächenform finden schneller in die entsprechende Fraktion als Körner, die weit von der Kugelform abweichen. Für die Trennung von Objekten der Siebkorngröße ($> 63 \mu\text{m}$) ist die Trockensiebung geeignet. Um Partikel der Schlammkorngröße ($< 63 \mu\text{m}$) zu untersuchen, sind andere Behandlungsmethoden notwendig (Kapitel 9.2.1.2 und 9.2.1.3).

Bei der Naßsiebung wird die gesamte Probe in einem Dispersionsmittel geschlämmt. Die Suspension wird durch entsprechende Siebe gespült, bis die Partikel in Fraktionen unterteilt sind und das übrige Wasser klar ist. Mit diesem Vorgang können auch die Komponenten $< 63 \mu\text{m}$ weiter unterteilt werden. Für die Analyse der Gesamtprobe ist diese Methode allerdings „nicht völlig zufriedenstellend“ (TUCKER 1996). Die im folgenden beschriebenen Methoden sind zur Untersuchung der Schlammkornfraktion besser geeignet.

9.2.1.2 Sedimentations-Photometer Lumosed

Mit Hilfe des Sedimentations-Photometers Lumosed der Firma Retsch kann die Korngrößenverteilung feinsten Partikel auf dem Prinzip der gravimetrischen Sedimentation bestimmt werden (ANONYM 2001 a). Dazu wird die Absinkrate der Komponenten in einer Flüssigkeit bestimmt. Das Probenmaterial wird als Suspension in einer Glasküvette (150 ml) mit einem speziellen Rührer homogenisiert. Wasser, Isopropanol oder Ethanol finden als Sedimentationsmittel Verwendung, während Calciumchlorid, Kaliumcitrat, Natriumoxalat oder Natriumpyrophosphat als Dispergiermittel eingesetzt werden (SÖDING 2001).

Entsprechend ihrer Sinkgeschwindigkeit sedimentieren die Partikel und ändern damit die Feststoffkonzentration in verschiedenen Meßebenen in der Küvette in Abhängigkeit von der Zeit. Dabei folgt die Sedimentation dem STOKESSchen Gesetz (Kap. 9.2.1.3).

Über eine bestimmte Zeit werden die Konzentrationen mit weißem Licht gemessen. Spiegel leiten drei Lichtbündel in verschiedenen Höhen durch die Küvette, abhängig vom Feststoffanteil der Suspension wird die Strahlung absorbiert. Die Lichtintensitätsänderungen werden von drei Sensoren registriert und mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers in elektrische Signale umgewandelt, welche mittels spezieller Software am PC ausgewertet werden können.

9.2.1.3 Atterberg

Im Atterberg-Zylinder kann die Trennung der Schlämmerkornfraktion in Ton und Schluff erfolgen. Die Analyse beruht auf der Absinkgeschwindigkeit der Teilchen.

Nach dem STOKESSchen Gesetz kann bei bekannter Sinkgeschwindigkeit ein Äquivalentdurchmesser der Körner berechnet werden. Folgende Gleichung verdeutlicht den Zusammenhang:

$$V_s = d^2(\rho_s - \rho)g / 18 \mu \quad \{1\}$$

Dabei ist V_s die Sinkgeschwindigkeit und d der Teilchendurchmesser. ρ_s und ρ kennzeichnen die Dichten von Korn und Wasser, während g die Erdbeschleunigung und μ die dynamische Viskosität der Analysenflüssigkeit darstellen.

Das STOKESsche Gesetz beruht auf der Annahme, daß die Teilchen kugelförmig und von gleicher Dichte sind (TUCKER 1996). Natürliche Sedimente als Mischung verschiedener Kornarten und -querschnitte lassen sich daher nicht exakt bestimmen, darüber hinaus ist der Vorgang temperaturabhängig. Dennoch ist mit diesem Verfahren die Möglichkeit einer guten Annäherung an reale Bedingungen gegeben.

Für die Analyse wird eine eingewogene Probenmenge in Suspension gebracht und mittels Ultraschall homogenisiert. Für die Bestimmung der Proben aus dem Kartiergebiet wurde eine Lösung von destilliertem Wasser mit 0,45 g/L Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) als Dispergierungsmittel verwendet. Die Suspension wird in den Zylinder eingefüllt und homogenisiert. Nach einer definierten Zeit, welche nach dem STOKESchen Gesetz von der Korngröße der Partikel abhängt, wird die überstehende Lösung entfernt und in einem Gefäß aufgefangen. Nach einer Absetzzeit von ca. 11 h 30 min befinden sich Körner mit Durchmessern $< 2 \mu\text{m}$ in Atterberg-Gefäßen mit einem Volumen von 2,5 L, wie sie im Röntgenlabor des Institutes für Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg verwendet werden, im Überstand. Größere Körner verbleiben im Atterberg-Zylinder, welcher erneut mit destilliertem Wasser und Dispergierungsmittel gefüllt wird. Der Vorgang wird wiederholt, bis die überstehende Lösung keine sichtbaren Partikel mehr enthält. In verschiedenen Gefäßen sind nun Suspensionen von Körnern unterschiedlicher Größen enthalten und nach dem Trocknen und wägen ist die quantitative Verteilung der Korngrößen ableitbar. Im Fall der vorliegenden Proben wurden mit Hilfe dieses Verfahrens Körner $< 2 \mu\text{m}$ von der Fraktion 2 – 63 μm getrennt. Die Trennung der Ton- und Schlufffraktionen erfolgte für die röntgenographischen Untersuchungen der Proben im Institut für Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg.

9.2.2 Durchführung

37 der 56 im Kartiergebiet genommenen Proben, davon 9 aus der Quelhöhle, waren für Analyse der Korngrößenverteilung geeignet. Diese wurden auf Korngrößenverteilung, Modalbestand, Rundungsgrad und Fossilführung untersucht. In dieser Arbeit wird nur das Material aus der Quelhöhle berücksichtigt, während die Beschreibungen der übrigen Proben bei BERGMANN (2003) nachzulesen sind.

9.2.1.1 Quantitative Messungen

Repräsentative Mengen der Proben wurden zur Gewichtskonstanz getrocknet. In Abhängigkeit der größten Korngröße der Probe betragen die Massen zwischen 100 und 200 g. Die Masse wurde ermittelt, bevor der $< 63 \mu\text{m}$ -Anteil der Probe mit destilliertem Wasser entfernt wurde. Fein- und Grobanteil wurden getrocknet und gewogen. Die Trockenmasse der gesamten Schlämmerkornfraktion ermöglicht die Berechnung der Ton- und Schluffanteile nach deren Bestimmung im Photosedimentometer Lumosed (Kapitel 9.2.1.2). Nach DIN 18123 erfolgte die Siebung der Körner $> 63 \mu\text{m}$. Verwendung fand

dabei das Gerät Vibrotronic Typ VE1 von Retsch. Das Probenmaterial wurde mit einer Frequenz von 60 s und einer Amplitude von 0,60 mm jeweils 30 min gesiebt. Aus den Trockenmassen der einzelnen Fraktionen ist der prozentuale Anteil der Fraktionen zu berechnen.

Mit destilliertem Wasser wurde die Schlämmerkornfraktion einer repräsentativen Probenmenge vom Grobanteil entfernt und für weitere Untersuchungen vorbereitet. Aufgrund der geringen Korngröße ist die statistisch notwendige Masse für die Analyse geringer als bei der Siebung der groben Partikel. Im Gerät Lumosed von Retsch wurde die Schlämmerkornfraktion des Probenmaterials nach der Trocknung und Wägung hinsichtlich der Verteilung der Korngrößen untersucht. In Kapitel 9.21.2 ist das Meßprinzip erläutert. Als Suspension wurde das Probenmaterial in destilliertem Wasser mit einem Zusatz von 0,45 g/L Natriumpyrophosphat gemessen. Natriumpyrophosphat diente als Dispergierungsmittel, um die Aggregatbildung des feinen Materials zu verhindern. Darüber hinaus erfolgte die Behandlung der Suspensionen im Ultraschallbad. Die Dichte des Materials wurde mit $2,6 \text{ g/cm}^3$ angenommen und die Meßzeit betrug 10 min je Probe bei einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Die ermittelten prozentualen Anteile der jeweiligen Korndurchmesser wurden in die Siebkurven integriert, in Anhang 3 sind diese aufgeführt.

9.2.2.2 Qualitative Untersuchungen

Mikroskopisch erfolgte die Analyse und Beschreibung des Modalbestandes der einzelnen Siebkornfraktionen. Hierbei wurden Faktoren wie Mineralbestand, Rundungsgrad der Körner, Fossilführung und Ooide berücksichtigt. Die Anteile der Komponenten wurden prozentual abgeschätzt. In Kapitel 9.3.2 befindet sich die Beschreibung der Kornzusammensetzung.

9.2.2.3 Diskussion der sedimentologischen Untersuchungen

Während die Analyse der Schlämmkornfraktion im Photosedimentometer Lumosed bis auf eine Ausnahme problemlos durchgeführt werden konnte, gelang die Trennung der Partikel der Fraktion $> 63 \mu\text{m}$ nicht in jedem Fall. Karbonatische Bindemittel behinderten teilweise die Aufbereitung, da sie andere Partikel miteinander verkleben. Bei der quantitativen Aufteilung dieses Korngrößenbereiches wurden die enthaltenen Aggregate in Siebschnitte eingeteilt, die nicht der ursprünglichen Korngröße entsprechen und die Körner größer erscheinen lassen. Daher liegen als Ergebnis nur scheinbare Kornverteilungen vor. Von diesem Problem sind die Proben 1036-2, 1036-4, 1036-5, 1036-10 und 1036-11 betroffen. Bedingt können die Ergebnisse der Untersuchungen für diese Proben zum Teil dennoch verwendet werden, da die Proben einen sehr hohen Anteil an Körnern im Schlämmkornbereich aufweisen, welche genau bestimmt werden konnten.

Da die Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte auf den Kornverteilungen beruht, werden diese ebenfalls verfälscht, d.h. die ermittelten k_f -Werte sind für die betreffenden Proben zu hoch. Bei der Interpretation der Daten wurde diese Tatsache berücksichtigt.

Im Falle von Probe 1036-4 kam es bei der Bestimmung der Kornverteilung im Schlämmkornbereich trotz Dispergiermittel ebenfalls zur Aggregatbildung. Auch höhere Konzentrationen von Natriumpyrophosphat konnten dieses Phänomen nicht verhindern. Die Anteile der Ton- und Schlufffraktion dieser Suspension konnte deshalb nicht mit Lumosed ermittelt werden. Alternativ wurden für diese Probe quantitativen Ergebnisse der röntgenographischen Analyse eingesetzt.

9.2.3 Ergebnisse der Korngrößenanalysen

Basierend auf den Ergebnissen der Siebanalyse und des Photo-Sedimentometers Lumosed sind die Korngrößenverteilungen der einzelnen Schichten in Anlage 3 dargestellt.

Als Schluffsteine sind die untersten sechs in der Höhle anstehenden Schichten zu bezeichnen. Sie unterscheiden sich geringfügig in den Ton- und Sandanteilen. Ein feinkörniger Sandstein überlagert den Komplex. Es folgen ein dichter Kalkstein, bei dem eine Siebanalyse nicht durchgeführt werden konnte, sowie ein Sandstein mit Schluff- und Feinkieskomponenten. Aus den Korngrößenverteilungen ist der Durchlässigkeitsbeiwert der Schichten abschätzbar (Kapitel 9.2.4). Eine genauere Beschreibung der Schichten ist in Kapitel 9.1 aufgeführt.

9.2.4 Durchlässigkeitsbeiwert

9.2.4.1 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes

Zur Charakterisierung der Wasserführung eines Gesteines liefert der Durchlässigkeitsbeiwert wichtige Aussagen. Er vereinigt die Stoffeigenschaften mit denen des Wassers und gibt den Durchfluß in m/s an.

Aus den ermittelten Korngrößenverteilungen kann dieser Wert an Hand verschiedener Algorithmen berechnet werden. Methoden von HAZEN, ZIESCHANG und BEYER werden in diesem Kapitel erklärt. Daneben kann der k_f -Wert aus den Ergebnissen von Pumpversuchen mit Hilfe des DARCY-Gesetzes oder aus Tracerversuchen ermittelt werden. Im Allgemeinen beruhen diese Verfahren auf den statistischen Größen des wirksamen Korndurchmessers d_w und dem Ungleichförmigkeitsgrad U . Diese Werte werden aus der Kornverteilung abgeleitet. U wird unter anderem zur Bestimmung des günstigsten Algorithmus zur k_f -Wert-Ermittlung errechnet. Nach der Formel $U = d_{60}/d_{10}$, wobei d_{60} und d_{10} die Korngrößen bei 60 % bzw. 10 % des Siebdurchganges darstellen, gibt diese Größe darüber hinaus wichtige Aussagen zur Charakterisierung von Korngemischen wider. Für $U = 1 - 5$ können die Verfahren von HAZEN und ZIESCHANG angewendet werden, während bei $U > 5$ auf die Berechnung nach BEYER zurückgegriffen wird. In Abhängigkeit von U werden in den einzelnen Verfahren c -Werte eingesetzt, die empirische Gesteinsbeiwerte darstellen. Die Zusammenhänge zwischen diesen Größen sind bei HAZEN und ZIESCHANG aus Tabellen zu entnehmen und bei BEYER in einer Grafik dargestellt, welches die Abhängigkeit des empirischen Beiwertes c vom Ungleichförmigkeitsgrad U zeigt.

Die HAZEN-Methode ist insbesondere für die Bestimmung von Feinsanden geeignet. An Hand der Gleichung

$$k_f = c * d_w^2 \quad \{2\}$$

kann der Durchlässigkeitsbeiwert berechnet werden. Dabei ist d_w der wirksame Korndurchmesser. ZIESCHANG berücksichtigt in seiner Berechnungsgrundlage den Glimmeranteil eines Gesteins. Bei feinkörnigen Grundwasserleitern spielt dieser eine besondere Rolle, weil durch das Steilstellen der Glimmerplättchen die Durchflußfläche verringert und das Gefälle erhöht werden kann. Anstatt d_w wird hierbei d_{10} benutzt, so daß sich folgende Formel ergibt:

$$k_f = c_1 * c_2 * d_{10}^2. \quad \{3\}$$

Dabei sind c_1 der empirische Gesteinswert, c_2 der empirische Gesteinsbeiwert abhängig vom Glimmergehalt und d_{10} der Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang.

Mit

$$k_f = c * d_{10}^2 \quad \{4\}$$

ist der Durchlässigkeitsbeiwert nach BEYER definiert. In der hydrogeologischen Praxis wird vorrangig diese Methode genutzt. Sie ist für Kiese und Sande anwendbar und gilt für U -Werte von 1 bis 20.

Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden beruhen zum größten Teil auf den verschiedenen c -Werten. Während Hazen und Beyer einem Intervall von U -Werten einen Wert c zuordnen, entspricht bei Beyer jedem U genau ein c -Wert. Damit können geringfügige Änderungen in der Kornverteilung eher berücksichtigt werden. Bei Hazen existieren nur wenige c -Werte, weshalb das Verfahren nur zur groben Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes dienen kann.

9.2.4.2 Ergebnisse der Berechnungen

Anhand der aus den Korngrößenanalysen ermittelten Verteilungskurven wurden nach DIN 18123 die Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt. Lediglich bei den Proben 1036-1, 1036-3a, 1036-3b und 1036-9 ist eine statistische Auswertung sinnvoll, da die Körner der restlichen untersuchten Proben bei der Aufbereitung nicht einwandfrei getrennt werden konnten. Die für die genannten Korngemische ermittelten k_f -Werte sind in Tab. 4 aufgeführt. In Anlage 3 sind die für die Berechnung zu Grunde liegenden Kornverteilungskurven zu finden.

An Hand der U -Werte wurden die k_f -Werte nach Beyer berechnet. Alle Proben weisen einen hohen Ungleichförmigkeitsgrad auf. Vor allem Probe 1036-1 liegt mit $U = 27,9$ über dem für Beyer geeigneten Bereich, wodurch der ermittelte Wert nur als Näherung angesehen werden kann.

Tab. 4: Ungleichförmigkeitswerte, Durchlässigkeitsbeiwerte und angewandte Methoden

| Probennummer | U | k_f [m/s] | Methode |
|--------------|------|------------------|---------|
| 1036-1 | 27,9 | $2,4 * 10^{-8}$ | Beyer |
| 1036-3a | 8,7 | $3,04 * 10^{-8}$ | Beyer |
| 1036-3b | 10,0 | $3,0 * 10^{-8}$ | Beyer |
| 1036-9 | 9,9 | $3,0 * 10^{-8}$ | Beyer |

Ungleichförmige Verteilungen verdeutlichen ein großes Spektrum an Korngrößen im entsprechenden Gestein. Von der Ungleichförmigkeit eines Korngemisches hängt die Porosität ab. Ein gleichförmiges Korngemisch ist durch einen kleinen U -Wert und eine steile Verteilungskurve gekennzeichnet und weist hohe Porositäten auf. Bei ungleichförmigen Sedimenten werden die Porenräume zwischen den Körnern von kleineren Korngrößen ausgefüllt, dadurch kommt es zur Verringerung des Hohlraumvolumens und der Einfluß der Kapillarkräfte der Körner wird vergrößert. Bei den bearbeiteten Proben handelt es sich um schlecht sortierte, ungleichförmige Gesteine, deren Porenraumvolumen gering ist. Ebenso ist die Verbindung der Poren untereinander nicht gewährleistet. Damit kann in dem Sedimentgestein nur ein geringer Wassertransport erfolgen. Aufgrund der Durchlässigkeitsbeiwerte sind die entsprechenden Schichten der genannten Proben als Grundwassernichtleiter anzusehen.

Auch für Proben, die sich während der weiteren Bearbeitung als nicht komplett aufgeschlämmt erwiesen, wurde nach DIN 18123 ein scheinbare Ungleichförmigkeits- und Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt.

Probe 1036-4 weist einen Schlämmerkornanteil von ca. 98 % auf, welcher im Atterberg-Zylinder in Ton- und Schluffraktion aufgeteilt wurde. Die quantitative Bestimmung mittels Lumosed konnte nicht durchgeführt werden, da die Probe trotz Dispergiertmittel zur Aggregatbildung neigte. Da der Einfluß des Sandanteils in dieser Probe sehr gering ist, kann die Richtigkeit des berechneten k_f -Wertes im Bereich von 10^{-8} m/s angenommen werden. Einen geringeren Schlämmerkornanteil besitzt Probe 1036-2. Nur ca. 70 % der Probenmasse konnten als Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$ mit Hilfe von Lumosed genau bestimmt werden. Demnach sind ca. 30 % der Masse der Sandkorngröße zuzuordnen und stellen zum Teil Verklebungen der Komponenten dar. Statistisch wurde ein Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-8} m/s berechnet. Auch bei scheinbarer Vergrößerung des Kornspektrums kann daher davon ausgegangen werden, daß es sich bei der Schicht um einen Grundwassernichtleiter handelt.

Dagegen ist die Einordnung der Proben 1036-6, 1036-10 und 1036-11 nicht ohne weiteres möglich. Der ermittelte Siebkornanteil überwiegt dem Anteil an Schlämmerkörnern, weshalb die berechneten Durchlässigkeitsbeiwerte für Probe 1036-6 bei 10^{-5} m/s sowie für die Proben 1036-10 und 1036-11 bei 10^{-6} m/s liegen. Nach den ermittelten Werten stellen die Schichten Grundwassergeringleiter dar. Im Vergleich mit Richtwerttabellen für k_f -Werte verschiedener Lockergesteine (DUNGER 1994) bestätigt sich dieses Ergebnis. Dennoch

können genaue Aussagen zur Durchlässigkeit dieser Schichten - basierend auf den Korngrößenverteilungen - nicht getroffen werden.

9.2.5 Ablagerungsmilieu / Fazies

In Anlage 3 sind die Korngrößenverteilungen als Summenkurven dargestellt. Aus den Daten lassen sich statistische Kennwerte ermitteln, welche die mittlere Korngröße, den Grad der Streuung der Korngrößen um den Mittelwert, die Symmetrie und die Kurtosis der Kurve charakterisieren. Im folgenden werden entsprechenden Parameter kurz erläutert.

Aus der 50 %-Linie der Summenkurve ist der Medianwert M_d ablesbar. Jeweils zur Hälfte sind die Körner kleiner oder größer als dieser Wert. Um die Sortierung σ einer Verteilung festzustellen, wird die Streuung der Teilchen um einen Mittelwert berechnet. An Hand der Form der Summenkurve oder der Breite der Häufigkeitskurve ist dieser Wert einzuschätzen. Berechnungen basieren auf den Quartilen (25 %, 50 %, 75 %). Zur Kennzeichnung des zentralen Segments der Kurve wird der Sortierungskoeffizient S_0 nach TRASK verwendet, welcher sich aus $S_0 = (P_{25}/P_{75})^{1/2}$ ergibt. Ein Maß für die Streuung von 68 % einer Population stellt die Standardabweichung σ_Φ nach INMAN (1952) dar. Sie wird mit $\sigma_\Phi = 0,5 (\Phi_{84} - \Phi_{16})$ angegeben. Bei der graphischen Standardabweichung σ_1 von FOLK & WARD werden 90 % der Häufigkeitskurve berücksichtigt. Bei einem sehr gut sortierten Material liegt σ_1 bei $< 0,35$, während $\sigma_1 > 4,00$ auf extrem schlechte Sortierungen hindeutet.

Abweichungen des Medians von Mittelwert verweisen auf eine Schiefe SK_1 der Verteilung. Diese kann abhängig vom Anteil der Grob- und Feinfraktion positiv oder negativ sein und wird aus dem Unterschied zwischen Median und Mittelwert, bezogen auf den Korngrößenbereich, ermittelt. Werte zwischen +1 und -1 sind möglich, wobei +1 stark positiv und -1 stark negativ bedeutet.

Aussagen zur Form einer Häufigkeitskurve sind mit Hilfe der Kurtosis K_g (Gipfeligkeit) möglich. Sehr breitgipfelige Kurven ($K_g < 0,67$) werden als platykurtisch bezeichnet und verweisen auf eine schlechte Sortierung, während extrem schmalgipfelige Verteilungen ($K_g > 3,00$) leptokurtisch genannt werden und eine sehr gute Sortierung belegen.

An Hand der genannten Größen entwickelten verschiedene Autoren Modelle, die eine Abschätzung des Ablagerungsmilieus der Sedimente ermöglichen. Diese Methoden sind allerdings nicht eindeutig, weil sie zum Teil unterschiedliche Ergebnisse liefern. Anhand der Modelle von STEWART (1958) und PASSEGA (1964) wurde eine Einteilung des Materials der Quelhöhle versucht. In Abb. 24 bis 26 sind die Ergebnisse dargestellt. Dabei wurden nur Proben berücksichtigt, deren Aufbereitung und Siebung problemlos durchgeführt werden konnte, d.h. bei denen keine Aggregatbildung nachgewiesen werden konnten (Kapitel 9.2.2.3). Neben der metrischen Skala wird in diesen Modellen eine Φ -Skala benutzt, welche den negativen Logarithmus der Skalenwerte darstellt.

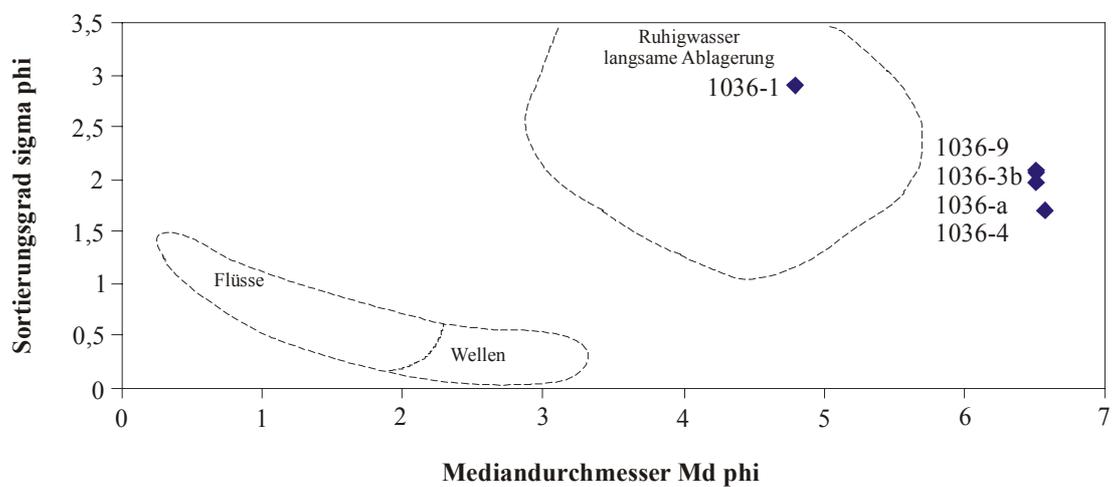


Abb. 24: Faziesrekonstruktionen nach STEWART (1958).

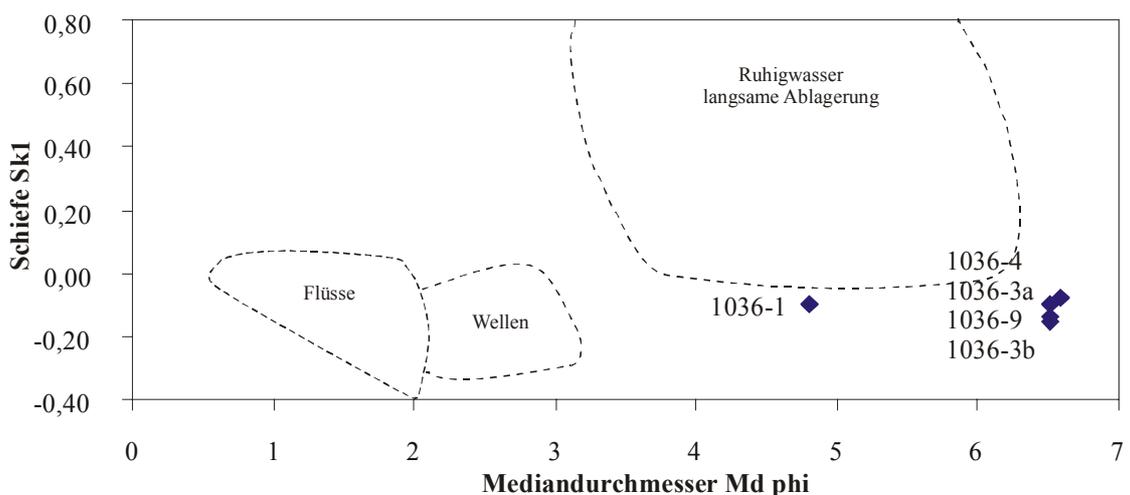


Abb. 25: Faziesrekonstruktion nach STEWART (1958).

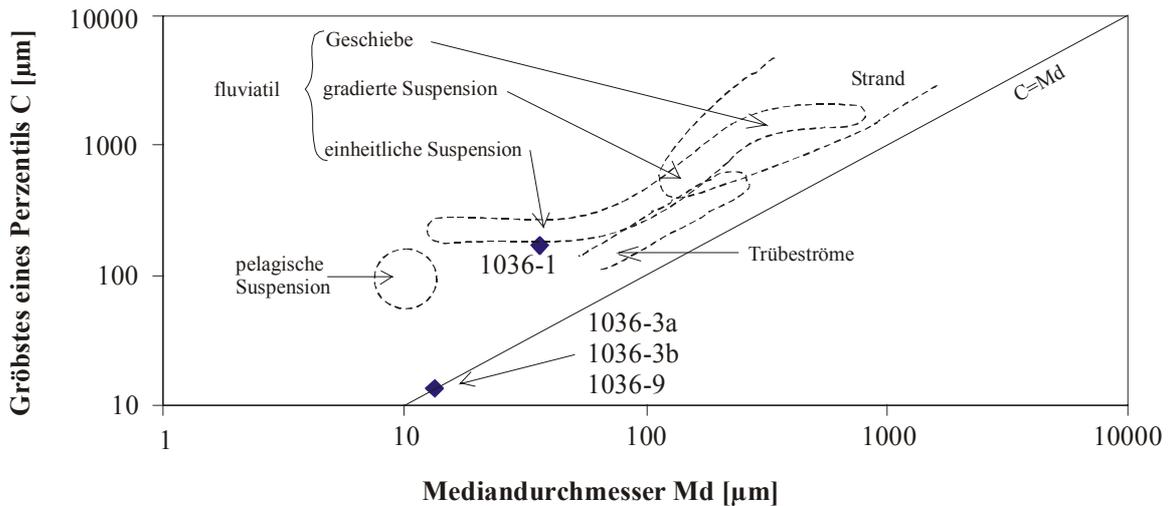


Abb. 26: Faziesrekonstruktion nach PASSEGA (1964).

In allen drei Diagrammen läßt sich Probe 1036-1 von 1036-3a, 1036-3b, 1036-4 und 1036-9 abgrenzen, welche als Gruppe mit ähnlichen Eigenschaften zu betrachten sind. Probe 1036-1 ist nach STEWART (1958) in ein Ruhigwassermilieu einzuordnen. Im Modell werden die Standardabweichung σ (nach INMAN) als Maß für die Streuung von 68 % der Population gegen den Mediandurchmesser $[\Phi]$ abgetragen. σ_1 liegt bei dieser Probe ungefähr bei 3, d.h. die Sortierung des Materials ist sehr schlecht. Im Ruhigwasser kann dies einen kurzen Transportweg der Körner vom Liefergebiet zum Ablagerungsraum bedeuten. Der Mediandurchmesser der Komponenten dieser Probe beträgt ungefähr $50 \mu\text{m}$ und die Kurve ist normalgipfelig ($K_g = 0,96$). Im Vergleich der Schiefe SK_1 mit dem Mediandurchmesser $[\Phi]$ liegt die Probe am Rande des Ruhigwasserbereiches. Mit einer negativen Schiefe von $SK_1 = -0,10$ überwiegen die größeren gegenüber den feineren Komponenten (REINECK 1990).

Dagegen ist die Probe im Modell von PASSEGA (1964) als Ablagerung einer fluvialen Fazies definiert. Es handelt dabei um die Sedimentation des Materials aus einer einheitlichen Suspension. In diesem doppelt logarithmischen Diagramm wird das Größte eines Perzentils gegen den Mediandurchmesser Md in μm aufgetragen, um die Dynamik in Ablagerungsräumen darzustellen. Dabei sollen stärkste Strömungen stabile Teilchengrößen definieren (TUCKER 1990)

Bei den Proben 1036-3 a, 1036-3 b, 1036-4 und 1036-9 liegen die Medianwerte etwas niedriger als bei 1036-1, d.h. σ_1 beträgt etwa 25 μm . Mit einer Standardabweichung von ungefähr zwei ist die Sortierung als schlecht anzusehen, jedoch sind die Proben besser sortiert als 1036-1. Ebenso wie die letztgenannte Probe weisen die Verteilungskurven von 1036-3a, 1036-3b, 1036-4 und 1036-9 negative Schiefen auf, zum Teil sind die symmetrisch. Die ermittelten Werte streuen zwischen -0,08 (1036-4) und -0,16 (1036-3b). Nach PASSEGA lassen sich die Proben keinem Milieu zuordnen. Aufgrund der Feinkörnigkeit des Materials wurden für die Auswertung die Mediandurchmesser der Verteilungen benutzt. Damit entsprechen sich das Größte eines Perzentsils und der Mediandurchmesser und die Proben plotten auf der Geraden $C = Md$. Probe 1036-4 liegt außerhalb des Diagrammbereiches. Bei Ablagerungen mit geringen Korngrößenschwankungen, wie sie die vorliegenden Proben aufweisen, können mit Hilfe des Modells von PASSEGA nur bedingt Ergebnisse erzielt werden (TUCKER 1990).

Als Sedimentationsmilieu der untersuchten Schichten können anhand der Ergebnisse der Korngrößenuntersuchungen ruhige Flachwasserbereiche angenommen werden. Eine hohe Transportenergie bzw. ein langer Transportweg müssen vom Liefergebiet zum Ablagerungsraum überwunden werden, um das Ausgangsgestein zu feinkörnigem Sediment zu zerkleinern. Für die Ablagerung sind niedrigerenergetische Verhältnisse notwendig. Vor allem See-Ablagerungen, Delta- und marine Küstenbildungen kommen für die untersuchten Sedimentproben in Frage.

Bei Bildungen in Seen ist durch die geringe Wellentätigkeit eine schlechte Sortierung und Rundung der Körner sowie eine geringe texturale und kompositionelle Reife zu erwarten, auch der Matrixanteil gibt Hinweise zur Reife des Gesteins. Seen wirken als „Sedimentfallen“ und ermöglichen auch die Ablagerung von Peliten. In gemäßigten Klimaten entstehen in tieferen Seebecken warvenartige Sommer- und Winterlagen. Nur die Schichten 3a, 4 und 3b weisen horizontale Schichtungen auf, welche allerdings nicht als Warven interpretiert wurden.

Weiterhin ist die Entstehung der untersuchten Sedimente als Deltabildungen möglich. Hohe Transportenergien können durch die Bewegung eines Flusses gewährleistet sein, während im beim Eintritt in flaches marines Milieu oder einen See die Sedimentfracht absinkt. Feinste Partikel bleiben in der Wasserssäule in Schwebe und werden als Basisschichten vor dem Delta abgelagert. Typische Deltabildungen zeigen ein coarsening upward, über den pelitischen Sedimenten lagern flaserige Schluffe, bedeckt von schräggeschichteten Sanden. Darüber hinaus können kalkige Schichten innerhalb sowie

kohlige Lagen am Top dieser Abfolge auftreten. Wenige marine Fossilien sind in den feinkörnigen Partien zu finden. Um die untersuchten Schichten als basale Bildungen einer Delta-Abfolge anzusehen, sollten im Hangenden dieser Pelite also schräggeschichtete Sandsteine zu finden sein. In Aufschluß 1009 wurden solche Schichten angetroffen.

Im marinen Bereich treten vielfältige Ablagerungsformen auf, welche von Faktoren wie Sedimentzufuhr, Tidenhub, Wellenbewegung, Meeresspiegelhöhe, tektonischen Schwankungen und klimatischen Bedingungen beeinflußt werden. Zahlreiche Schichtungsarten sind Kennzeichen für eine marine Entstehung, ebenso marine Fossilien sowie spezifische Minerale und Gesteinstypen.

Ob es sich beim Ablagerungsraum der untersuchten Sedimentite um ein flachmarines, brackisches oder lakustrines Environment handelt, kann mit Hilfe der angewandten Modelle nicht eindeutig geklärt werden. Modalbestand, Rundungsgrad der Körner sowie die Fossilführung sind zur Klärung dieser Fragestellung notwendig und werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

9.3 Mikroskopische Untersuchungen

9.3.1 Dünnschliffbeschreibung

1036-2

In diesem Gestein sind folgende Komponenten enthalten:

| | |
|---------------------|--------------|
| Quarz | 25 — 30 % |
| Gesteinsbruchstücke | 1 — 2 % |
| Organische Substanz | 2 — 3 % |
| Glimmer | akzessorisch |
| Fe-Oxide | akzessorisch |
| Matrix | 60 — 65 % |

Schlecht- bis kantengerundete Quarzkörner sind regellos im Gestein verteilt (Abb. 27). Mono- und polykristalline Quarze sind erkennbar; z. T. deutet undulöse Auslöschung auf metamorphe Überprägung der Ursprungsgesteine hin. Als Gesteinsbruchstücke treten schlecht bis kantengerundete, faserige Metamorphite, gut gerundete, karbonatische Sedimentite und kleine Quarzite auf.

Glimmer sind fetzenartig regellos verteilt, es handelt sich dabei hauptsächlich um Hellglimmer, der Anteil an Dunkelglimmern ist gering. Teilweise sind sie stark angewittert und unterschiedlich groß. Zwischen den Körnern befindet sich an einigen Stellen organische Substanz. In einzelnen Bereichen ist sie angereichert. Die bräunliche Matrix ist mikritisch, dicht und feinkörnig. Matrixgestützte Bereiche sind ebenso erkennbar wie komponentengestützte Areale. Porosität ist in Form von vugs und channels (CHOQUETTE & PRAY 1970) sichtbar und nimmt 10 — 20% des Schliffes ein. Die Porosität der Matrix wird nach der ARCHIE-Klassifikation (1952) auf Typ I/II geschätzt und beträgt 2 — 15 %. Nach DUNHAM (1962) handelt es sich um einen Wackestone/Packstone, nach FOLK (1959, 1962) um einen Intramikrit.

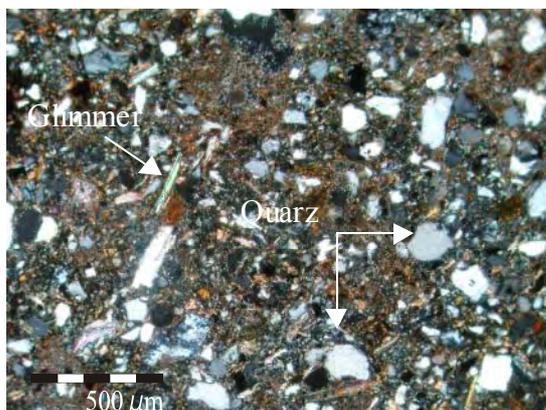


Abb. 27: Regellose Verteilung der Komponenten in bräunlicher, karbonatischer Matrix. Stengelige Glimmerminerale und Quarzkörner sind markiert. (50 fache Vergrößerung, gekreuzte Nicols)

1036-5

Dieses matrixgestützte Sedimentgestein beinhaltet

| | |
|---------|-----------|
| Quarz | 1% |
| Peloide | 2 — 3 % |
| Matrix | 96 — 97 % |

Dabei sind die Quarze transparent und Peloide sind als kleine braune, rundliche und strukturlose Körnchen, in der Matrix schwimmend, im Schliff erkennbar (Abb. 28). Darüber hinaus treten Biogenreste auf. Aufgelöste Muschelschalen sind mit Fe-oxidischen Rändern umsäumt.

Die hellbraune, dichte, mikritische Matrix entspricht dem Archie-Typ I/II, d.h. 2 — 15 % der Matrix sind Porenräume. Risse und Partikellösungsporen (CHOQUETTE & PRAY 1970) tragen zur sichtbaren Porosität bei.

Als Mudstone (DUNHAM 1962) oder Mikrit (FOLK 1959, 1962) kann das Gestein bezeichnet werden. Abb. 28 zeigt einen Biogenrest in der bräunlichen, feinkörnigen Matrix und vereinzelte Peloide.

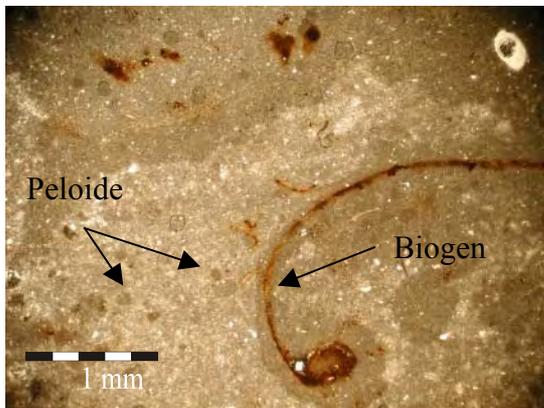


Abb. 28: Detailansicht eines Biogenrestes in mikritischer Matrix. Die Form des Biogens wird durch Anlagerung von Eisenoxiden markiert. In der hellbräunlichen Matrix sind rundliche Peloid-Aggregate erkennbar.

(25 fache Vergrößerung, gekreuzte Nicols).

1036-8

Folgende Anteile wurden im Schliff abgeschätzt:

| | |
|-------------------|-----------|
| Ooide | 50 % |
| Gesteinsfragmente | 10 — 20 % |
| Matrix | 20 % |
| Porenraum | 5 — 10 % |

Als Kerne der hellbraunen Ooide wurden verwitterte Quarzkörner, quarzreiche Gesteinsfragmente wie Quarzite sowie Biogenreste unterschieden. Die Hüllen der Ooide weisen unterschiedliche Dicken auf, wobei kleine Kerne allgemein dickere Krusten besitzen als größere Kerne; Tangential- und Radialooide konnten erkannt werden.

Neben umhüllten Gesteinsbruchstücken existieren gut gerundete, bis 1 cm große Metamorphit- und Magmatitfragmente, die Quarz-, Feldspat- und Glimmeranteile zeigen. Im Kontaktbereich zu den Komponenten ist die Matrix sehr feinkörnig und mikritisch, während sie in den Zwischenräumen sparitische Strukturen zeigt.

Umhüllte Biogene wurden teilweise herausgelöst, so daß intrapartikuläre Hohlräume entstanden. Außerdem sind Poren in Form von Schirmporen und Partikellösungsporen enthalten (Abb. 29). In ooidreichen Arealen im Schliff existieren zusätzlich interpartikuläre Poren (CHOQUETTE & PRAY 1970). Die sichtbare Porosität beträgt 5 — 10%, während die Matrixporosität nach ARCHIE (1952) mit 5 — 7% (Typ II/III) bestimmt wurde.

Generell ist das Gestein als Packstone/Grainstone (DUNHAM 1962) bzw. Oosparit (FOLK 1959, 1962) anzusprechen.



Abb. 29: Detailansicht von Komponenten mit dünner mikritischer Umhüllung („Rindenooiden“) in karbonatischer Matrix. Partikellösungsporen sind durch Pfeile gekennzeichnet. (25 fache Vergrößerung, gekreuzte Nicols).

Ähnliche Ausbildung zeigt die Probe 1036-12, die aus derselben Schicht stammt. Differenzen konnten nur in den Porositäten erkannt werden, diese sind im oberen Bereich der Sandsteinschicht geringer. Abweichungen der kompositionellen Zusammensetzung sind nicht festzustellen.

1036-12

Bei der Dünnschliffanalyse wurden diese Komponenten im Gestein unterschieden:

| | |
|------------|--------------|
| Ooide | 40 % |
| Quarz | 7 % |
| Plagioklas | akzessorisch |
| Matrix | 50 — 55 % |

Die Körner der Ooide sind schlecht gerundet und setzen sich aus Quarzkörnern und Gesteinsfragmenten zusammen (Abb. 30). Mehrere Lagen karbonatischen Materials umhüllen diese Kerne. Abb. 31 zeigt unterschiedliche Mächtigkeiten der ooidischen Krusten. Neben den Radialooiden sind auch Tangentialoide zu finden. Die Quarzkörner sind mono- bzw. polykristallin oder metamorphen Ursprungs und zeigen Lösungserscheinungen, unabhängig vom Vorhandensein einer Umhüllung.

Die Matrix dieses teils matrix-, teils komponentengestützten Gesteins ist hellgrau-weißlich und sparitisch. Sichtbare Porosität tritt im Bereich eines teilweise verfüllten Risses bzw. in Ooidhohlräumen (intrapartikulär, CHOQUETTE & PRAY 1970) auf und beträgt 3 — 5 %. Nach der ARCHIE-Klassifikation (1952) ist die Matrix als Typ I einzustufen und enthält 2 — 5 % Porenräume. Nach DUNHAM (1962) wird das Gestein als Wackestone/Packstone bezeichnet, nach FOLK (1959, 1962) als Oosparit.

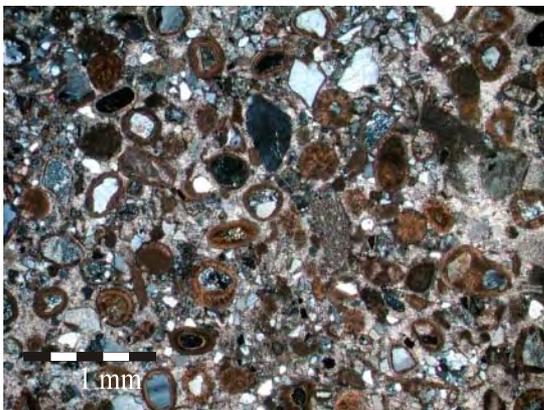


Abb. 30: Regellose Verteilung der Komponenten, unterschiedliche Dicken der Ooid-Hüllen. (25 fache Vergrößerung, gekreuzte Nicols).

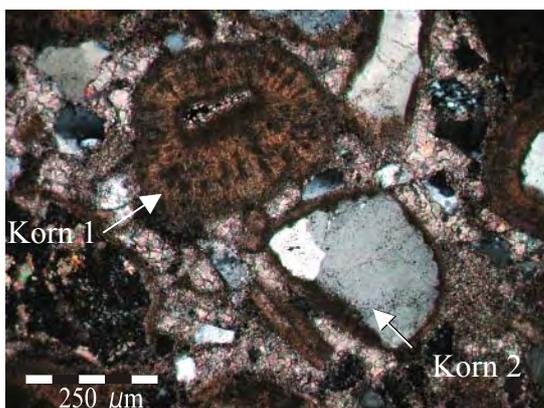


Abb. 31: Detailansicht unterschiedlicher Ooid-Typen. Korn 1: kleiner, gerundeter Kern und mehreren konzentrischen CaCO_3 -Lagen. Korn 2: größerer, schlecht gerundeter Quarzkern und nur eine Calcitlage. (100 fache Vergrößerung, gekreuzte Nicols).

9.3.2 Kornbeschreibung der Siebanalysen

Mit Hilfe der Siebanalysen wurde das Material aus zehn Schichten der Quelhöhle nach ihren Korngrößenfraktionen aufgeteilt. Zur Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes ist die Quantität der Fraktionen wichtig (Kapitel 9.2.4), in diesem Kapitel werden dagegen die Komponenten der Proben qualitativ beschrieben und daraus die möglichen Ablagerungsbedingungen rekonstruiert. Allgemein sind für die Genese feinkörniger Sedimente ruhige Wasserverhältnisse notwendig. In Seen, tiefmarinen Becken, in Lagunen und ... können sie entstehen. Zum Teil können an Hand der vorhandenen Komponenten Aussagen zur Entfernung des Liefergebietes getroffen werden.

1036-1

In dieser Probe sind neben sedimentären Gesteinsfragmenten vor allem schlecht gerundete Quarze, Ooide und Biogenreste enthalten. Bei den Biogenen handelt es sich vor allem Ostrakoden (*Cyprideis*) sowie Bruchstücke von Muscheln und Gastropoden. Weiterhin treten Glimmerminerale, Gipsplättchen und geringe Mengen von opaken Schwermineralen auf. Aggregate von karbonatischem und tonigem Material sind vorhanden.

Ooide verweisen auf flachmarine Milieus im Inter- oder Subtidal oder auf Lagunen als Ablagerungsgebiete. Des weiteren können sie in Frischwasserseen oder Flüssen entstehen. Übersättigte Lösungen und Nuclei sind für die Genese von Ooiden notwendig. Allerdings sind Ooide oft autochthon, der Entstehungsort muß daher nicht mit dem Ablagerungsort übereinstimmen. Auch die milchigen und klaren Quarzkörner sind schlecht bis kantengerundet, jedoch stabiler gegenüber mechanischer Zerkleinerung. Sie können daher aus einem etwas weiter entfernten, kristallinen Bereich heran transportiert worden sein.

Ostrakoden der Gattung *Cyprideis* kommen ebenfalls u.a. marin vor, während die schlecht gerundeten, kantigen detritischen Gesteinsbruchstücke aus einem relativ nahen Liefergebiet stammen. Die Ostrakoden bewohnen vor allem geringe Wassertiefen in marinen, brackischen oder Süßwassermilieus. In den Sedimentgesteinen der Türkei spielen sie von Oligozän bis Pleistozän eine Rolle (BASSIOUNI 1979). Sie besitzen bis ca. ein Millimeter lange, calcitische Gehäuse mit oder ohne Struktur. Morphologische Erhebungen waren auf den Gehäusen der *Cyprideis* des Untersuchungsgebietes nicht zu finden. Weitgehend gut erhalten sind die Reste der Biogene, sowohl dünne Ostrakodenschalen als auch Gastropoden liegen komplett und unzerbrochen vor. Es kann daher angenommen werden, daß höchstens schwache diagenetische Prozesse stattfanden.

Glimmerminerale werden aufgrund ihrer blättrigen Form oft aus grobkörnigen Sedimentgesteinen ausgewaschen und in Peliten angereichert. Ursprünglich entstammen sie vor allem metamorphen, aber auch magmatischen Gesteinen.

Aufgrund ihrer Stabilität gegenüber mechanischer Abrasion sind Schwerminerale in vielen Sedimentgesteinen enthalten. Häufig sind silikatische Minerale und Oxide. In der Probe treten opake Schwerminerale auf, wahrscheinlich Magnetit und Ilmenit. An Hand der charakteristischen Merkmale der Schwerminerale können Rückschlüsse auf die Liefergebiete der Sedimente gezogen werden. Da die spezifische Dichte der Schwerminerale über der des Quarzes liegt, liegt der durchschnittliche Korndurchmesser unter dem der Quarzkomponenten. Bei hoher Konzentration der Schwerminerale in Sedimenten können abbauwürdige Lagerstätten entstehen. In den vorhandenen Proben sind Schwerminerale nur akzessorisch enthalten.

1036-2

Vorrangig besteht dieses Material aus feinkörnigem, homogenem karbonatischen Material. Abdrücke von Muscheln und Ostrakodenschalen sind in diesem dichten Gestein enthalten. Aufgrund der Fossilführung kann das Gestein einem marinen Umweltbedingungen zugeordnet werden. Schlecht- bis kantengerundete Quarzkörner und Metamorphitbruchstücke wurden aus den kristallinen Gesteinen des Hinterlandes in das Ablagerungsareal transportiert, auch die detritischen, karbonatischen Sedimentite stammen aufgrund des guten Rundungsgrades aus einem distalen Liefergebiet, welches jedoch nicht mit dem der Quarzkomponenten übereinstimmen muß. Dagegen lassen sich aus dem Vorhandensein von Glimmern keine Rückschlüsse auf die Entfernung des Liefergebiet ziehen, nur ihre Herkunft aus magmatischen oder metamorphen Gesteinen des Hinterlandes ist anzunehmen.

1036-3a

Sedimentäre Gesteinsbruchstücke, Eisenoxide, Ostrakodenschalen, Biotitblättchen und opake Schwerminerale prägen dieses Material. Helle, detritische Sedimentitbruchstücke in dieser Probe sind gut gerundet. Allerdings geht die Rundung der Klasten aufgrund ihrer Instabilität mechanischer Beanspruchung gegenüber verhältnismäßig schnell von statten, so daß die Distanz zwischen Liefer- und Ablagerungsgebiet auch als proximal angenommen werden kann. Schlecht gerundete Quarzkörner treten nur untergeordnet auf, weshalb der Einfluß des kristallinen Liefergebietes vernachlässigt wird. Opake

Schwerminerale entstammen ebenfalls dem Hinterland. Ostrakodenschalen der Gattung *Cyprideis* liegen überwiegend detritisch vor, daher ist ein Transport der Fossilien wahrscheinlich.

Kontinentale Verwitterung wird als Ursache für das Vorhandensein von Eisenmineralen in Sedimenten angesehen. Durch intensive Verwitterung unter humidem tropischem Klima wird das Eisen aus den Gesteinen freigesetzt und in lateritischen Böden angereichert, erodiert und durch den Transport in Flüssen schließlich in den marinen Raum eingebracht. Eisen kann als kolloidale Verbindung, eingebaut in Tonminerale oder diese umschließend sowie durch diagenetische Prozesse in das Sediment gelangen. Für den Transport sind pH- und Eh-Werte ausschlaggebend, sie bestimmen die Wertigkeit des Eisens und damit die Mineralart. Während Fe^{2+} unter den natürlichen pH-Eh-Bedingungen im Wasser leicht löslich ist, liegt Fe^{3+} als schwerlösliches $\text{Fe}(\text{OH})_3$ vor. Bei den nachgewiesenen Eisenverbindungen handelt es sich wahrscheinlich um Goethit (α FeOOH) oder Limonit ($\text{FeOOH} \cdot n \text{H}_2\text{O}$), wobei Limonit meist als amorphes, gelbbraunes Verwitterungsprodukt von Eisenoxiden angesehen wird. In der Probe zeigten die Eisenminerale poröse, gelbrötlich-braune, strukturlose Aggregate mit welligen Oberflächen. An Hand der Eisenverbindungen im untersuchten Material kann eine Landmasse mit humidem Klima und intensiver Verwitterung in der Nähe des Ablagerungsgebietes vermutet werden.

1036-3b

Mikroskopisch konnten in dieser Probe Gesteinsfragmente, Quarze, Eisenoxide, Schalenreste und Schwerminerale unterschieden werden. Dabei bestehen die Gesteinsbruchstücke hauptsächlich aus gut gerundetem, sedimentärem Material, untergeordnet sind Metamorphite enthalten. Ein längerer Transportweg der Sedimente kann angenommen werden und die metamorphen Gesteine stammen, ebenso wie die opaken Minerale, aus dem kristallinen Hinterland. Klare und trübe Quarze liegen vor; sie wurden während des kurzen Transports aus dem Kristallin zum Ablagerungsgebiet nur schlecht bis kantengerundet. Wellige Oberflächen und eine rotbraune Färbung kennzeichnen die Eisenoxide. Primärstrukturen sind dabei nicht sichtbar. Teilweise ist ein Überzug des oxidischen Materials auf Bioklasten zu finden. Möglichkeiten zur Entstehung der Eisenminerale sind bei Probe 1036-3a beschrieben. Auch bei dieser Schicht kann von der Ablagerung in einem flachmarinen Milieu in der Nähe kontinentaler Bereiche ausgegangen werden.

1036-4

Neben karbonatischen Aggregaten sind in dem Material milchige und klare kantengerundete Quarze, Glimmer, Gipsplättchen, Eisenoxide und Schwerminerale enthalten. Die Nähe des Sedimentationsraumes zum Festland wird von den Eisenoxiden belegt (Probe 1036-3a). Während die Quarzkörner, Glimmerminerale und Eisenoxide aus verschiedenen Entfernungen in das Gebiet transportiert wurden, ist die Entstehung der Gipsplättchen in situ einzuordnen. Dabei kann deren Bildung prä- oder postdiagenetisch sein. Durch Eindampfen von Lösungen in abgeschlossenen Becken wie abflußlosen Binnenseen, Sabkhas, im Eulitoral- bis Flachwasserbereich oder Meeresbecken entstehen Evaporite, u.a. Gips. Innerhalb der Evaporit-Reihe wird der Gips nach den Tonen, Kalken, Dolomiten und Anhydriten abgeschieden, darüber folgen Kali- und Magnesiumsalze. Im Falle dieser Bildungsbedingungen sollten die Gipse in Lagen auftreten. Sowohl im Gelände als auch mikroskopisch konnte allerdings kein Verteilungstrend der Gipskristalle festgestellt werden. Eventuell wurden vorhandene Schichtungen durch Bioturbation zerstört und die Gipskristalle umgelagert. Möglich ist ebenso die postdiagenetische Entstehung durch das Ausfällen der Kristalle aus Lösungen der zirkulierenden Wässer. Dann wäre eine bevorzugte Verteilung der Gipse in den besser wasserleitenden Schichten anzunehmen, weil das unterirdische Wasser bevorzugt durch diese Lagen fließt und damit die Möglichkeit der Gipskristallisation erhöht wird. Zur Gipsgenese notwendiges Ca kann dabei aus dem karbonatischen Gestein stammen, während Sulfat aus der FeS_2 -Oxidation oder aus der in der Landwirtschaft üblichen Schwefeldüngung in das Wasser gelangt.

1036-5

Trübe und klare Quarzkörner sowie Biogenklasten, Hellglimmer (Muskovit, Serizit), opake Schwerminerale und Gipsplättchen sind in dieser Probe erkennbar. Bei den Biogenen handelt es sich um dunkelbraune, leicht rötliche Bruchstücke von Schalen, welche an die Panzer von Arthropoden erinnern. Auch in diesem Material treten schlecht gerundete Quarzkörner auf, die denen der unterlagernden Schichten ähneln und daher aus dem selben Liefergebiet stammen. Wie in Probe 1036-4 beschrieben, gelangen die Gipskristalle wahrscheinlich über zirkulierende Wässer in das Sediment.

1036-6

Vor allem Verbindungen aus Quarz, Glimmer und Ton sind in dieser Probe vorhanden. Daneben sind einzelne Quarzkörner, Gesteinsfragmente, Ostrakoden, grünlich-bräunliche Glimmer, wahrscheinlich Biotit und Phlogopit, und Gipsblättchen enthalten. Teilweise zeigen die Quarze karbonatische Umhüllungen, in diesem Fall sind die Körner selbst schlecht gerundet. Quarzkomponenten ohne Hülle sind gut gerundet. Für die Rundungsunterschiede im Vergleich mit den Schichten im Liegenden kann ein anderes, entfernteres Liefergebiet in Frage kommen. Wahrscheinlicher ist jedoch die Bewegung der Quarzkörner und die Rundung im Ablagerungsraum. Dabei erhielt ein Teil der Partikel eine karbonatische Hülle und wurde dadurch vor der mechanischen Zerstörung geschützt. Wie bei Probe 1036-1 beschrieben, ist für die Entstehung einer Hydrogenkarbonat-übersättigte Lösung notwendig. Ebenso denkbar ist die Aufarbeitung der umhüllten und hüllfreien Quarze in unterschiedlichen Milieus und die darauffolgende gemeinsame Ablagerung in einem Sedimentationsraum. Ostrakoden (*Cyprideis*) leben in marinen und brackischen Verhältnissen und erlauben daher keine genauen Schlußfolgerungen. Auch die Gipsblättchen geben keine Hinweise auf das Ablagerungsmilieu, da sie wahrscheinlich postdiagenetisch entstanden.

1036-9

Ein Großteil des Probenmaterials wird von Ostrakoden (*Cyprideis*) gebildet. Knochenbruchstücke sind ebenfalls enthalten, es handelt sich dabei um Teile von Wirbeln, Zähnen und Rippen, wahrscheinlich von Fischen. Art und Gattung der Fische sind unbekannt, so daß kein genauer Lebensraum abgeleitet werden kann. Ebenso kann an Hand der Ostrakoden keine Fazieseinteilung erfolgen, da diese sowohl in marinen als auch in brackischen Environments zu finden sind.

Weiterhin sind schlecht gerundete Quarzkörner aus proximalen Liefergebieten, sedimentäre Gesteinsfragmente mit geringem Rundungsgrad, Glimmer (Biotit, Phlogopit) und opake Minerale erkennbar.

1036-10

Neben Bruchstücken von Biogenkalken mit Schalenabdrücken, Hohlräumen und Rekristallisationserscheinungen sind in der Probe Gesteinsfragmente magmatischen und metamorphen Ursprungs enthalten. Diese sind ebenso wie die Quarzkörner schlecht bis kantengerundet. Daher ist ein proximales kristallines Liefergebiet für das Material dieser

Schicht denkbar. Verwitterungserscheinungen der zahlreichen weißen Bioklasten sind auf Bewegungen oder diagenetische Lösungsvorgänge zurückzuführen. Ostrakoden und Gastropoden sind in der Probe zu erkennen. Daneben treten grünliche, bräunliche Glimmerminerale (Biotit, Phlogopit) sowie opake Minerale und vereinzelt Gipsplättchen auf. Aufgrund der nachgewiesenen Komponenten kann diese Schicht als eine Flachwasserablagerung mit Eintrag von Fragmenten der umliegenden Kristallingesteine angesehen werden. Leichte Bewegungen des Wassers sind anhand der Abrasion der Biogene zu vermuten.

1036-11

Bei der Siebung dieses Karbonatgesteins konnten der ursprüngliche Modalbestand nicht quantitativ dargestellt werden, da sich die Methode der Siebanalyse für dieses Material als ungünstig erwies.

Hohlräume und Abdrücke von Fossilien, u.a. Bivalvenschalen, treten in dem dichten Material auf. Innerhalb der Poren befinden sich kristalline Calcit-Krusten und -Überzüge, zum Teil sind diese vollständig verfüllt. Das Material ist allgemein als porös zu bezeichnen. Eine biogene Entstehung kann angenommen werden. Organismen mit karbonatischen Skeletten bilden den Ursprung des Gesteins, wobei für das Wachstum der Organismen Faktoren wie Salinität, Temperatur, Wassertiefe und Sedimentzufuhr eine Rolle spielen. Bei Zufuhr großer Mengen silikatisch-klastischen Materials wird die Bildung der Kalksteine gestört.

Das gehäufte Auftreten von Muschelschalen kann dadurch erklärt werden, daß die Organismen während eines oder mehrerer Sturmereignisse aus dem Sediment, in dem sie leben, befreit und im Strandbereich zusammengespült wurden. Durch diagenetische Prozesse wurde die Ablagerung schließlich verfestigt und Rekristallisationsprozesse fanden statt.

Geringe Anteile von Glimmermineralen (Biotit, Phlogopit) wurden nachgewiesen, liefern jedoch wenig Anhaltspunkte für die genaue Rekonstruktion des Ablagerungsmilieus.

Während der Entwicklung des Gesteins können auch die Glimmer aus der Wassersäule in das Sediment abgesunken sein, jedoch nicht zum zeitgleich mit den Organismen, da Glimmerblättchen ein wesentlich ruhigeres Milieu zur Ablagerung benötigen.

9.4 Röntgendiffraktometrie

9.4.1 Theoretische Grundlagen

9.4.1.1 Methodik

Die Bestimmung des Mineralbestandes beruht auf der Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter einer Probe. Mit einer monochromatischen Strahlung mit der Wellenlänge λ , die von einer Anode ausgeht, wird das Material beschossen. Als Anodenmaterial finden u.a. Cu, Cr, Fe, Co, Mo und Ag Verwendung. In einem Winkel Θ trifft der Strahl auf die Probe und wird gebeugt. Dieser reflektierte Winkel Θ wird mit einem Detektor registriert und nach dem BRAGGSchen Gesetz

$$n \lambda = 2 d \sin \Theta \quad \{5\}$$

in Gitterebenenabstände d umgerechnet (TUCKER 1996). Tonminerale haben aufgrund ihres Aufbaus als Zwei-, Drei- oder Vierschichtminerale charakteristische Anstände in ihrem Gitter, anhand derer man sie bestimmen kann. In Diffraktogrammen erfolgt die Darstellung der Ergebnisse, in dem der Winkel 2Θ gegen die Intensität der Strahlung aufgetragen ist. Peaks zeigen die Existenz bestimmter Tonminerale. Abb. 32 zeigt beispielhaft die Diffraktogramme der Probe 1037-1, welche einem Aufschluß am Nordhang des Troia-Rückens entstammt und bei BERGMANN (2003) beschrieben ist.

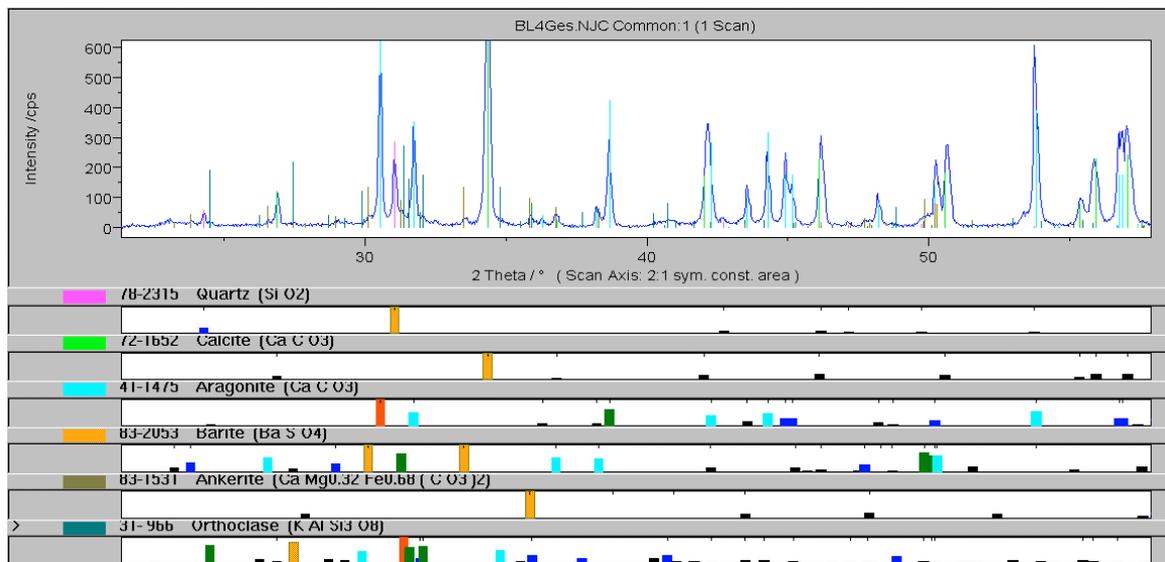


Abb. 32: Zuordnung der Röntgeninterferenzen (Ausschnitt) zu Vergleichsdaten aus PDF-4, Co-K α -Strahlung, 40 kV, mA, Graphitsekundärmonochromator, automatische Divergenzblende, Diffraktometer Philips PW 3020, 4-80 °2 Θ , Schritt 0,025, 3 sec/Schritt, am Beispiel der Probe 1037-1.

Zur Untersuchung werden verschiedene Präparate benötigt. Texturarme Präparate werden für einen ersten Überblick über die vorhandenen Minerale hergestellt. Auf einem Objektträger werden dafür bei Zimmertemperatur 30 — 40 mg Tonsubstanz aus einer Suspension eingetrocknet.

Texturpräparate werden zur genaueren Messung des Winkels Θ angefertigt. Ziel ist die parallele Einregelung der Tonteilchen auf dem Objektträger durch langsame Sedimentation. Neben diesen Mormalpräparaten werden „Quellungspräparate“ hergestellt (HEIM 1990). Dafür werden die Texturpräparate mit Ethylenglykol getränkt, wodurch H_2O verdrängt wird. Folge ist die Gitteraufweitung in Z-Richtung bei Dreischichtmineralen (HEIM 1990). Angewendet wird diese Methode wird zur Unterscheidung von Smectiten und Vermiculiten (LAGALY & KÖSTER 1993). Eine vollständige Dehydrierung der Probe wird durch das Glühen der Präparate bei $550^\circ C$ erreicht. Während der Prozedur verändern sich die Schichtgitter der Tonminerale und Chlorite kollabieren bei diesen Temperaturen (TUCKER 1996).

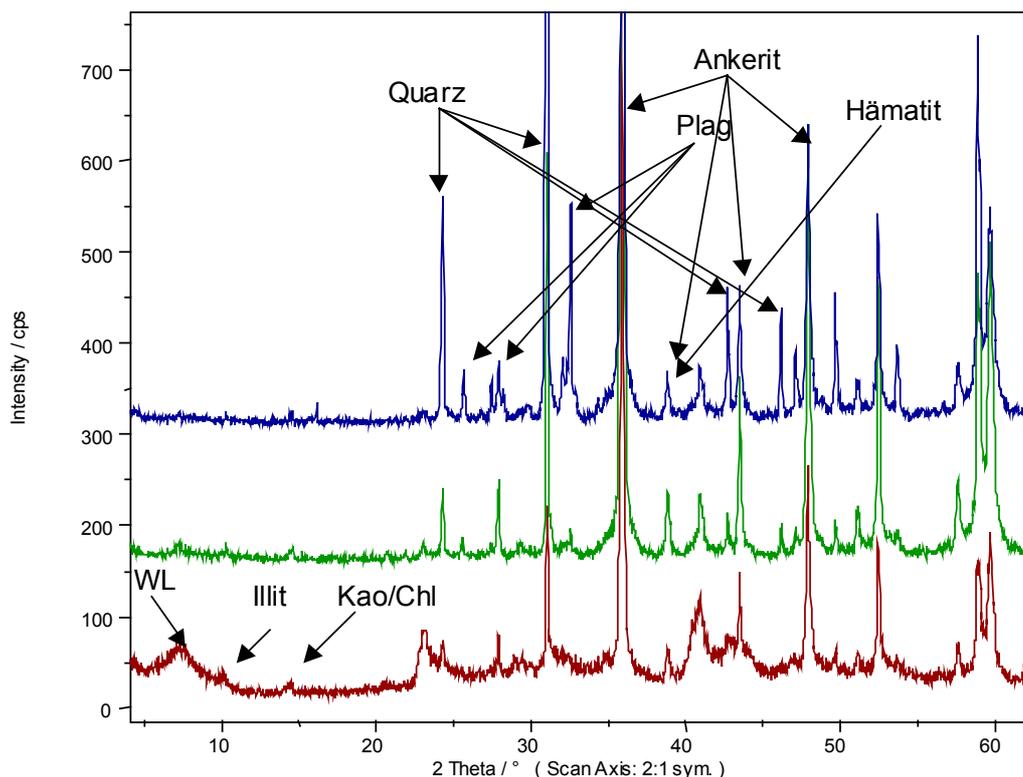


Abb. 33: Vergleich der Diffraktogramme von Texturpräparaten Probe 1036-3b, 2-63 μm , unbehandelt, Ethylenglykol, $550^\circ C$, Co-K α -Strahlung, automatische Divergenzblende, URD-6.

Am Beispiel der Probe 1036-3b sind in Abb. 33 die Effekte der genannten Behandlungen erkennbar. Z.B. sind die Interferenzen der Montmorillonit-Illit-Wechselagerung sind durch die Glykolierung verschoben. Im geglühten Präparat ist Kaolinit nicht mehr nachweisbar. Anhand der Unterschiede der ermittelten Kurven in den Diffraktogramm lassen sich die Tonminerale mit Hilfe der Glykolierung und des Glühens eindeutig identifizieren.

9.4.1.2 Qualitative Analysen

Anhand von analogen Vergleichen der Kurven der Diffraktogramme mit der ASTM-Kartei, in der die Kurvenverläufe einer Vielzahl von Tonmineralen registriert sind, können Tonminerale identifiziert werden. Ebenso kann die Bestimmung der Minerale mit Hilfe eines Computers erfolgen, wofür spezielle Auswertungsprogramme notwendig sind. Mit dem Programm „autoquan“ wurden die Ergebnisse der Analysen von Tonproben des Untersuchungsgebietes im Mineralogischen Institut der TU Bergakademie Freiberg ausgewertet.

9.4.1.3 Quantitative Analysen

Im Diffraktogramm geben die Intensitäten der reflektierten Strahlung Hinweise auf die Quantität der einzelnen Tonminerale, wobei die Intensität der Primärstrahlung, die chemischen Zusammensetzung der Probe und deren Korngröße das Ergebnis beeinflussen. Aus dem Integral der Peaks kann der Gehalt des entsprechenden Minerals ermittelt werden.

9.4.2 Durchführung

Etwa 20 g der trockenen Probe wurden repräsentativ abgetrennt und grob zerkleinert. Karbonate, Fe-, Mn-Oxide und Organika stören die röntgenographische Untersuchung und werden entfernt. Die in den vorliegenden Proben enthaltenen Karbonate wurden mit HCl gelöst. Um die Tonminerale dabei nicht zu zerstören, wurde Natriumacetat als Puffer benutzt. Zur Homogenisierung der Suspension erfolgte die Zugabe von zehn Milliliter destilliertem Wasser. Unter ständiger Kontrolle mit Indikatorpapier wurden wenige Milliliter 1:3 HCl zugegeben, bis der optimale pH-Wert von 4,5 erreicht war. Zur Beschleunigung der Reaktion wurden die Proben mehrfach vorsichtig bis auf 50 °C erhitzt.

Je nach Art der Probe waren 10 bis 30 ml HCl nötig, um das Karbonat zu lösen. Cl-Verbindungen, welche durch den Zusatz des HCl entstanden, wurden in einer Zentrifuge (Typ Hettich Rotanta T) ausgewaschen. Aus den Trockenmassen der karbonathaltigen und -freien Proben wurde der Anteil des Karbonats berechnet. Anschließend wurden die Proben in Fraktionen unterteilt. Die $> 63 \mu\text{m}$ -Fraktion wurde durch Schlämzung abgetrennt; die restliche Probenmasse teilte sich im ATTERBERG-Zylinder in die mittlere ($> 2 \mu\text{m}$) und feine ($< 2 \mu\text{m}$) Fraktion auf. Zur Messung wurden die Fraktionen einzeln vorbereitet und untersucht. Eine erneute Siebung durch ein $30 \mu\text{m}$ -Sieb war notwendig, um eventuelle Aggregate zu zerstören. Nach der Homogenisierung wurde das Probenmaterial auf Objektträger aufgetragen. Neben texturarmen wurden textuelle Präparate angefertigt. Ihre Bedeutung wurde im Kapitel 9.4.1.1 beschrieben. Schließlich wurden die Proben im Diffraktometer Philips PW 3020 gemessen.

In Abb. 34 sind die Diffraktogramme der Probe 1036-1, aufgeteilt in Fein-, Mittel- und Grobfraktion, dargestellt. Erkennbar sind die Anreicherung der Tonminerale in der Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ sowie das Vorhandensein von Quarz, Plagioklas, Ankerit und Hämatit im gesamten Korngrößenspektrum.

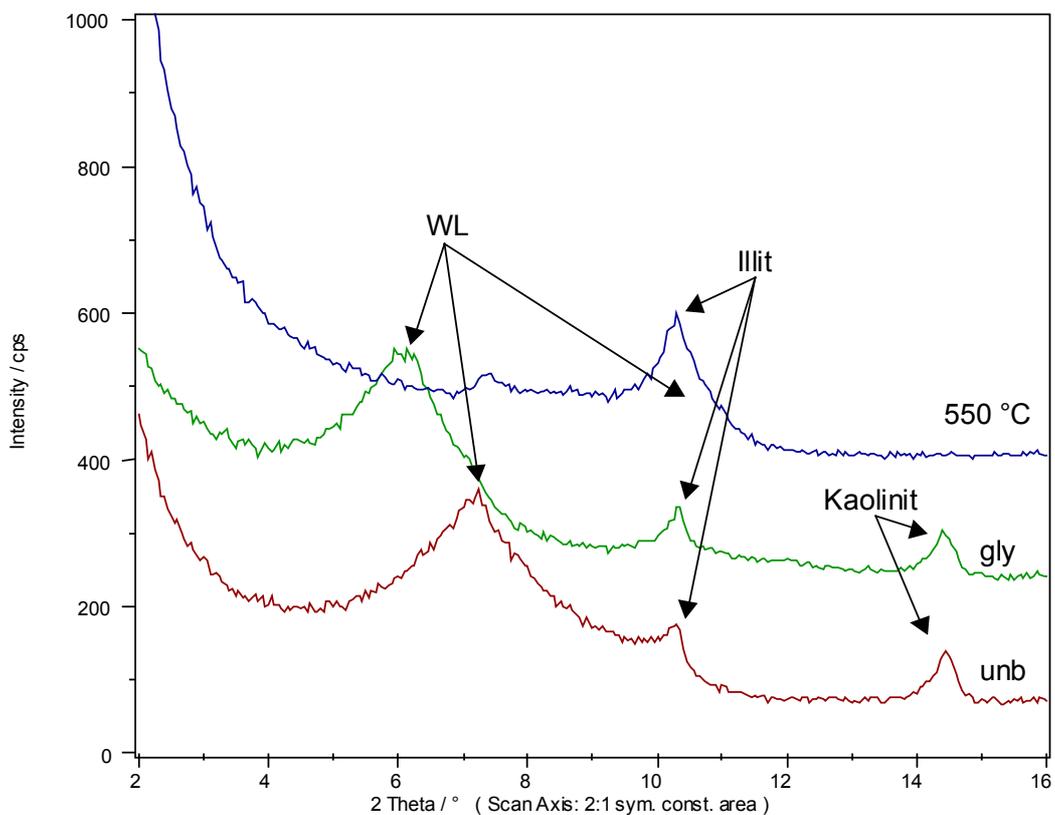


Abb. 34: Vergleich der Diffraktogramme (Ausschnitt) der Kornfraktionen $< 2 \mu\text{m}$, 2-63 und $> 63 \mu\text{m}$ von Probe 1036-2, wichtige Interferenzen markiert. Co-K α -Strahlung,

automatische Divergenzblende. Ankerit wurde in der Probenvorbehandlung nicht vollständig gelöst. Tonminerale in der Feinfraktion angereichert.

9.4.3 Eigenschaften und Genese der nachgewiesener Schichtsilikate

Zweischichtminerale

Kaolinit

Kaolinit gehört neben Nakrit, Dickit und Halloysit zur Gruppe der dioktaedrischen, aluminiumreichen Kaolinminerale mit der Formel $[\text{Si}_2\text{O}_5] [(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2(\text{OH})_4]$. Diese Zweischichtminerale entstehen bei der Verwitterung feldspatführender Silikatgesteine unter tropischen bis subtropischen Bedingungen (LAGALY & KÖSTER 1993, HEIM 1990). Pyroklastische Gesteine mit Biotit und Muskovit werden ebenfalls als Ausgangsgesteine betrachtet (HEIM 1990). Darüber hinaus kommt Kaolinit auf hydrothermalen Lagerstätten vor. Pseudohexagonale Blättchen sind die häufigste Erscheinungsform des Kaolinites, weiterhin treten gekrümmte prismatische Kriställchen auf (LAGALY & KÖSTER 1993). Unter den silikatischen Verwitterungsneubildungen zeigt der Kaolinit die größte Korngröße, er tritt sowohl im Schluffbereich als auch als Grobton in pelitischen Sedimenten auf (HEIM 1990).

Im Röntgendiffraktogramm ist dieses Tonmineral an den 7,14 Å bis 7,16 Å Basislinien erkennbar und kann damit bedingt von Chlorit unterschieden werden. Beim Glühen des Texturpräparates werden die Strukturen zerstört; die Basisreflexe verschwinden (LAGALY & KÖSTER 1993). Kaolinit ist nicht quellfähig (HEIM 1990).

Für die Bildung von Kaolinit sind geringe $\text{Si}(\text{OH})_4$ -Konzentrationen und ein niedriges Si/Al-Verhältnis in der Verwitterungslösung nötig. Eine langsame Al-Hydroxidfällung sowie ein saures Milieu (pH ca. 5) begünstigen ebenfalls die Entstehung der Zweischichtminerale. Zwischenschicht-Kationen, vor allem K^+ und Ca^+ , verhindern die Genese von Kaolinmineralen und sollten deshalb nur in geringem Anteil vertreten sein. Daraus resultiert auch das Fehlen von Kaolinit in marinen Environments, da pH-Wert und Kationenangebot im Meerwasser die Bildung unterbinden. Kaolinit wurde bisher nicht in marinen Sedimenten gefunden. Allerdings ist dieses Tonmineral weitgehend resistent gegen tektonische Beanspruchung, erst bei Versenkung in 3000 m Tiefe und Temperaturen über 100°C wird es instabil (HEIM 1990).

Dreischichtminerale

Illit

Illit als glimmerähnliches Mineral treten meist in dioktaedrischer Form, selten trioktaedrisch auf. Diese nicht quellfähigen Dreischichtminerale erscheinen als Aggregate von Einzelplättchen mit pseudohexagonalen oder unregelmäßigen Umrissen (HEIM 1990) oder in blättchenförmiger Gestalt bzw. als leistenförmige Teilchen. Dabei liegen die Korngrößen meist unter 0,6 μm (LAGALY & KÖSTER 1993). Im Diffraktogramm sind Illitminerale an breiten Basisreflexen erkennbar, mit abnehmender Korngröße nimmt dessen Breite zu. Als Teil der Muskovit-Illit-Reihe ist der Illit mit der Formel

$\text{K}_{x+y}[\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}][(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_{2-y}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_y(\text{OH})_2]$ mit $x+y \leq 1$ charakterisiert.

HEIM (1990) beschreibt die Entstehung in Folge der Muskovit-Verwitterung. Dabei wandern die K^+ -Ionen aus den Z-Schichten aus, in T-Schichten wird Al durch Si ersetzt und in den O-Schichten durch Fe^{3+} , Mg^{2+} und Fe^{2+} . Bei weiterführender Zersetzung des Materials entstehen letztendlich quellfähige Tonminerale. Unter hohen Temperaturen und Drücken kann die Entwicklung auch in umgekehrter Richtung ablaufen, d.h. aus quellbaren Dreischichtmineralen werden zunächst Illite, dann Muskovite.

Zur Genese von Illiten sind schwach saure, nicht zu K^+ -arme Milieus sowie eine mäßige Entwässerung notwendig. Bei Verstärkung dieser Faktoren wird die Bildung quellfähiger Minerale begünstigt. Günstige Bedingungen finden sich vor allem in Festlandsbereichen gemäßigt bis kühler Klimate in mittleren und höheren Breiten. Im marinen Bereich tritt keine Illitgenese auf, jedoch können nichtquellbare Dreischichtminerale in Meerwasser gut erhalten werden (HEIM 1990).

Montmorillonit

Montmorillonit ist ebenfalls ein dioktaedrisches Dreischichtmineral und gehört zur Gruppe der Smekтите. Im Gegensatz zum Illit ist er quellfähig. Durch eingelagerte Wassermoleküle können die Schichtabstände von 9,5 Å im dehydrierten Zustand auf 20 Å aufgeweitet werden (LAGALY & KÖSTER 1993).

Die Genese der Montmorillonite ist mit der Illitbildung verknüpft. Verwittern Glimmerminerale, kann es zur Entstehung der Smekтите führen. Am Beispiel des Illits ist die Degradation der dioktaedrischen Glimmer beschrieben. Auch die Montmorillonit-Genese ist von einem mäßig sauren pH-Wert und einem geringen K^+ -Angebot sowie von Entwässerung und Temperatur abhängig. Vor allem die festländischen Milieus außerhalb tropischer Klimazonen spielen für die Bildung eine Rolle. Nach LAGALY & KÖSTER (1993)

entstehen sie bei tropischer Verwitterung in Senken mit mangelnder Drainage anstelle von Kaolinit. Weiterhin können diese Tonminerale aus den Verwitterungsprodukten vulkanischer Tuffe und Aschen sowie basischer bis intermediärer glasreicher Vulkanite neu gebildet werden. In Tiefseesedimenten aller Ozeane sind Smectite die vorherrschenden Tonminerale.

Montmorillonit tritt im vorliegenden Probenmaterial in Wechsellagerung mit Illit auf. Charakteristika dieser Abfolgen sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

Illit-Montmorillonit-Wechsellagerung

Wechsellagerungen stellen Übergangszustände dar, bei denen noch kein thermodynamisches Gleichgewicht gefunden wurde. Meist sind quellbare und nichtquellbare Tone kombiniert, wobei die Ladungen für die Belegung der Schichten eine Rolle spielen. In Wasser können die Smektit-Lagen dann in einzelne Silikatschichten zerfallen. Hinweise auf autochthone Sedimentation sind durch die Wechsellagerungen gegeben, da die Strukturen keine großen Transportwege überdauern können. Aufgrund der Häufigkeit der beteiligten Tonminerale sind Wechsellagerungen oft anzutreffen (LAGALY & KÖSTER 1993). Neben regelmäßigen Wechsellagerungen existieren unregelmäßige sowie teilweise geordnete.

Bei unregelmäßigen Wechsellagerungen wie der nachgewiesenen liegt der erste Reflex zwischen den Peaks der einzelnen Minerale und kein Reflex liegt über dem höchsten Komponentenreflex. Kennzeichen für Illit-Smektit-Wechsellagerungen sind breite, variable, oft bauchige Beugungsmaxima zwischen 10 und 17 Å. Höhere Ordnungen treten nicht auf. Nach dem Glühen liegt der Peak bei 10 bis 11 Å. Durch die Glykolierung werden die primären Maxima zum Teil aufgespalten und verschoben (HEIM 1993).

Als Ursache für die Entstehung der Wechsellagerung wird eine beschränkte K^+ -Zufuhr während der Bildung in Betracht gezogen. Häufig sind Umwandlungen von einer Phase in die andere durch zunehmenden Auflastdruck und steigende Temperaturen.

Illit-Montmorillonit-Wechsellagerungen sind in zahlreichen Tonen und Mergeln anzutreffen (LAGALY & KÖSTER 1993). Sie werden auch als Rectorit bezeichnet.

Vierschichtminerale

Chlorite

Als Chlorite werden alle Vierschichtminerale bezeichnet. Nach ihrem Vorkommen in Böden oder Sedimenten werden nichtpedogene und pedogene Chlorite unterschieden. Dabei werden die Nichtpedogenen wiederum in di,trioktaedrische, tri,dioktaedrische und di,dioktaedrische Chlorite unterteilt, während pedogene Chlorite hauptsächlich trioktaedrisch sind (HEIM 1990). Erkennbar sind Chlorite an ihrem Basisreflex bei 6,0 bis 6,4 Å. Auch nach der Behandlung mit Glycerin oder Ethylenglycol liegen die Peaks in diesem Bereich, jedoch ändern sich die Intensitäten der Basisreflexe durch das Glühen bei 550 °C.

Chemismus, Herkunft und Genese der Chlorite sind vielfältig, je nach Art kann es sich um Detritus von Chlorit-Glimmerschiefern und anderen Metamorphiten oder diagenetischen Bildungen als Verwachsungen von Chlorit und Illit handeln. Außerdem können Chlorite magmatisch bei hohen Temperaturen sowie hydrothermal gebildet und umgebildet werden.

9.4.4 Ergebnisse

Neben Sedimentproben aus dem Kartierungsgebiet wurde Material aus fünf Schichten der Quelhöhle röntgenographisch untersucht. Die Methodik der Aufbereitung des Materials ist unter 7.4.2 beschrieben. Im Röntgenlabor des Institutes für Mineralogie an der TU Bergakademie Freiberg erfolgten die Analysen.

Ausgewählt wurden Schichten, die einen hohen Anteil an feinkörnigen Komponenten aufweisen und damit eventuell als Grundwassernichtleiter angesehen werden könnten. Die Ergebnisse sollten Aufschluß über die qualitative Zusammensetzung der feinkörnigen Fraktionen geben und damit eine nähere Klassifikation des Ablagerungsmilieus der Sedimente erlauben. Darüber hinaus sollten Unterschiede in der Tonmineralogie der beprobten und untersuchten Schichten Unterschiede in der Eignung als Grundwassernichtleiter verdeutlichen. Die Proben 1036-2, 1036-3a, 1036-3b, 1036-4 und 1036-5 wurden analysiert. Außerdem erfolgte die röntgenographische Untersuchung von fünf weiteren Proben aus verschiedenen Lokalitäten des Kartiergebietes. Die Beschreibung der betreffenden Analyseergebnisse ist in der Diplomarbeit von BERGMANN (2003) nachzulesen.

In Tab. 5 ist eine Übersicht über die prozentualen Anteile der nachgewiesenen Bestandteile mit dem ursprünglich enthaltenen Karbonat dargestellt. Dieses setzt sich aus Calcit, Aragonit und Ankerit zusammen. Eine Aufstellung der Phasen der karbonatfreien Probe, aufgeteilt auf die Korngrößenfraktionen $< 2 \mu\text{m}$, $2 - 63 \mu\text{m}$ und $> 63 \mu\text{m}$, befindet sich in Anhang 7. Die Analyse der Tonminerale mit der Röntgendiffraktometrie erfolgt generell nach der Entfernung der Karbonate, da diese eventuell zum Verkleben der Tonminerale führen können und den Nachweis damit erschweren bzw. die Ergebnisse verfälschen. Außerdem können die Nachweisintensitäten der Tonminerale im Röntgendiffraktogramm von denen der Karbonate überlagert werden, wodurch wiederum die Identifizierung der Phasen beeinträchtigt wird.

Tab. 5: Übersicht über die in den Proben vorhandenen Phasen in Prozent. Karbonat: Calcit, Aragonit, Ankerit, WL: Illit-Montmorillonit-Wechselagerung

| Probennummer | 1036-2 | 1036-3a | 1036-3b | 1036-4 | 1036-9 |
|----------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| Karbonat [%] | 70 | 48 | 45 | 52 | 82 |
| Quarz [%] | 6 | 11 | 12 | 9 | 3 |
| Hämatit [%] | Spur | - | - | - | - |
| Kalifsp. [%] | Spur | 3 | 3 | - | - |
| Plagioklas [%] | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Chlorit [%] | 3 | 4 | 7 | 4 | 1 |
| Kaolinit [%] | 2 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| Illit [%] | 5 | 10 | 7 | 8 | 4 |
| WL [%] | 12 | 23 | 22 | 23 | 7 |

Im folgenden werden die nachgewiesenen Minerale der untersuchten Proben und deren ungefähre Anteile in der Substanz beschrieben.

1036-2

Die Gesamtprobe besteht aus ca. 70 % Karbonat, welche bei der Aufbereitung entfernt wurden. Mehr als 30 % des karbonatfreien Materials sind Tone, während der Schluffanteil bei über 60 % liegt. Etwa 5 % der Komponenten sind größer als 63 µm. Die Tonfraktion besteht hauptsächlich aus einer smektitreichen Montmorillonit-Illit-Wechselagerung, Kaolinit und Illit, der Anteil von Quarz ist gering. Dagegen ist Quarz im Schluffanteil mit 36 % dominierend, während Chlorit, Plagioklas, Illit, Kaolinit und die Wechselagerung aus Montmorillonit und Illit in absteigenden Konzentrationen die restliche Substanz der Fraktion bilden. In der Sandkorngröße treten neben Quarz und Plagioklas Spuren von Illit, Chlorit, Kalifeldspat und Hämatit auf.

1036-3a

Nach der Herauslösung des Karbonatanteils von 48 % sind 40 % der Komponenten < 2 µm, 60 % sind schluffiges Material. Im Tonbereich ist vor allem die Wechselagerung Montmorillonit/Illit vorhanden, daneben existieren Anteile von Illit, Kaolinit und Quarz. Die Schlufffraktion wird von Quarz und der Montmorillonit-Illit-Wechselagerung geprägt. Darüber hinaus sind Tonminerale wie Illit, Kaolinit und Chlorit sowie Kalifeldspat und Plagioklas enthalten.

1036-3b

Die karbonatfreie Probensubstanz, 55 % der gesamten Probeneinwaage, enthält 37 % Ton sowie 63 % Schluff. Dabei besteht die Feinfraktion zu ca. 70 % aus der smektitreichen Wechselagerung. Weiterhin sind Quarz, Illit und Kaolinit vorhanden. Quarz und Chlorit bilden den Hauptanteil der Fraktion 2-63 µm; daneben beinhaltet dieser Korngrößenbereich Kalifeldspat, Plagioklas, Kaolinit, Illit und Montmorillonit-Illit.

1036-4

52 % des Probenmaterials wurde in Form von Karbonaten entfernt. Die restliche Substanz setzt sich aus 40 % Ton- und 60 % Schluff zusammen. Dabei bilden die smektitreiche Montmorillonit-Illit-Wechselagerung und Illit den Hauptanteil der Feinfraktion, geringe Mengen an Kaolinit und Quarz sowie Spuren von Chlorit konnten ebenfalls nachgewiesen werden. Quarz und die Wechselagerung aus Illit und Montmorillonit sind im

Schluffbereich vorherrschend. Chlorit, Illit und Plagioklas treten als Nebenbestandteile in Erscheinung. Darüber hinaus ist Kaolinit als Spur enthalten.

1036-9

Im Ergebnis der Analyse der unbehandelten Gesamtprobe zeigt sich ein Karbonatanteil von 84 %, welcher sich aus 47 % Aragonit, 34 % Calcit sowie 3 % Ankerit zusammensetzt. Muskovit und Illit bilden den Tonmineralanteil. Daneben existieren Orthoklas, Plagioklas (Albit) sowie Quarz in geringen Mengen.

Die karbonatfreien Probe besteht aus 43 % Ton und 56 % Schluff. Hierbei wird der Tonbereich von der Montmorillonit-Illit-Wechselagerung dominiert. Weiterhin treten Illit, Kaolinit und Quarz auf. Dagegen bildet Quarz den größten Anteil des Schluffes. In gleichen Mengen sind die Tonminerale Kaolinit, Illit sowie Montmorillonit/Illit vorhanden, während die Konzentration von Plagioklas geringer ist.

9.4.5 Interpretation der Ergebnisse

Aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung der Proben bezüglich ihrer Tonmineralogie werden die Ergebnisse insgesamt ausgewertet. Alle untersuchten Proben weisen hohe Gehalte an karbonatischem Material auf, welches aus Calcit, Aragonit und Ankerit bestand. Dieses wurde soweit möglich vor der röntgenographischen Analyse entfernt, da es sonst die Messungen stört. In den Probensubstanzen wurden Gehalte von Quarz, Kalifeldspat, Plagioklas, Chlorit, Kaolinit, Illit und der Illit-Montmorillonit-Wechselagerung nachgewiesen, in Probe 1036-2 traten zusätzlich Spuren von Hämatit auf. In den theoretischen Vorbetrachtungen (Kapitel 9.4.1) sind die Bildungsbedingungen der einzelnen Tonminerale beschrieben. Meist resultieren sie aus der Verwitterung von Silikaten, im Falle des Kaolinit werden feldspatführende Silikatgesteine als Ausgangsmaterial benötigt, während Illit und Montmorillonite aus der Zerstörung von Muskovit resultieren. Chlorit wiederum kann u.a. detritisch aus Chlorit-Glimmerschiefern hervorgehen. Die Genese der Tonminerale unterliegt verschiedenen Bedingungen. In einem schwach sauren Milieu entstehen Kaolinite, Illite und Montmorillonite, dabei unterscheiden sich die Minerale in dem Bedarf an Kationen im Bildungsbereich. Meerwasser spielt daher als Entstehungsmilieu keine Rolle, jedoch können die Tonminerale zum Teil darin erhalten bleiben. Für die Bildung von Kaolinit und Illit wird ein festländischer Bereich unter tropischem bis subtropischem Klima bzw. außerhalb tropischer Einflüsse angenommen. Im Falle der vorliegenden Proben bedeutet dies, daß die Verwitterung siliziklastischer Gesteine im Hinterland stattfand und die dadurch

entstandenen Minerale in das Ablagerungsareal im lakustrinen oder flachmarinen Bereich transportiert wurden. Auch das Vorhandensein von Hämatit als Eisenoxid in Probe 1036-2 läßt sich als Indikator einer kontinentalen Verwitterung unter tropisch-humidem Klima interpretieren.

Dagegen muß die Bildung der Illit-Montmorillonit-Wechselagerung als autochthon angesehen werden, da die feinlamierten Strukturen durch den Transport zerstört werden. Quarzkörner stammen ebenfalls aus den kristallinen Gesteinen des Hinterlandes, jedoch sind sie aufgrund ihrer Stabilität gegenüber Verwitterung noch als Quarzminerale erhalten. Konzentrationen von 4 bis 12 % wurden nachgewiesen. Bei Transport der Körner aus einem proximalen Hinterland könnte eventuell ein höherer Anteil an Quarz erwartet werden. Auf ähnliche Art sind die Feldspäte in das Sediment gelangt. Teilweise wurden sie zu Kaolinit zersetzt, andernfalls werden sie in ursprünglicher Form ins Sediment eingetragen. Ihr Anteil in Form von Kalifeldspat und Plagioklas beträgt nur 2 — 3 %, was auf ihre geringere Stabilität im Vergleich zum Quarz zurückzuführen ist.

Ein Kriterium zur Unterscheidung der Tonminerale ist deren Quellfähigkeit. Während Kaolinit und Illit in Verbindung mit Wasser nicht aufquellen, zeigt Montmorillonit ein anderes Verhalten. Für die Chlorite ist diese Fähigkeit nicht einheitlich.

Über 20 % des Probenmaterials der stratigraphischen Einheiten 1036-3a, 1036-4 und 1036-3b stellt die Illit-Montmorillonit-Wechselagerung dar. Als quellfähiges Mineral kann Montmorillonit das Wasserspeichervermögen der genannten Schichten erhöhen. Inwieweit sie aufgrund dessen als Aquicluden angesprochen werden können, ist allerdings nicht bekannt.

Im Material der Proben 1036-2 und 1036-9 sind etwa 10 % Wechselagerung enthalten, eine Beeinflussung der Wasserspeicherkapazität ist deshalb ebenfalls möglich.

10 HYDROGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE

10.1 Grundwasser

Im geologischen Untergrund ist die wasserungesättigte von der gesättigten Zone zu unterscheiden. Dabei ist die ungesättigte Zone nach oben durch die Erdoberfläche, nach unten durch die gesättigte Zone begrenzt. Sie ist als System der drei Phasen Gestein, Gas und Wasser charakterisiert und Adsorptions-, Kapillar- sowie Sickerwässer treten in diesem Bereich auf. Nach einem Übergang in Form des Kapillarsaumes folgt die gesättigte Zone. Sie erstreckt sich bis in Krustenbereiche, in denen zusammenhängende Poren- und Kluftsysteme nicht mehr existieren. Abhängig von der Lithologie kann sich dieser Bereich in Tiefen von 3000 m bei plutonischen und metamorphen Gesteinen bzw. bis 17000 m in tiefen Sedimentationsbecken erstrecken (MATTHESS & UBELL 1983). In der Sättigungszone herrscht ein Zwei-Phasen-System, in dem Wasser und Gestein nebeneinander vorkommen. Innerhalb der gesättigten Zone können die Durchlässigkeiten der Gesteine erheblich variieren. Als Aquifugen werden Gesteine bezeichnet, die Wasser weder transportieren noch speichern. Dagegen speichern Aquicluden das Wasser, lassen es jedoch nicht durch. Grundwassergeringleiter werden auch leaky aquifer genannt.

Wasserführende und -speichernde Schichten werden als Grundwasserleiter bezeichnet und in Kluft-, Poren- und Karstgrundwasserleiter unterteilt. Während das Wasser in Porengrundwasserleitern in den untereinander verbundenen Poren zirkuliert, bewegt es sich in Kluftgrundwasserleitern entlang der durch mechanische Beanspruchung hervorgerufenen Trennfugen im Gestein. Durch Lösungsvorgänge werden die Trennflächen in Kalk- und Dolomit-, Gips- und Anhydritgesteinen vom Grundwasser erweitert und durchflossen. Auf diese Weise gebildete zusammenhängende Hohlraumssysteme werden als Karstgrundwasserleiter bezeichnet. Hohlraumvolumen und Widerstand beeinflussen die Eigenschaften eines Aquifers. Für Sedimente lassen sich die Volumina im Labor ermitteln, bei Festgesteinen ist die genaue laborative Bestimmung kaum möglich. Der Widerstand wird von den Transport- und Fließeigenschaften des Fluids, der Oberflächenspannung am Übergang Gestein/Fluid, den Reibungskräften sowie dem Gefälle der wasserleitenden Schichten bestimmt. Anhand des DARCY-Gesetzes

$$v_f = k_f * \Delta i \quad \{6\}$$

mit v_f als Filtergeschwindigkeit, k_f als Durchlässigkeitsbeiwert und Δi als Gefälle kann die Filtergeschwindigkeit als Eigenschaft einer lithologischen Einheit ermittelt werden. Bei

Grundwasserleitern beträgt der Durchlässigkeitsbeiwert $> 10^{-5}$ m/s, während er bei Geringleitern im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-8} m/s und bei Nichtleitern bei $< 10^{-8}$ m/s liegt.

Während die Wasserleitfähigkeit in magmatischen und metamorphen Gesteinen hauptsächlich entlang von Korngrenzen, Klüften, Schicht-, Schieferungs- und Abkühlungsfugen sowie Lösungshohlräumen erfolgt, hängt sie bei Lockergesteinen und Sedimentiten vor allem vom Porenvolumen und der Verbindung der Poren untereinander ab. Unterschiedliche Faktoren wie Korngrößen, Sortierung, Rundungsgrad, kompositionelle und strukturelle Reife und Mineralogie der Komponenten sowie die Zementation der Körner spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Als Quellen werden örtlich begrenzte Grundwasseraustritte bezeichnet, die groß genug sind, um einen Abfluß zu gewährleisten. An tektonischen Störungen, Schichtgrenzen, Profilverengungen des Grundwasserleiters, bei Verringerung des Gefälles oder Verminderung der Durchlässigkeit des Gesteines können Wasseraustritte entstehen. Bei einem Stockwerksbau der sedimentären Schichten können mehrere Quellaustritte übereinander vorkommen. Meist tritt das Grundwasser aus verschiedenen Quellen aus, die sowohl eng zusammen liegen als auch über einen weiten Bereich verteilt sein können. Weiterhin können die Schüttungsmengen der Quellen stark schwanken. Für die Beurteilung der Nutzungsmöglichkeit sind Kenntnisse über die minimale Schüttung notwendig, zum Vergleich verschiedener Quellen werden meist mittlere Schüttungen verwendet. Eine Klasseneinteilung nach den Schüttungsmengen wurde von MEINZER (1923) erarbeitet, wird hier allerdings nicht angewendet.

10.2 Schüttungen

Schüttungsmessungen wurden in der Quellschale seit dem 16.06.1998 durchgeführt. In jenem Jahr wurde in den Monaten Juni bis August gemessen und 1999 von Anfang Mai bis Mitte August. Aus dem Jahr 2000 liegen keine Messungen vor. Zwischen Februar und Juli 2001 wurden Schüttungsmengen ermittelt, wobei nur die Daten vom Juli zuverlässig erscheinen und in der Auswertung berücksichtigt wurden. Für den Zeitraum von Anfang Oktober 2001 bis Ende 2002 ist eine durchgängige Meßreihe vorhanden. In Abbildung 12 ist ein Grundriß der Schale dargestellt, in welchem die Meßpunkte verzeichnet sind. Während der Grabungsperiode 2002 wurden die Schüttungsmengen ermittelt, welche aus dem Metallrohr unter Schacht 2 austraten, während die Messungen zu anderen Zeiten im Becken E unter Schacht 1 erfolgten. Da die Wassermengen aus den Gängen II und III im Sommer 2002 vernachlässigbar klein waren, sind die Werte der Meßpunkte Becken E und Schacht 2 vergleichbar.

Eine Übersicht über die ermittelten Schüttungsmengen der Quellschale zeigt Abb. 35. Die Werte streuen zwischen 0,14 L/min am 04.08.1998 und 2,16 L/min am 10.07.1998 und der Median der gesamten Meßreihe beträgt 0,5 L/min. In der Verteilung der Schüttungswerte in den Jahren 2001/2002 läßt sich erkennen, daß die Menge des ausfließenden Wassers in den Herbstmonaten sinkt und Ende Dezember, Anfang Januar einen minimalen Wert von 0,4 L/min erreicht. Anschließend steigt die Ausflußmenge bis Mitte März steil an, danach flacht die Kurve etwas ab. Anfang Juni erreicht die Schüttungsmenge mit 1,15 L/min ihr Maximum. In den Sommermonaten schwankt der Wert zwischen 0,85 und 1,07 L/min, bevor er ab Oktober erneut abnimmt. Da außer 2001/2002 nur in den Sommermonaten während der Grabungsperioden Messungen durchgeführt wurden, können Aussagen zu saisonalen Schwankungen nur bedingt getroffen werden.

Ein Vergleich dieser Kurve mit den gemessenen Schüttungsmengen der vorangegangenen Jahre zeigt kaum Übereinstimmungen. Während die Messungen 1998 starken Schwankungen zwischen 0,14 L/min am 04.08.1998 und 2,16 L/min am 10.07.1998 unterworfen sind, steigen sie im Meßzeitraum 01.05.1999 bis 17.08.1999 allmählich von 0,32 L/min bis 0,60 L/min. Meßwerte aus dem Jahr 2001 scheinen nicht zuverlässig zu sein, da über einen Zeitraum von 4 Monaten konstant Schüttungen von 0,25 L/min bzw. 0,30 L/min ermittelt wurden.

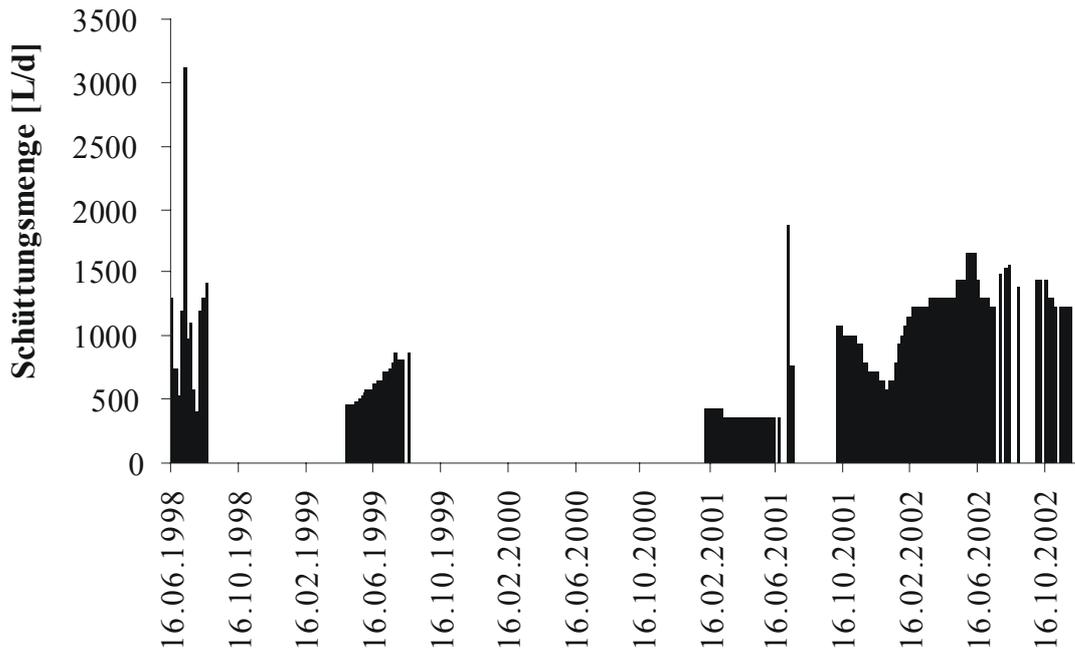


Abb. 35: Schüttungsmengen der Quelhöhle 1998 bis 2002.

Am 10.07.1998 wurden die größten Schüttungsmengen der gesamten Meßreihe ermittelt, An diesem Tag wurden im Çanakkale Niederschläge von 7,1 mm registriert. Allerdings kann ein direkter Zusammenhang zwischen den Größen ausgeschlossen werden, da unter Berücksichtigung des anstehenden Grundwassergeringleiters mit $k_f = 10^{-5}$ m/s eine enorme Zeitverzögerung beim Transport des Wassers zur Höhle und eine entsprechende Speicherwirkung durch die geringen Fließgeschwindigkeiten sowohl im Leiter als auch in den Nichtleitern zu erwarten ist. Konstante Schüttungsraten in den weitgehend trockenen Sommermonaten verweisen auf diesen Zusammenhang.

In Abb. 36 werden die Schüttungsmengen der Quelhöhle mit den Niederschlagsdaten der Meßstation Çanakkale im Zeitraum vom 17.06.1998 bis 08.11.2002 verglichen. Die Ähnlichkeit der Niederschlagsmengen in Troia und Çanakkale kann aus dem Vergleich der gemessenen Werte der Station Çanakkale mit denen des Landwirtschaftsbetriebes Tigem, etwa 5 km südlich der Ausgrabungsstätte Troia, abgeleitet werden.

Zwischen Ende September 1998 und Ende März 1999 dauerte die regenreiche Zeit in der nördlichen Troas an, anschließend ging der Niederschlag im Laufe des April allmählich zurück. In den frühen Sommermonaten schwankte der gemessene Niederschlag zwischen 0 und 5 mm/d, ein maximaler Wert von 24,9 mm/d wurde am 27.07.99 registriert. Im August und September fielen keine Niederschläge, erst im November begann der Zyklus von neuem. Die Niederschlagsmenge stieg bis zu einem Maximalwert von 46 mm/d am

18.02.2000 an und verringerte sich bis Mitte Juni auf 0 mm/d. Zwischen Juni und Oktober fielen nur am 12.08.00 4 mm Regen. Ein sprunghafter Anstieg der Niederschlagsmenge folgte im Oktober, die Maximalwerte lagen deutlich über denen der Jahre 1998 und 1999 und am 29.10.2000 wurden 101 mm gemessen. Die Regenperiode dauerte bis Anfang Mai an, danach herrschte bis November Trockenheit. Schon am 20.11.2001 fielen 123 mm Regen, dieser Niederschlagswert ist der höchste in der berücksichtigten Meßreihe. Eine Abnahme der Niederschlagsmengen bis Ende April konnte beobachtet werden. Im Jahre 2002 fanden auch in den Sommermonaten vereinzelte Regenereignisse statt, welche Schwankungen um einen Betrag von 3 mm/d aufwiesen und maximal 17 mm/d (27.07.02) erreichten. Zu Beginn des Septembers setzte die alljährliche Niederschlagsperiode ein. Da die Schüttungsmessungen hauptsächlich im Sommer durchgeführt wurden und für die Wintermonate, in denen der größte Teil der Niederschläge fällt, nur in einem Jahr Schüttungsmengen vorliegen, sind Aussagen über einen Zusammenhang schwierig zu treffen.

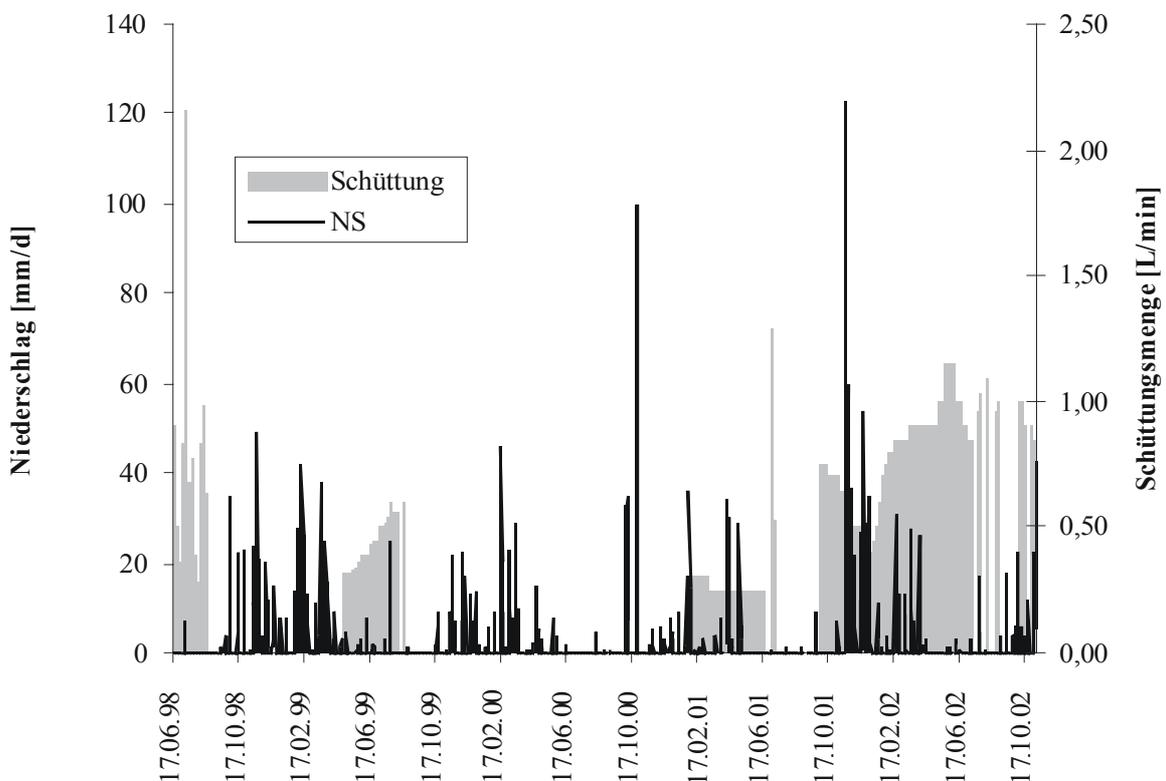


Abb. 36: Vergleich der Niederschläge der Meßstation Çanakkale mit den Schüttungsmengen der Quelhöhle.

Aus der Abb. 36 ist zu entnehmen, daß zwischen November 2001 und Januar 2002 die Niederschlagsmengen besonders hoch waren und zeitlich versetzt - Ende Januar bis Ende Februar 2002 - wurde in der Quelhöhle ein Anstieg der Schüttungsmengen registriert. Danach bleibt die Menge des ausfließenden Wassers relativ konstant, unabhängig vom Rückgang des Niederschlags. Diese Beobachtung verweist erneut auf die Wasserspeicherfähigkeit des Gesteins aufgrund des geringen Durchlässigkeitsbeiwertes, eventuell muß auch ein Einfluß der Wasserspeicherung in den Becken der Quelhöhle und ein damit verbundener verzögerter Abfluß aus dem System in Betracht gezogen werden. In den Jahren 1998 und 1999 zeigt sich der Wasseraustritt in der Höhle weitgehend unabhängig von den in Çanakkale gemessenen Niederschlagswerten.

Östlich von Gökçalı wird die Çonkbayırı-Formation, die den westlichen Troia-Rücken bildet, durch eine NNE—SSW-streichende Störung von der Alçitepe-Formation abgetrennt (BERGMANN 2003). Aufgrund des dadurch entstehenden Versatzes der sedimentären Einheiten kann die Schichtenfolge nicht weiter nach Osten verfolgt werden. Das Einzugsgebiet des Troia-Rückens wird daher nur bis zu der genannten Störung festgelegt. BLUME (2003) ermittelte eine Abschätzung der Grundwasserneubildung im Bereich des Troia-Rückens auf der Grundlage der Niederschläge, der realen Verdunstung (nach TURC) und der Oberflächenabflüsse anhand der Wasserhaushaltsgleichung. Für den Meßzeitraum 1994 bis 2001 ergibt sich eine mittlere Grundwasserneubildung von 60 mm/a bzw. $2 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$. Davon treten ca. 1 L/s, bezogen auf das Einzugsgebiet mit einer Größe von 22 km^2 , als Quellen auf dem Troia-Rücken wieder zutage, was etwa 6 % der Grundwasserneubildung entspricht. Genaue Beschreibungen der zugrundeliegenden Berechnung befinden sich in der entsprechenden Diplomarbeit. Es kann daher angenommen werden, daß aus den Niederschlägen im Bereich des Troia-Rückens genügend Wasser in den Untergrund infiltriert, um die Schüttungen der Quelhöhle zu erklären.

Aus den Eigenschaften der Sedimentgesteine und durch die Konstruktionsweise der Quellschale lassen sich die anhaltenden Schüttungen in den trockenen Sommermonaten erklären. Als Folge der Niederschläge im Winter infiltriert durchschnittlich 60 mm Wasser pro Jahr in das Gestein und ein Teil wird über den Grundwasserleiter mit einer geringen Fließgeschwindigkeit, verursacht durch die geringe Durchlässigkeit, auch in den Bereich der Quellschale geleitet. Über die Sandsteinschicht im Hangenden der tonigen Schluffstein-Abfolge an der Höhlenbasis tritt Wasser aus den Wänden in das Höhleninnere. Sinterbildungen entlang der Wände aller Gänge belegen die Wasserführung, im Gang III wurden sie auf ca. 4500 Jahre datiert (Kapitel 8.4).

Unterschiedliche Speicherbecken beeinflussen den Verlauf des Wassers in der Höhle, in dem sie das Wasser aufnehmen und zeitlich versetzt wieder abgeben. Unter Schacht 4, dem südöstlichsten Punkt des bisher erschlossenen Höhlensystems, wurde in historischer oder prähistorischer Zeit ein Brunnen abgeteuft, in welchem sich das ganze Jahr über Wasser sammelt. Diese Wassermenge trägt nicht zu den Schüttungen bei, da ein ungehinderter Abfluß des Wassers aus dieser Zisterne unter derzeitigen Bedingungen nicht möglich ist. Das Niveau des Höhlenbodens unter Schacht 4 liegt ungefähr 27 cm niedriger als unter Schacht 3, diese Schwelle muß jedoch überwunden werden, damit das Wasser in Richtung Schacht 2 fließen kann. Folglich tritt entweder zwischen Schacht 3 und 4 nur wenig Wasser in das Höhlensystem ein oder aber das Grundwasser versickert in diesem Bereich in ein tieferliegendes Stockwerk.

Entlang des Ganges I b tritt Wasser in die Höhlengänge ein; zwischen Schacht 4 und 3 eindringendes Wasser wird aufgrund des zu Schacht 4 hin abfallenden Höhlenbodens bei niedrigem Wasserstand in die Zisterne geleitet. Gelangt es zwischen den Schächten 3 und 2 in den Höhlengang, wird es nach Nordwesten transportiert und hinter der in römischer Zeit errichteten Barriere angestaut. Auch in Gang I a existiert eine solche Mauer, deren Höhe etwa 0,80 m beträgt. In Gang I a mit einer Länge von 25 m entspricht dies einem Volumen von ca. 27 m³ bzw. in Schacht I b mit 72 m Länge etwa 60 m³, wobei diese Werte das maximale Volumen gespeicherten Wassers darstellen. Das in Gang I a gespeicherte Wasser kann nicht abfließen und verbleibt im Gang, teilweise versickert es in den unterlagernden Schluffsteinen. Im Jahr 2001 wurde in der Mauer in Gang I b ein Metallrohr installiert, daß den Abfluß des sich dahinter sammelnden Wassers gewährleistet. Es befindet sich allerdings nicht direkt auf der Sohle, so daß es bei zu niedrigem Wasserstand (< 5 cm) nicht zu einem Abfluß kommt.

Unter Schacht 2 befindet sich ein zweiter Brunnen, in dem sich, äquivalent zur Zisterne unter Schacht 4, auch im Sommer Wasser befindet. Es besteht keine direkte Verbindung dieses Wassers zum Höhlenausgang. Über diesem Brunnen tritt das Metallrohr aus der Barriere aus und liefert das Wasser aus Gang I b. Es wird in einer flachen Rinne am Brunnen vorbei durch den Gang I in den Hauptkorridor und in das Becken E unter Schacht 1 geleitet, in dem zum Teil die Schüttungsmessungen vorgenommen wurden. Zusätzlich fließt Wasser aus den Gängen II und III in den Hauptgang ein, im Meßzeitraum 2002 erfolgte dieser Zufluß jedoch nicht oder in zu vernachlässigender Menge. Vom Becken E aus gelangt es schließlich über einen weiteren schmalen Kanal zum Höhlenausgang und in die Becken vor der Höhle.

Generell sind die Meßreihen der Schüttung nicht umfassend genug, um weitreichendere Rückschlüsse zu ziehen. Aus regelmäßigen Aufzeichnungen der Wasserstände in den Wasserspeichern der Höhle könnten Aussagen zu einer möglichen Periodizität der unterirdischen Zuflüsse in Abhängigkeit von den Niederschlägen getroffen werden. Im August 2002 wurden daher im Becken E und in der Zisterne Multiparametersonden installiert, welche seitdem den Wasserstand und die Temperatur messen.

10.3 Grundwasserabstrom

Anhand des Grundwasserabstroms wird versucht, die potentiellen Wassermengen der Quelhöhle abzuschätzen. Dabei wird angenommen, daß das gesamte Wasser aus dem Grundwasserleiter im Bereich der Höhle aus der Erde tritt. Bei einer entsprechend kleinen Fläche ist diese Annahme möglich, zumal in direkter Umgebung der Höhle keine weiteren Quellen aus dem neogenen Sedimentgesteinen entspringen und Brunnen innerhalb der Ausgrabungsstätte im betrachteten Zeitraum trocken waren.

Der Grundwasserabstrom kann aus Grundwasserhöhengleichen- und Stromlinienplänen ermittelt werden (MATTHESS & UBELL 1983). Für die Berechnung wird die Transmissivität T des Grundwasserleiters, die Breite B des durchströmten Querschnitts und das Gefälle i benötigt. Nach der Formel

$$Q_{G.} = T * i * B \quad \{7\}$$

wird der Grundwasserabstrom pro Zeiteinheit bestimmt. Dafür wird der k_f -Wert des Grundwasserleiters mit 10^{-5} m/s angenommen und aus dem Normalprofil der neogenen Sedimente von BERGMANN (2003) läßt sich die Mächtigkeit m der wasserführenden Schicht mit 6 m entnehmen. Daraus ergibt sich nach der Gleichung

$$T = k_f * m \quad \{8\}$$

eine Transmissivität von $6 * 10^{-5}$ m²/s. Als Breite des durchströmten Querschnitts wurde die Ausbreitung des neogenen Plateaus bei Tevfikiye eingesetzt, um einen möglichst kleinen Bereich zu charakterisieren.

Für den kleinräumigen Bereich um die Quelhöhle ergibt sich ein Grundwasserabstrom von ca. 2 L/min bei einem durchströmten Querschnitt von 600 m Breite. Aus den Schüttungsmessungen in der Quelhöhle wurde ein Median von 0,5 L/min ermittelt, im Meßzeitraum 2002 betragen die Schüttungsmengen konstant ca. 1 L/min (Kapitel 10.2). Mit Hilfe des berechneten Grundwasserabstromes können die Wasseraustritte in der Quelhöhle demnach begründet werden. Ein geringer Durchlässigkeitsbeiwert wurde gewählt, der die Eigenschaften der wasserleitenden Schicht repräsentiert. In derartigen Lagen fließt das Wasser allerdings langsam genug, daß die Wassermengen innerhalb des Leiters über das gesamte Jahr ungefähr konstant bleiben und keine gravierenden jahreszeitlichen Schwankungen auftreten.

10.4 Wassertemperaturen

Messungen der Temperatur des Wassers in der Quellschale erfolgten in den Jahren 1998 und 2001 mit einem Quecksilberthermometer. Zwei Multiparametersonden Diver® der Firma Van Essen wurden am 31.07.02 im Becken E unter Schacht 1 (Seriennummer 36041) sowie in der Zisterne unter Schacht 4 (Seriennummer 36071) installiert und messen seitdem stündlich die Parameter Wassertiefe und -temperatur. Am Metallrohr unter Schacht 2 wurden die Temperaturen im Meßzeitraum 2002 mit Hilfe des Ultrameter 6 P der Firma Myron L Company diskontinuierlich ermittelt.

Wöchentliche Meßreihen liegen erst seit Februar 2001 vor. Im Sommer 1998 lagen die Temperaturen zwischen 18 und 19 °C, im August sank die Temperatur auf 16,5 °C. Nach der Grabungsperiode wurden keine Messungen vorgenommen und auch für die Jahre 1999 und 2000 sind keine Werte bekannt. Erst im Februar 2001 begannen andauernde Messungen, zu diesem Zeitpunkt wurden eine Wassertemperatur von 8 °C registriert. Ein allmählicher Anstieg der Temperaturen folgte bis im Juli ein Maximum von 17,5 °C erreicht wurde. Bis Mitte Oktober blieb der Wert konstant bei 17,0 °C, danach fiel er bis auf 6 °C am 04.01.02. Ab dem 11.01.02 stiegen die Temperaturen bis März an, nach einem kurzzeitigen Maximum von 11,0 °C am 15.03.02 fand eine Abkühlung um 1 K statt. Erst seit Mitte April erwärmte sich das Wasser kontinuierlich bis Ende August die Jahreshöchsttemperatur von 17,9 °C erreicht wurde. Schließlich fielen die Temperaturen bis auf 8 °C am Ende des Jahres.

Abb.37 zeigt die Temperaturen des Wassers in der Quellschale zwischen Februar 2001 und Dezember 2002 im Vergleich zu den in Çanakkale gemessenen Lufttemperaturen. Eine weitgehende Übereinstimmung kann in der Darstellung erkannt werden, der Temperaturverlauf des Wassers der Schale spiegelt mit nur geringer zeitlicher Verzögerung die Entwicklung der Lufttemperaturen in Çanakkale wider. Jedoch sind die Schwankungen der Wassertemperatur wesentlich geringer als die der Lufttemperatur: während in Çanakkale Differenzen von ca. 30 K registriert wurden, betragen die der Werte der Schale nur etwa 10 K. Ein Einfluß der Atmosphärentemperatur auf das im Grundwassergeringleiter fließende Wasser kann dennoch weitgehend ausgeschlossen werden, da die Temperaturen innerhalb eines Aquifers kaum jahreszeitliche Schwankungen aufweisen. Wahrscheinlicher ist, daß die Messungen im Becken E im Eingangsbereich der Schale durchgeführt wurden, dort beeinflußt die Außentemperatur auch das Wasser des kleinen Wasserspeichers.

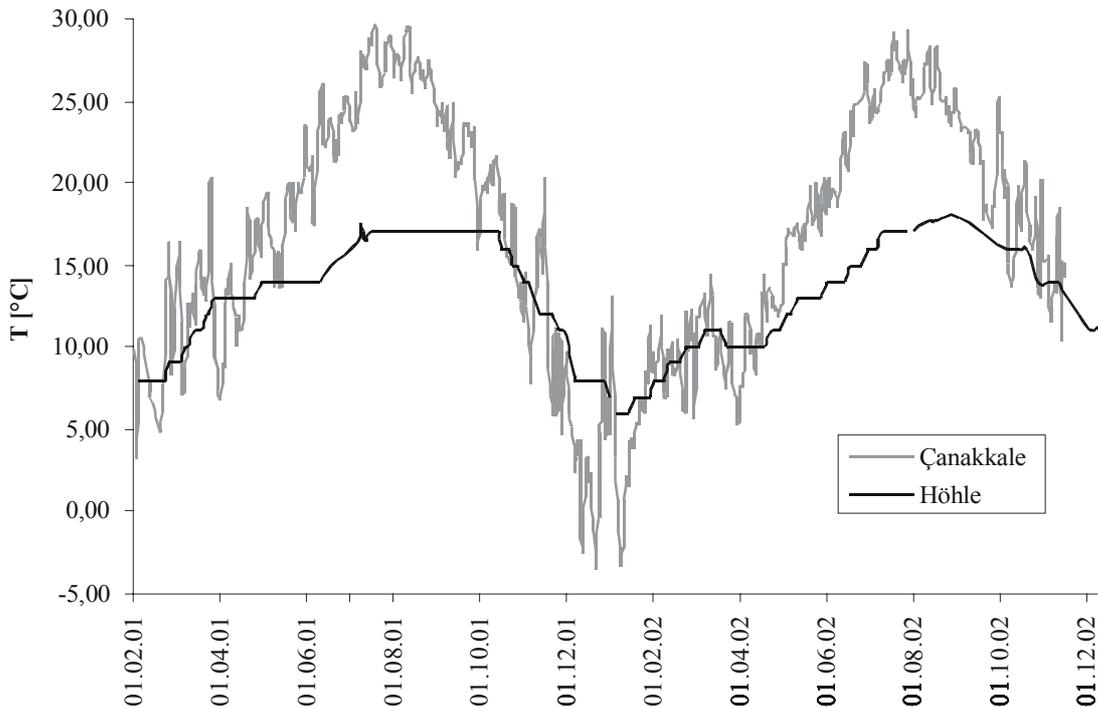


Abb. 37: Vergleich des Temperaturverlauf des Wassers in der Quelhöhle (Messung mit Handthermometer, Meßgenauigkeit ± 1 K) mit den Temperaturen der Station Çanakkale. Meßzeitraum Februar 2001 bis Dezember 2002.

Aus den Ergebnissen der Diver-Messungen lassen sich die Schwankungen der Temperaturen im Tagesverlauf ableiten, sie sind in Abb. 38 graphisch dargestellt. In erster Linie ist zu erkennen, daß die Temperatur des Wassers in Becken E den unter Schacht 2 gemessenen Werten ähneln und generell etwa 1 K über denen der Zisterne liegen. Auffällig sind die erhöhten Werte der Meßreihe von Becken E in den Abendstunden. Zwischen 20 und 23 Uhr wurden die höchsten Werte gemessen, sie lagen bei etwa 17,5 bis 17,7 °C, während die maximale Temperatur 18,05 °C am 13.08.02, 20:00 Uhr betrug. Dagegen befinden sich die niedrigsten Werte im Bereich 17,3 bis 17,4 °C, sie wurden zwischen 8:00 und 13:00 Uhr registriert. In der Zisterne unter Schacht 4 treten nur geringe Schwankungen zwischen Tag und Nachttemperaturen auf, Abb. 36 zeigt einen stetigen Verlauf der Meßkurve. Ab Ende Juli 2002 stiegen die Temperaturen bis Mitte August leicht an und nahmen dann allmählich ab, dabei wurden im Meßzeitraum Unterschiede von ca. 1,5 K registriert. An zwei Tagen zeigen die Daten größere Abweichungen vom generellen Verlauf.

Aus den Meßdaten läßt sich ableiten, daß sich das Wasser unter dem Einfluß der Lufttemperatur erwärmt, über Nacht kühlt es sich analog zu den geringeren Außentemperaturen wieder ab, bevor es in den Morgen- bis Mittagsstunden seine geringste Temperatur zeigt. Danach beginnt die Erwärmung von neuem. Vor allem bei Becken E zeigt sich dieser Trend, in der Zisterne sind die Temperaturschwankungen wesentlich geringer. Grund für den Unterschied sind die unterschiedlichen Volumina der Wasserspeicher. Während sich im Becken E ca. $0,5 \text{ m}^3$ Wasser befinden, sind es in der Zisterne etwa 33 m^3 . Zudem liegt Becken E im Hauptkorridor nahe des Eingangs, durch den die warme Außenluft in die Höhle gelangt und die Temperaturen des Wassers beeinflusst. Zeitverzögert durch die Wärmespeicherkapazität des Wassers spiegeln sich die täglichen Schwankungen der Lufttemperatur in den gemessenen Werten wider.

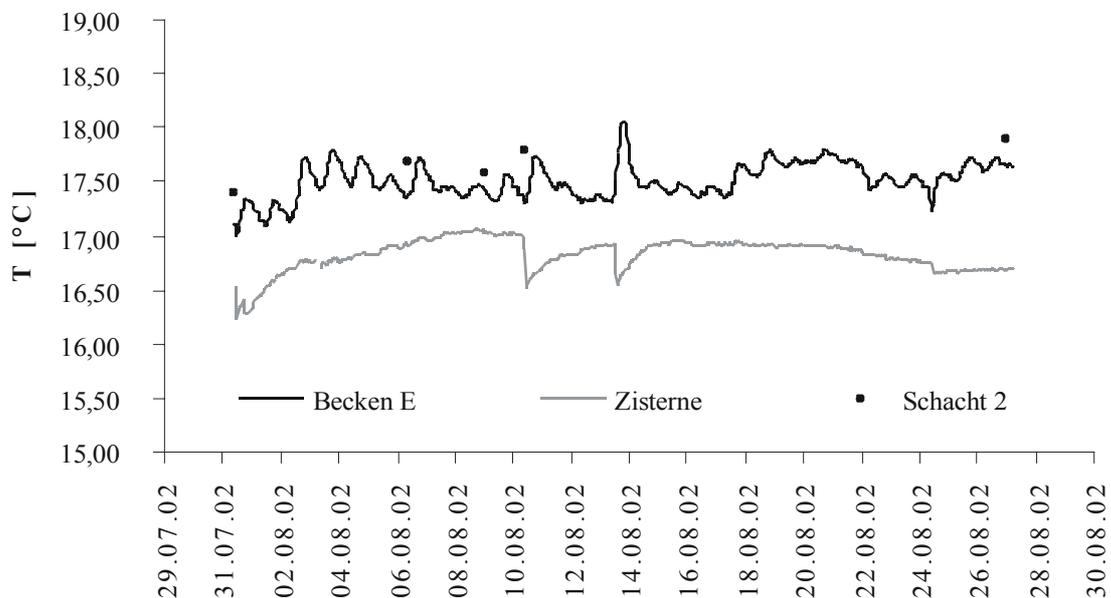


Abb. 38: Temperaturen des Wassers im Becken E unter Schacht 1, an der Meßstelle unter Schacht 2 und in der Zisterne unter Schacht 4 (Meßgerät: Diver® bei Becken E und Zisterne, Ultrameter 6 P von Myron bei Schacht 2).

Da das Volumen der Zisterne wesentlich größer als das des Beckens E, sind die Unterschiede zwischen Tag- und Nachttemperaturen minimal. Unter Berücksichtigung des aktuellen wassererfüllten Volumens der Zisterne von ca. 33 m^3 wäre nach der spezifischen Wärmekapazität des Wassers von $4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ eine Energiezufuhr von ungefähr 135 MJ notwendig, um das Wasser um 1 K zu erwärmen. Diese Energiedifferenz müßte durch die Lufttemperatur ausgeglichen werden, jedoch treten vermutlich nur geringe Schwankungen der Lufttemperatur in diesem Bereich der Höhle auf. Neben dem Gang I b stellt Schacht 4 den einzigen Kontakt der Zisterne mit der Erdoberfläche und damit der Außentemperatur dar.

Unter Schacht 2 läuft das Wasser, welches im Gang I b hinter der Barriere angestaut wird, durch ein Metallrohr und fließt durch eine Rinne im Boden in Richtung Höhlenausgang, dabei passiert es das Becken E unter Schacht 1. Eine Ähnlichkeit der Temperaturen vom Auslauf unter Schacht 2 und Becken E ist daher anzunehmen. Wie in Abb. 38 ersichtlich, konnte dieser Zusammenhang anhand der Messungen bestätigt werden.

In Abb. 38 sind weiterhin Sprünge der Wassertemperaturen zu erkennen, welche gegenläufige Entwicklungen in Becken E und der Zisterne kennzeichnen. Während der Verlauf unter Schacht 1 als reguläre Schwankung interpretiert werden kann, lassen sich die Abweichungen in der Zisterne nicht auf diese Weise erklären. Am Vormittag des 10.08.02, 13.08.02 und 24.08.02 kühlte sich das Wasser unter Schacht 4 um 0,5, 0,4 bzw. 0,2 K ab. Vergleiche mit den Niederschlagsereignissen und der Lufttemperatur, gemessen in der Station Çanakkale, konnten keinen Zusammenhang mit der Entwicklung der Wassertemperatur zeigen. Ebenso kann eine Manipulation der Multiparametersonde (Diver®) ausgeschlossen werden, weil sich aus den Messungen des herrschenden Wasserdrucks keine Änderung der Lage erkennen läßt. Jedoch wurde aus den vorhandenen Feldbucheinträgen rekonstruiert, daß sich an den entsprechenden Tagen Personen im Bereich der Vorkammer des Schachts 4 befanden. Eine Beeinflussung der Messungen ist wahrscheinlich, da Durchmischungen des Wassers und das Einbringen von Suspensionen sedimentären Materials in die Zisterne nicht ausgeschlossen werden können. Aus dem Diagramm läßt sich erkennen, daß das Gerät zwei bis drei Tage benötigte, um wieder Temperaturen zu messen, die in etwa den Ausgangswerten entsprechen.

10.5 Potentielle Grundwasserleiter

Neben dem in Kapitel 9.1 beschriebenen Grundwassergeringleiter befindet sich ein zweiter Grundwasserleiter unterhalb der beschriebenen Abfolge. In den von BERGMANN (2003) erstellten Profilschnitten ist er als 6 — 7 m mächtige Schicht erkennbar, welche nach Westen unter die quartäre Ebene abtaucht. Für die Wasserführung in der Quelhöhle hat diese sedimentäre Einheit nur bezüglich der Brunnen unter den Schächten 4 und 2 Bedeutung. In der Abb. 39 ist die prinzipielle Lage der Quelhöhle in den lithologischen Einheiten dargestellt, das W—E-Profil zeigt einen Schnitt (nach BERGMANN 2003) durch das Einzugsgebiet des in der Höhle austretenden Wassers.

Zisterne unter Schacht 4

Auf Höhlenniveau liegt die Oberkante der Zisterne in einem feinkörnigen Sediment mit hohem Tonanteil, welches als Grundwassernichtleiter eingeordnet wurde. Im Hangenden befindet sich der Grundwassergeringleiter, aus welchem das Wasser in die Gänge I a und I b eintritt. Lithologische Merkmale der Schichten im Liegenden konnten nur bis zu einer Tiefe von ca. 12 m über Normalnull vor dem Höhleneingang beschrieben werden, in dieser Höhe stehen ca. 1,5 m mächtige Schluffsteine an. Darüber folgt ein geringmächtiger, dichter Biogenkalk. Die genannten Schichten kommen als Grundwasserleiter nicht in Frage. Im Bereich von Schacht 4 befinden sie sich, bedingt durch das geringe Einfallen, bei etwa 14 m über Normalnull. Aus Bohrdaten läßt sich eine Endteufe von 9 m über Normalnull rekonstruieren, d.h. der Brunnenschacht verläuft über ungefähr 5 m in Schichten, die aufgrund der Aufschlußsituation nicht dokumentiert werden konnten. Wahrscheinlich wurde die Zisterne bis in den zweiten Grundwasserleiter abgeteuft; der Temperaturunterschied zu dem Wasser von Schacht 2 und 1 kann durch den Zustrom von kälterem, tieferem Wasser erklärt werden (Kapitel 10.4).

Bei einem Test am 20.08.2002, bei dem mit Hilfe eines Divers alle 10 cm Wassertiefe die Parameter Tiefe, Temperatur und Leitfähigkeit gemessen wurden, sollte eine eventuelle Schichtung des Wassers in der Zisterne nachgewiesen werden, es stellte sich jedoch als weitgehend homogen dar. Bei BLUME & WEBER (2003) sind Einzelheiten zu diesem Versuch vermerkt.

Brunnen unter Schacht 2

Im Falle des Brunnens unter Schacht 2 ist es ebenfalls wahrscheinlich, daß der Schacht den zweiten Grundwasserleiter erreicht. Die lithologischen Verhältnisse entsprechen denen bei Schacht 4. Dieser Brunnen wurde bis auf ein Niveau von 8 m über NN gegraben und ist wassergefüllt.

Während der archäologischen Ausgrabung im August 2000 wurden Wasseransammlungen in dem Brunnen beobachtet. In zwölf Stunden füllte sich der Brunnen 0,6 bis 1,2 m hoch mit Wasser. Bei einem Durchmesser von 1,65 m traten also 1,3 bis 2,6 m³ Wasser in den Brunnen ein. Zum Zeitpunkt der Ausgrabung des Brunnens im August 2000 war das Metallrohr unter dem Schacht 2 noch nicht existent, aus diesem Bereich konnte daher kein Wasser stammen. Auch durch Sickerwässer sind die Wasseransammlungen nicht zu erklären, wenn ähnliche Schüttungsmessungen wie im Meßzeitraum 2002 angenommen werden. Eine durchschnittliche Schüttung von ca. 1 L/min wurde zu dieser Zeit am Metallrohr unter Schacht 2 ermittelt, in 12 Stunden fließen also nur 0,72 m³ aus.

Des weiteren kann beobachtet werden, daß das Wasser, welches heute aus dem Metallrohr ausfließt, in einer Vertiefung am Brunnen vorbei geleitet wird. Diese Rinne ist mit unbehauenen Gesteinsbruchstücken abgedeckt. SCHLIEMANN (1884) entdeckte über dieser Leitung Reste römischer Tonröhren, welche ebenfalls zum Wassertransport angelegt wurden. Das Wasser aus den Gängen I a und I b wird hauptsächlich in Richtung Schacht 1 transportiert bzw. hinter den Mauern angestaut und nicht in den Brunnen geleitet.

Beim Eintrag von Wasser aus dem oberen Leiter in den Brunnen unter Schacht 2 kommt es zur Mischung mit dem Wasser des unteren Leiters. Ob in diesem Brunnen eine Schichtung des Wassers existiert, ist unklar, da bislang keine Meßwerte zu Parametern wie Leitfähigkeit und Temperatur ermittelt wurden. Es ist sinnvoll, diese Größen zu bestimmen, um eventuelle Differenzen zu den anderen Wasservorkommen der Höhle feststellen zu können. Es wäre z. B. wäre zu vermuten, daß das Wasser des unteren Leiters eine geringere Leitfähigkeit hat, wenn aufgrund seiner größeren Entfernung zur Erdoberfläche der Eintrag anthropogener Substanzen vermindert wird. Wie im Rahmen der Kartierung festgestellt, streicht die als unterer Grundwasserleiter angesprochene Schicht auf einem kleinen Areal ca. 1 km östlich von Çıplak bzw. annähernd am Fuß des nördlichen Hanges des Troia-Rückens östlich der Çıplak-Störung aus.



Abb. 39: Prinzipdarstellung der hydrogeologischen Verhältnisse. Für die Wasserversorgung der Quelhöhle relevante Grundwasserleiter sind blau markiert, im Ausschnitt Lage der Quelhöhle in der Abfolge (nicht maßstabsgerecht). Lithologischer Profilschnitt nach BERGMANN (2003), zehnfach überhöht.

10.6 Physikochemische Parameter des Wassers

10.6.1 Theoretische Grundlagen

10.6.1.1 Elektrische Leitfähigkeit und Gesamtmineralisation

Als Summenparameter für dissoziierte Stoffe in wäßriger Lösung dar liefert die elektrische Leitfähigkeit eine pauschale Aussage über die in einem Wasser enthaltenen, dissoziierten Stoffe (KÖLLE 2001). Sie basiert auf dem Transport von elektrischem Strom durch die Ionen und bei bekannter Ionenzusammensetzung und Äquivalentleitfähigkeit lassen sich Aussagen zur Konzentration treffen.

Temperatur und Konzentration des gelösten Stoffes beeinflussen diese Größe ebenso wie die Art der Dissoziation und der Dissoziationsgrad. Darüber hinaus ist die Leitfähigkeit von der Wertigkeit und der Wanderungsgeschwindigkeit der Anionen und Kationen abhängig (VOLKE et al. 2002).

In einer Meßzelle mit zwei Platinelektroden mit definierter Größe (1cm^2) und Abstands (1cm) wird der Widerstand der Flüssigkeit zwischen den Platten gemessen. Als Reziproke des spezifischen elektrischen Widerstandes ist die elektrische Leitfähigkeit χ definiert durch:

$$\chi = 1/\rho = 1/R * L/q \quad \{9\}$$

Dabei ist ρ der spezifische Widerstand [$\Omega * \text{cm}$], R der Widerstand [Ω], L die Länge [cm] und q der Querschnitt des Leiters (VOLKE et al. 2002). Elektrische Leitfähigkeiten werden in S/cm angegeben, bei geringen Leitfähigkeiten werden häufig die Einheiten mS/cm oder $\mu\text{S/cm}$ verwendet. (KÖLLE 2001, VOLKE et al. 2002) Reines Wasser besitzt eine spezifische Leitfähigkeit von $\chi = 4,2 * 10^{-2} \mu\text{S/cm}$ (HÖLTING 1996).

Als temperaturabhängige Größe ist die elektrische Leitfähigkeit auf $25\text{ }^\circ\text{C}$ normiert. Erfolgt die Messung bei abweichender Temperatur, muß der ermittelte Wert auf $25\text{ }^\circ\text{C}$ korrigiert werden (PEIFFER & PECHER 1997).

Eng verbunden mit der elektrischen Leitfähigkeit ist die Gesamtmineralisation (TDS), womit alle gelösten Feststoffe bezeichnet und in ppm oder g/L angegeben werden.

10.6.1.2 pH-Wert

Der pH-Wert gilt als Maßzahl für den sauren oder alkalischen Charakter wäßriger Lösungen (KÖLLE 2001).

Aufgrund der Dissoziation des Wassers nach der Reaktionsgleichung



liegen $[\text{H}^+]$ und $[\text{OH}^-]$ Ionen vor (VOLKE et al. 2002, HÖLTING 1996).

Aus dem Massenwirkungsgesetz läßt sich der pH-Wert als der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenaktivität ableiten:

$$\text{pH} = -\log \{\text{H}^+\} \quad \{11\}$$

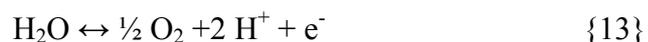
Ein Überschuß an $[\text{H}^+]$ -Ionen führt zur Erniedrigung des pH-Wertes ($\text{pH} < 7$); bei einem Ungleichgewicht zugunsten von $[\text{OH}^-]$ verschiebt sich das System in den basischen Bereich ($\text{pH} > 7$) und in chemisch reinem Wasser ist die Konzentration gleich ($\text{pH} = 7$). Mittels elektrometrischer oder kolorimetrischer Verfahren erfolgt die Bestimmung, wobei elektrometrische Bestimmungen auf elektrischen Potentialdifferenzen innerhalb der Lösung beruhen, welche mit einer Elektrode gemessen werden. Kolorimetrische Methoden dagegen basieren auf Farbumschlägen von Indikatorlösungen oder -papieren, beispielsweise Methylrot, Methylorange, Lackmus oder Phenolphthalein (VOLKE et al. 2002).

Auch der pH-Wert ist temperaturabhängig und die Messung wird auf 25 °C geeicht. Darüber hinaus bestehen Abhängigkeiten unter anderem zwischen dem pH-Wert, der Löslichkeit vieler Stoffe und dem Redoxpotential. (HÖLTING 1996)

10.6.1.3 Redoxpotential (E_{H} -Wert)

Bei den im Wasser häufig auftretenden Redoxreaktionen findet ein Elektronentransfer statt. Dabei wirkt der Elektronendonator als Reduktionsmittel, der Elektronenakzeptor als Oxidationsmittel.

Im Wasser gelöster Sauerstoff spielt bei diesen Reaktionen eine besondere Rolle als Oxidationsmittel:



Sauerstoffzehrende Prozesse führen zur Abnahme des Redoxpotentials.

Aus dem Redoxpotential lassen sich Schlußfolgerungen auf aerobe oder anaerobe Bedingungen in einem Wasser entnehmen. Bei Werten unter -200 mV herrschen anaerobe

Prozesse vor. Eine Übergangszone befindet sich zwischen -200 mV und 0 mV. Positive E_H -Werte deuten auf aerobe Verhältnisse hin.

Redoxpotential und pH-Wert sind ausschlaggebend für die Löslichkeit relevanter Ionen. So erfolgt die Reduktion von Nitrat, Mangan, Eisen und Sulfat in Abhängigkeit des E_H -Wertes (HÖLTING 1996). Die Bestimmung des Redoxpotentials erfolgt mit Hilfe einer Elektrode in der entsprechenden Lösung. Gemessen wird das Potential eines Redoxsystems [V] gegenüber einer Normal-Wasserstoffelektrode (VOLKE et al. 2002).

10.6.2 Ergebnisse

In den Jahren 2001 und 2002 wurden physikochemische Parameter an verschiedenen Lokalitäten in der Quelhöhle bestimmt. Als Meßgerät diente das Ultrameter 6P der Firma Myron L Company. Aus jeweils drei Messungen wurden die Mittelwerte berechnet und das gemessene Redoxpotential wurde auf eine Normalwasserstoffelektrode korrigiert.

Im Meßzeitraum 2002 erfolgte die Bestimmung der Daten an der Verrohrung unter Schacht 2, wobei vom 14.08.02 bis zum 24.08.02 keine Messungen durchgeführt werden konnten, da der Durchlauf in diesem Zeitraum verschlossen war. Erst am 28.08.02 wurde die Ursache erkannt und behoben. In der Tab. 4 sind die gemittelten Werte der Meßgrößen Leitfähigkeit (LF), Temperatur (T), Gesamtmineralisation (TDS), Redoxpotential (E_H) und pH-Wert dargestellt. Außerdem sind Ort und Zeitpunkt der Messungen angegeben. Im Kapitel 10.6.3 erfolgt die Interpretation der ermittelten Daten.

Tab. 6: Ergebnisse der Messungen der physikochemischen Parameter des austretenden Wasser unter Schacht 2 der Quelhöhle. LF: Leitfähigkeit, T: Temperatur, TDS: Gesamtmineralisation (Total Dissolved Solids), E_H: Redoxpotential.

| Datum | LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$] | T [$^{\circ}\text{C}$] | TDS [ppm] | EH [mV] | pH |
|------------|--------------------------------|--------------------------|-----------|---------|------|
| Schacht 1 | Becken E: | | | | |
| 06.07.01 | 1202 | 16,4 | 838 | 326 | 7,95 |
| 09.07.01 | 1220 | 16,5 | 847 | 355 | 7,89 |
| Schacht 2 | Metallrohr: | | | | |
| 06.07.02 | 1202 | 16,4 | 838 | 326 | 7,95 |
| 23.07.02 | 1182 | 17,6 | 816 | 342 | 7,35 |
| 31.07.02 | 1137 | 17,4 | 788 | 319 | 7,96 |
| 06.08.02 | 1115 | 17,7 | 769 | 367 | 7,70 |
| 09.08.02 | 1135 | 17,7 | 778 | 266 | 7,75 |
| 10.08.02 | 1125 | 17,7 | 776 | 301 | 7,65 |
| 27.08.02 | 1149 | 17,9 | 791 | 255 | 7,91 |
| Schacht 3: | | | | | |
| 06.07.01 | 1217 | 17,3 | 850 | 389 | 7,08 |
| 09.07.01 | 1197 | 17,5 | 824 | 344 | 7,78 |
| Schacht 4 | Zisterne: | | | | |
| 09.07.01 | 1116 | 18,5 | 771 | 353 | 7,80 |
| 23.07.02 | 1097 | 17,1 | 757 | 393 | 6,90 |

10.6.3 Interpretation der Ergebnisse

Wie das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, sind die ermittelten physikochemischen Parameter des Wassers an allen Meßpunkten recht ähnlich. An allen Lokalisationen konnten Leitfähigkeiten zwischen 1100 und 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ festgestellt werden. Dieser Wert liegt unterhalb des Grenzwertes der EG-Trinkwasserrichtlinie (03.11.1998) von 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Umfassende Rückschlüsse über die chemische Zusammensetzung des Wassers lassen sich allein aus der Leitfähigkeit nicht entnehmen. Eventuell liegt eine Beeinflussung dieser Größe durch den Düngemiteleintrag aus der Landwirtschaft vor, da sich der Grundwasserleiter, aus dem das Wasser in der Höhle stammt, relativ oberflächennah befindet. Auch die gemessenen Temperaturen sind verhältnismäßig ähnlich und streuen zwischen 16,5 und 17,5 $^{\circ}\text{C}$. Entgegen den Meßergebnissen von 2002 stellt sich die Temperatur im Becken E in der Meßreihe 2001 geringer dar als in der Zisterne. In diesem

Jahr war der Schacht 4 noch nicht ausgegraben worden, die Messung erfolgte im stehenden Wasser im Gang I b und ist daher nicht mit den 2002 gemessenen Temperaturen vergleichbar. Auf die Temperaturen des Wassers in der Quelhöhle wird in Kapitel 10.4 gesondert eingegangen.

Die Redoxpotentiale befinden sich bei ungefähr 350 mV und verweisen auf aerobe Bedingungen im Wasser. Weiterhin liegen die pH-Werte im neutralen Bereich zwischen 6,9 und 7,9. Sie sind daher im Bereich des CaCO_3 gut gepuffert.

Weiterführende chemische Untersuchungen des Wassers im Nationalpark Troia und in der Quelhöhle wurden von Weber (2003) durchgeführt und sind in der entsprechenden Diplomarbeit nachzulesen.

Als Ergebnis der Untersuchungen stellt sich aufgrund der Ähnlichkeiten der Parameter in den verschiedenen Meßpunkten heraus, daß das Wasser den gleichen Ursprung hat. Für alle Wasserspeicher in der Höhle, in denen die Parameter bestimmt wurden, kann ein gemeinsamer Grundwasserleiter bestimmt werden, aus dem das Wasser in das Höhlensystem eintritt. In der Zisterne unter Schacht 4 sammelt sich das Wasser, ebenso wird es in den Gängen I a und I b angestaut. Durch eine Metallverrohrung in der Barriere vor dem Gang I b gelangt das Wasser in einen Kanal und wird darin bis zum Becken E geleitet. Bei höheren Wasserständen bildet das Wasser der Zisterne mit dem in den Gängen eine Einheit, nur bei Niedrigwasser, wie während der Grabungsperiode 2002, sind die Wasserkörper einzeln zu betrachten.

Für das Wasser im Brunnen unter Schacht 2 liegen keine Meßwerte der physikochemischen Parameter vor. Weiterführende Untersuchungen in diesem Bereich der Höhle wären sinnvoll, um die Unterschiede oder Gemeinsamkeiten verdeutlichen zu können. Außerdem wäre durch die Messergebnisse genauer zu bestimmen, ob es sich tatsächlich um einen zweiten Grundwasserleiter im Untergrund handelt und welche Eigenschaften das darin transportierte Wasser aufweist.

11 QANATSYSTEME

11.1 Allgemeines

Der Ursprung der Qanatsysteme liegt in Persien. Dort ergab sich durch das Bevölkerungswachstum und der daraus resultierenden Intensivierung der Landwirtschaft schon vor 2500 Jahren ein erhöhter Wasserbedarf. An der Grenze des nördlichen Irans mit der östlichen Türkei wurden zu dieser Zeit erstmals Kanalsysteme errichtet, die als Qanate bezeichnet werden und den unterirdischen Transport von Wasser aus Aquiferen im Gebirge in trockene Täler und Ebenen arider Klimate ermöglichen. Andere Namen lauten *foggara*, *qarez*, *khittara* oder *gálerias* (ENGLISH). BISWAS (1970) beschreibt deren Ursprung in Ulhu/Armenien. Die Technik wurde u.a. von Eroberern und Händlern über die ganze Welt verbreitet, so daß sich Qanate heute in Mesopotamien, im Mittelmeerraum, in Ägypten, Arabien, Afghanistan, Zentral-Asien und China befinden. Von Nord-Afrika gelangten sie nach Spanien, Zypern sowie auf die Kanaren und später auch nach Mexico, Peru und Chile (ENGLISH). Im Iran existieren ca. 105.000 km der unterirdischen Bauwerke, teilweise werden sie noch heute genutzt. 75 % des Wasserbedarfs im Iran werden durch diese Methode gedeckt (WULFF 1968).

11.2 Aufbau

Ein Qanat, schematisch in Abb. 40 dargestellt, bezeichnet einen flach einfallenden unterirdischen Tunnel, der in wasserführendem Sedimentgestein gegraben wird. In Abständen von 50 — 100 m werden Schächte abgeteuft, die den Kanal mit der Oberfläche verbinden (ENGLISH, SMITH 1954).

Beträchtliche Schwankungen der Längen treten auf; je nach morphologischen und geologischen Kennzeichen des Gebietes können sie zwischen weniger als 5 km bis hin zu 100 km lang sein (CROUCH 1993).

Mit einer Ausdehnung von durchschnittlich 1 m Breite und 1,5 m Höhe bietet der Kanal Platz für einen Arbeiter (ENGLISH). Seine Neigung muß gering genug sein, damit eine schnelle Erosion der Kanalwände durch das fließende Wasser vermieden wird, jedoch nicht so flach, daß das Wasser stillsteht (GANS 2000). Bei kurzen Qanaten beträgt die Neigung etwa 1:1000 bis 1:1500, die Tunnel langer Qanate verlaufen fast horizontal (ENGLISH). Zusätzlich wird die Erosion durch gebrannte Tonplatten vermindert, welche an den Wänden verlegt werden (ENGLISH).

Mit einem Durchmesser von wenigen Metern werden die Schächte in Abständen von 50 — 100 m gegraben. Ihre Tiefe variiert abhängig von ihrer Lage am Hang zwischen 10 und 100 m. Neben der Belüftung des Systems dienen sie zur Entfernung des ausgegrabenen Materials aus dem Tunnel und zur Durchführung nachträglicher Reparaturen (SMITH 1954). Am oberen Ende des Schachts wird das ausgehobene Material kreisförmig aufgeschüttet (ENGLISH, GANS 2000). Diese Ringe erzeugen das typische Bild der Qanatsysteme an der Oberfläche: lange Ketten, die sich im Gelände erstrecken und auf die Nähe von Siedlungen hindeuten (SMITH 1954). Die Hügel verhindern den Eintrag von Regenwasser in den Qanat und die Erosion des Schachts.

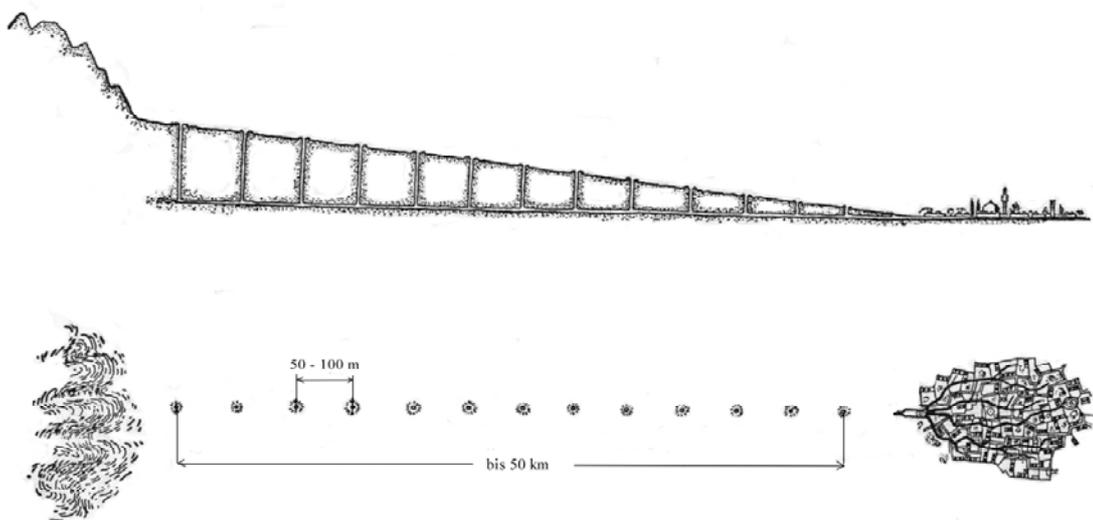


Abb. 40: Schematische Darstellung eines Qanates (nicht maßstabsgerecht). Oben Profilschnitt, unten Karte (nach SMITH 1954).

11.3 Konstruktion

Für den aufwendigen Bau eines Qanat-Systems sind sogenannte *muqannis* verantwortlich; professionelle Qanat-Erbauer, die aufgrund der Bedeutung und den Gefahren ihrer Arbeit gesellschaftlich hoch angesehen sind (ENGLISH, SMITH 1954). Ihr gesellschaftlicher Stand entspricht damit dem der Bergleute bis zum Niedergang des Mitteleuropäischen Bergbaus im 20. — 21. Jahrhundert. Sie bestimmen nach Kriterien wie Topographie, Morphologie, Vegetation und den Grundwasserverhältnissen den möglichen Ort für einen neuen Qanat. Meistens werden sie in alluvial fans, Intramontan-Becken und alluvialen Tälern errichtet (ENGLISH). Anhand von Probebohrungen wird die Eignung des Geländes getestet (ENGLISH). Sammelt sich über Nacht das Wasser zwei Meter hoch in einem Brunnen, ist der Grundwasserleiter zur Versorgung des Qanats geeignet (SMITH 1954) und wird als *madari chah* (Mutterbrunnen) bezeichnet.

Nach der Ermittlung des Austrittsorts des Kanals wird von dort aus in Richtung Mutterbrunnen gegraben, so daß das Wasser im Kanal abfließen kann. Parallel dazu werden die Schächte abgeteuft. Material aus dem Kanal wird mittels Kübel und Winde durch den Schacht nach oben transportiert und zu den oben genannten Hügeln aufgeschüttet (ENGLISH, SMITH 1954). Erreicht der Kanal den Mutterbrunnen, ist der Qanat fertiggestellt und die Siedlung kann mit Wasser versorgt werden.

11.4 Kosten und Aufwand

Zeit- und Kostenaufwand für den Bau eines Qanates sind abhängig von den Boden- und Wasserbedingungen, der Länge des Qanats und den benötigten Wassermengen, den Kenntnissen des *muqanni* und anderen sozialen und ökonomischen Faktoren.

In Kirman/Persien dauerte die Konstruktion eines 1 km langen und 45 m tiefen Qanats beispielsweise 27 Jahre, während der Bau einer 3 km langen und 50 — 55 m tiefen Anlage unter ähnlichen Bedingungen nur 17 Jahre in Anspruch nahm. In den Sechzigerjahren des 20. Jahrhunderts kostete der Bau eines Qanatsystems ca. 10000 \$ pro km (ENGLISH).

11.5 Vorteile/Nachteile

Ein Qanat garantiert einen konstanten Wasserfluß aus dem Untergrund an die Oberfläche (SMITH 1954) und ermöglicht damit die Nutzung von vorher nicht erreichbarem Grundwasser in ariden Gebieten. Verdunstung und Verschmutzungen des Wassers werden durch unterirdische Leitungen weitgehend vermieden, indem der Verlauf des Kanals genau geplant und von der Siedlung aus gegraben wird (ENGLISH). Traditionell erfolgte der Bau von lokalen Arbeitskräften und lokalen Materialien. Das Prinzip beruht allein auf der Gravitationskraft, es sind keine weiteren Antriebsmechanismen notwendig. Durch einfache Maßnahmen konnte die Verwendung des gewonnenen Wassers optimiert werden, weiterhin war die Speicherung von ungenutztem Wasser im Winter durch eine wasserfeste Versiegelung vor dem Ausgang möglich. Ebenso dienten Wasserbecken vor dem Ausgang zur Speicherung des nächtlichen Ausflusses. Darüber hinaus trägt überlaufendes bzw. nicht genutztes Wasser zur Grundwasserneubildung bei.

Nachteile von Qanatsystemen sind vor allem der hohe Konstruktionsaufwand sowie die hohen Kosten der Anlage. Außerdem treten saisonale Schwankungen des Wasserflusses in Abhängigkeit vom Grundwasserspiegel und der Grundwasserneubildung auf. Moderne Pumpen dagegen sind weitgehend unabhängig von Hangneigungen und morphologischen Eigenschaften. Sie können auch in tiefere Schichten der Aquifere eingebaut werden, um die Schwankungen des Wasserflusses zu umgehen. Trotz hoher Treibstoffpreise für motorbetriebene Pumpen wird diese Methode heute bevorzugt angewendet (ENGLISH).

11.6 Die Quelhöhle als Qanatsystem?

In Abb. 12 ist der Grundriß der Höhle dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß nur der Abschnitt zwischen Schacht 2 und Schacht 4 Ähnlichkeiten mit den beschriebenen Qanatsystemen aufweist. Zum gegenwärtigen Stand der Ausgrabungen ist die Höhle nur bis Schacht 4 erschlossen, eventuell schließt sich dort in südöstlicher Richtung ein weiterer Gang an, der mehr Hinweise über die Nutzung der Höhle geben könnte. Ein relativ gerader Kanal ist durch die Schächte 2, 3 und 4 mit der Erdoberfläche verbunden. Ebenso weist der Gang ein geringes Gefälle auf, anders als bei Qanatsystemen fällt der Kanalboden jedoch in zwei entgegengesetzte Richtungen ein, da das Bodenniveau unter Schacht 3 höher liegt als an den Schächten 2 und 4. Ein kontinuierlicher Wasserfluß ist somit nicht gewährleistet, nur bei erhöhtem Wasserstand kann die vorhandene Schwelle überwunden werden. Außerdem sieht das Funktionsprinzip eines Qanates keine Vertiefungen innerhalb des Kanals vor, das Wasser soll darin abfließen und nicht gestaut werden. Erst am Ausgang eines Qanates können sich Becken zur Speicherung befinden. Im Verlauf des Kanals würden Speicherbecken aufgrund der Oberflächenvergrößerung die Erosion begünstigen und die Becken wären nach einer gewissen Zeit mit dem erodierten Sediment verfüllt. Unter den Schächten 2 und 4 der Quelhöhle sind Vertiefungen ausgehoben worden, die höchstwahrscheinlich zum Speichern von Wasser dienten.

Zwischen Schacht 2 und Schacht 3 zeigen Schrämmpuren, daß der Gangabschnitt im Gegenortbetrieb aufgefahren wurde. Auch diese Bauweise ist für Qanate eher unüblich, da aus den vorliegenden Veröffentlichungen die Vortriebsrichtung vom Austrittsort zum Mutterbrunnen hin hervorgeht. Außerdem würde sich in Richtung Schacht 2 abfließendes Wasser in dem blinden Gang ansammeln, welcher bei der Konstruktion der Gänge im Gegenortbetrieb entstand, und durch die erosive Tätigkeit des Wassers wäre die verbleibende Wand zwischen den Gangabschnitten abtransportiert worden.

Aus der Geometrie der Höhle im Bereich des Hauptganges und dem Abzweig zu Gang I können keine Hinweise auf eine Qanat-Bauweise erkannt werden. Kurven und Abzweige sind in einem Qanat eher hinderlich, da das fließende Wasser viel Material erodieren und dadurch die Stabilität des Bauwerkes gefährden würde. Auch in den Gängen II und III deutet nichts auf ein Qanat-System hin, Gang III stellt sich aufgrund seiner rechtwinkligen Verzweigungen für den Wassertransport als untauglich dar. Aufgrund seiner geschwungenen Form wird auch Gang I nicht als geeigneter Kanal angesehen.

Zum Bau eines Qanat-Systems ist die Anlage von Schächten in regelmäßigen Anlagen unerlässlich, um das ausgehobene Material aus dem Kanal zu entfernen. Dadurch entstehende ringförmige Abraumhalden, kettenförmig aufgereiht, kennzeichnen Qanatsysteme an der Erdoberfläche. Im Umfeld der Höhle sind keine weiteren Schächte erkennbar, durch die starke landwirtschaftliche Nutzung können eventuell vorhandene Schächte anthropogen aufgearbeitet und zum Einsturz gebracht werden. Laut Aussagen der ortsansässigen Bevölkerung existieren unterirdischen Tunnelsysteme zwischen Troia und Çıplak. Es konnte nicht nachgeprüft werden, inwieweit dieser Hinweis der Wahrheit entspricht.

Über der Quelhöhle befindet sich die Unterstadt Troias, welche im 2. Jahrtausend v.u.Z errichtet wurde und in der 10000 bis 40000 Menschen lebten und direkt über dem Höhleneingang und bei Schacht 3 wurden byzantinische Gräber gefunden. Über der Quelhöhle befinden sich wenige Meter mächtige karbonatische Schichten, die nur bedingt den Eintrag anthropogener Schadstoffe verhindern können. Eine Verschmutzung des Wassers in der Höhle in griechischer, römischer und byzantinischer Zeit war daher unvermeidlich, es kann daher zumindest in dieser Zeit vermutlich nicht als Trinkwasser verwendet worden sein.

Beim Bau eines Qanates konnte der Austrittsort des Wassers genau bestimmt werden. Meist lag er etwas oberhalb der Siedlung, so daß das Wasser direkt dorthin geleitet werden konnte, wo es benötigt wurde. Im Falle der Quelhöhle endet der Tunnel unterhalb der Stadt, aufwendiger Transport des Wasser in die Siedlung wäre notwendig gewesen. Anhand dem Einfallen der neogenen Schichten und der daraus resultierenden Fließrichtung des Wassers sowie der Morphologie des Hissarlık wäre es möglich gewesen, den Austrittsort günstiger zu wählen, wenn das Wasser in der Siedlung benötigt worden wäre.

Generell ist die Anlage eines Qanates in der Troas nicht sinnvoll, da Wasser in ausreichendem Maß zur Verfügung stand. Vor 5000 Jahren, zur Zeit der ersten Siedler, lag die Küstenlinie noch näher am Hissarlık und nur wenige Kilometer bestanden zwischen der Stätte und dem Meer, außerdem war das Wasser der Flüsse Karamenderes und Dümrek sowie der Quellen von Pınarbaşı und Düden direkt erreichbar. Da der Bau eines Qanatsystems geld- und arbeitsintensiv ist, wurden derartige Bewässerungsanlagen nur in Wüsten und Halbwüsten errichtet, in denen das Überleben von Menschen nicht gesichert war. Auf das Areal um Troia trifft diese Notwendigkeit nicht zu, der Bau der Quelhöhle als Qanatsystem wird nicht in Betracht gezogen.

12 HISTORISCH-ARCHÄOLOGISCHE BEDEUTUNG

Wahrscheinlich variiert die Nutzung der Quelhöhle mit der Zeit, auch die Konstruktion fand in mehreren Phasen statt. Im 3. Jahrtausend v.u.Z., d.h. in der maritimen Troia-Phase, wurde der Höhlenhauptgang sowie erste Teile der Gänge I und I a als dessen Fortsetzung in das Sedimentgestein gegraben. Mit Hilfe von Sinterdatierungen (Kapitel 8.4) ist das Alter ermittelt worden. Beim Bau wurden ursprünglich vorhandene Klüfte zur Arbeitserleichterung genutzt, da das umgebende Gestein aufgrund von Verwitterungserscheinungen eine geringere Festigkeit aufwies. Diese ENE—WSW-streichenden Klüfte sind im Eingangsbereich sowie unter Schacht 2 und 3, ebenso beim Abzweig der Seitenarme im südöstlichen Bereich des Ganges III zu erkennen. Anhand des Verlaufs der Klüfte ist die Erstreckung des Ganges I in die entsprechende Richtung zu erklären. Zu diesem Zeitpunkt ist wahrscheinlich die Wasserleitung errichtet worden, welche aus einer Rinne im Gestein mit einer Abdeckung aus zyklischen Steinen besteht. Schliemann (1884) beschreibt sie im Hauptgang sowie dessen östlicher Verlängerung, in den östlichen Bereichen des Gangs I a befindet sich ebenfalls ein Kanal. Die Anlage einer flachen, abgedeckten Wasserleitung läßt keineswegs auf die Absicht schließen, daß in dem Höhlensystem Wasser gespeichert werden sollte. Es verweist eher auf die Annahme, daß sich die Menschen zu jener Zeit relativ häufig in der Höhle bewegten und die Rinne mit Steinen abdeckten, um einen leicht begehbaren Fußweg zu schaffen. In jedem Fall ist von einem geringen Wasserfluß auszugehen, da das Wasser über die schmale und flache Leitung abtransportiert werden konnte. Der Zweck der Wassergewinnung ist in diesem Zeitabschnitt eher unwahrscheinlich.

Ebenfalls in der maritimen Phase wurden die Gänge II und III aufgefahren. Sinterdatierungen belegen, daß der Gang III ein Mindestalter von 4590 Jahren aufweist, aufgrund der ähnlichen Ausbildung des Ganges II wird ein entsprechendes Alter angenommen. Ob diese Gänge zeitgleich mit dem vorderen Teil der Höhle oder in der Folgezeit ausgebaut wurden, ist unbekannt. Gang II endet nach nur 7 m im Gestein, da lokal Verhärtungen der Sandsteinschicht auftreten. Anhand der Schrämspuren sind die Versuche sichtbar, den Gang weiter vorzutreiben, sie enden in der verhärteten Sandsteinschicht und sind bedeutend kürzer als die entsprechenden Meißelspuren in weicherem Material im selben Gang.

In der ersten Bauperiode wurde auch Schacht 4 gegraben und zu einem Brunnen ausgebaut; mit dem gewonnenen Wasser sollten die Bewohner im Falle einer Besiedlung unabhängig vom Wasser der Flüsse sein (Korfmann mündlich 26.07.02). Der Brunnen erhält aufgrund der bisher nachgewiesenen Teufe Wasser aus beiden Grundwasserleitern und ist daher zur Wassergewinnung geeignet. Ob der Brunnen allein den Bedarf der Bewohner decken konnte, ist fraglich.

Nicht geklärt ist außerdem, wann der Ausbau des Gangabschnittes I b und des damit verbundenen Schachts 3 sowie des Schachts 2 mit dem darunter liegenden Brunnen erfolgte. Aufgrund morphologischer Merkmale vermuten Wolkersdorfer & Pernicka den Zeitpunkt des Ausbaus während Troia VIII und IX. Ein 0,56 — 0,65 m breiter Kanal befindet sich im Höhlenboden unter Schacht 3, welcher wiederum belegt, daß das Wasser aus der Höhle abgeleitet wurde.

Anhand der Schrämmpuren im Gang I b ist die Richtung der Auffahrung ableitbar. Unabhängig vom Höhlensystem erfolgte der Aushub von Schacht 3, von dem aus ein Gang nach Nordwesten errichtet wurde. In gegensätzlicher Richtung wurde von Schacht 2 aus ein zweiter Gang gegraben, dabei unterscheiden sich die Richtungen um einen kleinen Winkel. Sie treffen etwa 3 m westlich des Schachts 3 aufeinander. In Abb. 12 ist erkennbar, daß der aus Südwesten aufgefahrene Gang den aus nordwestlicher Richtung um ca. 1,5 m überragt, er wurde demnach als erstes ausgebaut. Zur Konstruktion eines Höhlensystems im Gegenortbetrieb sind umfassende technische Kenntnisse nötig, da die Gänge auf dem selben Höhenniveau aufgefahren werden müssen. Durch den flachen Winkel zueinander, den die Gangabschnitte zwischen Schacht 2 und 3 aufweisen, wird sichergestellt, daß die Stollen auch bei geringen Abweichungen von der Schichtung aufeinander treffen. Mit Hilfe dieser Technik gelingt der Bau eines Stollens in kürzerer Zeit als beim Vortrieb in nur eine Richtung.

Auch aus anderen Höhlensystemen ist der Vortrieb im Gegenortbetrieb bekannt, beispielsweise wurde diese Bauweise zu untertägigen Förderung von sulfidischen Erzen in Rio Tinto angewandt. In diesem System kreuzen sich die leicht gewundenen Stollen teilweise und sind durch eine Vielzahl von Schächten mit der Erdoberfläche verbunden (Salkield 1987). Im Freiburger Grubenrevier erfolgte der Vortrieb teilweise bis in jüngere Zeit auf diese Weise, z.B. wurde der Rothschnberger Stolln zwischen Rothschnberg und Halsbrücke erst 1844 im Gegenortbetrieb aufgefahren; Ziel war dort der Abbau der Gangerzlagertstätten.

Vom Schacht 3 aus erfolgte der Bau eines 72 m langen Gangabschnittes nach Südwesten, mit dem die Verbindung des Schachts 4 zum Höhlensystem hergestellt wurde. Dieser Stollen wurde im Gegensatz zu dem oben beschriebenen geradlinig in eine Richtung gegraben, obwohl die Distanz zwischen den Schächten 3 und 4 wesentlich größer ist als zwischen 2 und 3, die Wahrscheinlichkeit am Ziel vorbei zu graben ist daher größer. Von Schacht 4 aus wurde die Vorkammer gegraben, in welche der Gang I b mündet. Schacht 4 existierte zu diesem Zeitpunkt bereits als Brunnen, ein leichtes Abknicken des Ganges in östliche Richtung kurz vor Erreichen des Schachts 4 belegt das höhere Alter. Es ist verwunderlich, daß die einzelnen Abschnitte des Ganges I b mit unterschiedlichen Methoden aufgeföhren wurden.

Erst in der römischen Epoche wurde die Höhle zu einem Wasserspeicher ausgebaut. Die Gänge I a und I b wurden mit Barrieren abgetrennt, um das Ausfließen des Wassers zu verhindern. Ursachen dafür können verminderte Schüttungsmengen gewesen sein, so daß versucht wurde, das wenige Wasser am Ausfließen zu hindern. Denkbar ist auch die direkte Nutzung des Wassers durch die Schächte 3 und 4 direkt aus der Unterstadt heraus, mittels Winde und Eimer wäre der direkte Transport des Wassers an die Oberfläche möglich, wenn es im Gang aufgestaut ist. Allerdings sind in den Gängen aufgrund der niedrigen Barrieren nur geringe Wasserstände zu erwarten. In diesem Zusammenhang der Erhöhung der Gangsohle unter Schacht 3 eine Bedeutung zu, da aufgrund des Gefälles in Richtung Schacht 4 vor allem dort das Wasser akkumuliert wird.

Über der unbefestigten Wasserrinne wurde eine Leitung aus Ton verlegt, welche bis zu den Becken vor dem Höhleneingang führte (Schliemann 1884). Auch diese Becken werden in das 1. Jahrhundert datiert, also in die römische Zeit, und bis ins zweite Jahrhundert genutzt. Ein älteres, früh römisches Becken mit einem Fußboden aus Steinen und Ziegelplatten wird von Korfmann (1999) beschrieben. Es existieren verschiedene Vorstellungen zur Nutzung der Becken; Schliemann sieht sie als die in der Ilias beschriebenen Waschmulden, in denen die Frauen der Troianer ihre Wäsche wuschen. Dagegen werden sie in den Veröffentlichungen des Grabungsteams von Korfmann als Becken zur Fischzucht interpretiert (ROSE 1999). Ebenfalls in diese Zeit fällt die Anlegung des Aquäduktsystems, welches Wasser des Kemerdere nach Troia beförderte (Kapitel 8.5). Aus verschiedenen Grabungen ist die verschwenderische Lebensführung der Römer bekannt, vor allem im Hinblick auf den Wasserverbrauch. Öffentliche Einrichtungen wie Therme, Bäder und Toiletten mit Wasserpülung ließen den Verbrauch stark ansteigen; in Rom wurden pro Tag

und Einwohner etwa 1000 L Wasser benötigt, was dem Siebenfachen des heutigen Verbrauchs in Deutschland entspricht (DUNGER 1994). Zusätzlich zu dem Wasser der Flüsse Dümrek und Karamenderes und der Quellen Pınarbaşı und Düden wurde die Wassergewinnung in der Quelhöhle angestrebt, um den Bedarf zu decken, wobei der Anteil des Wassers der Quelhöhle nur gering war. Ebenso datiert der Bau des Aquäduktsystems, welches Wasser des Flusses Kemerdere nach Troia leitete, in diese Zeit und verweist auf den hohen Wasserbedarf.

Noch in der byzantinischen Zeit (etwa 5. Jahrhundert unserer Zeit) wurde das Höhlensystem stark genutzt, grundlegende Veränderungen am Erscheinungsbild der Quelhöhle wurden jedoch nicht mehr durchgeführt. Der Wasserfluß wurde durch die Verfüllung der Schächte mit Detritus allmählich behindert, Gräber über dem Eingangsbereich der Höhle, der byzantinische Friedhof über Schacht 3 und vor allem die starke Besiedlung der Unterstadt mit 10000 — 40000 Einwohnern deuten ebenfalls darauf hin, daß das Wasser nicht mehr genutzt wurde.

13 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wie aus den Ergebnissen der Analysen ersichtlich ist, wurde die Quelhöhle in eine Abfolge feinkörniger Sedimentgesteine gegraben und das Wasser gelangt durch eine darüber liegende ooidische Sandsteinschicht in die Höhle.

Sowohl aus den hydrogeologischen Messungen als auch aus den Untersuchungen der sedimentären Einheiten geht nicht hervor, daß im Laufe der Zeit gravierende Veränderungen des Wasserflusses in der Quelhöhle stattfanden. Ein erhöhter Wassereintrag aus dem Nebengestein ist aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit nicht möglich, da der Durchlässigkeitsbeiwert des Sandsteins, der das in der Höhle fließende Wasser liefert, nur 10^{-5} m/s beträgt. Größere Klimaschwankungen können für den Mittelmeerraum seit der Bronzezeit nicht nachgewiesen werden (CROUCH 1993), wahrscheinlich war das Niederschlags- und Temperaturregime dem heutigen ähnlich und vergleichbare Wassermengen traten aus der Höhle aus. Auch die archäologischen Befunde deuten nicht darauf hin, daß es zur Zeit der Besiedlung des Hissarlık wesentlich größere Wassermengen in der Quelhöhle gab. Als Hinweis auf eine andere Nutzung kann z.B. der mit Steinen abgedeckte Kanal im Gang I angesehen werden, der offensichtlich aus der frühesten Höhlenphase stammt und errichtet wurde, um trockenen Fußes die Höhle betreten zu können.

Die Nutzung der Höhle zur Wassergewinnung ist ab der römischen und byzantinischen Zeit zu vermuten, allerdings ist das gewonnene Wasser nur zusätzlich zu dem ohnehin vorhandenen der Flüsse Karamenderes und Dümrek, der Quellen Pınarbaşı und Düden sowie dem über das Aquäduktsystem transportierte Wasser des Kemerdere verwendet worden. Als Grund dafür kann der steigende Wasserverbrauch der römischen Bevölkerung angenommen werden, allerdings ist die Nutzung als Trinkwasser aufgrund der Besiedlung der Unterstadt direkt oberhalb der Höhle und der damit verbundenen Beeinträchtigung der Wasserqualität unwahrscheinlich.

Zur Versorgung der Bevölkerung war das Wasser der Quelhöhle allein zu keinem Zeitpunkt ausreichend, andere Bezugsquellen zur Deckung des Wasserbedarfs waren jedoch vorhanden. Deshalb kann ein direkter Einfluß der Wassermengen, welche die Quelhöhle lieferte, sowohl auf den Hiatus zwischen Troia VII und Troia VIII als auch auf den Niedergang der Besiedlung nach Troia IX (WOLKERSDORFER & PERNICKA 2001) ausgeschlossen werden.

Höhlensysteme mit horizontalen Stollen und vertikalen Schächten lassen sich auch in auch in anderen Bereichen des Mittelmeerraumes finden. So weist z.B. das Silberbergwerk Laureion im griechischen Attika Ähnlichkeiten zur Quelhöhle auf. Dort wurden bis zur römischen Zeit Stollen und Schächte entlang des Streichens der Erzgänge gegraben und das geförderte Material aufbereitet, wobei vor allem Sklaven zur unter- und übertägigen Arbeit eingesetzt wurden.

Mit Maßen von 1,30 m mal 1,90 m Breite ähneln die laurischen Schächte denen der troianischen Quelhöhle, auch die Größe der Stollen zeigt Übereinstimmungen. Beim Auffahren der 0,6 m breiten und 0,9 m hohen Gänge im „harten Laureionkalk“ wurden etwa zehn Stunden für 0,10 bis 0,12 m benötigt. Es wird angenommen, daß dieser Vortrieb von einem Arbeiter pro Schicht bewältigt wurde, wobei vor allem Hammer, Schlegel, Hacke, Schrämmhammer u.a. zum Einsatz kamen (LAUFFER 1979). Unter vergleichbaren Umständen und Arbeitsbedingungen hätte der Ausbau der insgesamt etwa 170 m langen Gänge der Quelhöhle etwa 19 Jahre gedauert, wäre sie ohne Unterbrechungen und von einer Person gegraben worden. Analoge Bearbeitungsmethoden sind wahrscheinlich, da in beiden Gruben Abbauspuren der Meißelwerkzeuge gefunden wurden, allerdings ist das Gestein, aus welchem der Troia-Rücken besteht, weicher als die harten Kalke und Granitstöcke in Laureion. Daher ist die in Troia aufgewendete Zeit vermutlich geringer. Aus den verschiedenen Formen der Gänge ist ersichtlich, daß der Ausbau in verschiedenen Epochen erfolgte, jedoch zeigen ähnliche Schrämspuren in Bereichen unterschiedlichen Alters, daß zur Auffahrung vergleichbare Werkzeugen benutzt wurden.

Unterschiede zwischen den beiden Höhlensystemen bestehen vor allem in der Größe der Anlagen: während in der Quelhöhle bisher vier Schächte auf relativ kleinem Raum freigelegt wurden, umfaßt das laurische Bergwerk etwa 2000 ha mit ungefähr 2000 Schächten und Stollen. Weiterhin ist für Laureion bekannt, daß das Höhlensystem zum Zwecke des Silbererzabbaus angelegt wurde (LAUFFER 1979). In der Umgebung von Troia sind keine Vorkommen von Bodenschätzen bekannt, eine derartige Absicht beim Bau der Quelhöhle kann daher ausgeschlossen werden.

Aus hydrogeologischer Sicht können nur Hinweise zur einer möglichen Funktion der Quelhöhle gegeben werden; diese wird nicht vorrangig mit der Wasserversorgung in Verbindung gebracht. Um die Wasserführung in der Höhle genauer charakterisieren zu können, sind weitere Messungen der Schüttungsmengen und der physikochemischen Parameter sinnvoll. Meßreihen über einen längeren Zeitraum lassen eher Rückschlüsse auf die Entwicklung des Fließverhaltens und der Eigenschaften des Wassers zu. Außerdem sollte das Wasser im Brunnen unter Schacht 2 und in der Zisterne genauer untersucht werden, um den Einfluß des zweiten Grundwasserleiters auf den Zufluß in diesen Speichern zu bestätigen. Aus archäologischer Sicht sind weitere Interpretationen der sowohl im Rahmen dieser Diplomarbeit als auch der während der Grabungen ermittelten Daten notwendig, um die Bedeutung der Höhle endgültig zu klären.

14 VERZEICHNISSE

14.1 Literatur

ADAMS, A. E./MACKENZIE, W. S./GUILFORD, C. (1986): Atlas der Sedimentgesteine in Dünnschliffen. Enke, Stuttgart.

ANONYM (2001): www.ejpayne.com/Lumosed.htm. letzter Zugriff: 17.07.2003.

ANONYM (2003): www.maschreq.de/content/laenderlexikon/tuerkei/karte.shtml. letzter Zugriff: 17.07.2003.

AYLWARD, W./BIEG, G./ASLAN, R. (2002): The Aqueduct of Roman Ilion and the Bridge across the Kemerdere Valley in the Troad. Sonderdruck aus Studia Troica Band 12, Von Zabern, Mainz.

BASSIOUNI, M. (1979): Brackische und marine Ostrakoden (Cytherideinae, Hemicytherinae, Trachyleberidinae) aus dem Oligozän und Neogen der Türkei. In: Geologisches Jahrbuch, Reihe B, Bd. 31, Schweizerbart, Stuttgart, Hannover.

BERGMANN, K. (2003): Geologische Verhältnisse der Neogenen Sedimente zwischen Troia und Gökçalı/Türkei. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.

BISWAS, A. K. (1970): History of Hydrology. North-Holland, Amsterdam, 1970.

BLUME, C. (2003): Hydrogeologisches Modell der östlichen Troas/Türkei. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.

BRANDAU, B. (1997): Troia: Eine Stadt und ihr Mythos, Die neuesten Entdeckungen. Orbis, München.

BRINKMANN, R. (1976): Geology of Turkey. Enke, Stuttgart, 1. Auflage.

CROUCH, D.(1993): Water Management in Ancient Greek Cities. Oxford University Press.

DUNGER, V. (1994): Einführung in die Hydrogeologie. Vorlesungsskript. TU Bergakademie Freiberg.

EGENHOFF, S. (2001/2002): Einführung in die Sedimentologie von Karbonaten, Evaporiten und Phosphaten. TU Bergakademie Freiberg.

ELMAS, A./YIĞITBAŞ E. (2001): Ophiolite emplacement by strike-slip tectonics in the Pontide Zone and the Sakarya Zone in northwestern Anatolia, Turkey. In: Earth Sciences (Geol. Rundschau), Springer, Heidelberg, S. 257 — 269.

ENGLISH, P. W.: Qanats and Lifeworlds in Iranian Plateau Villages. In: Yale F&ES Bulletin 103, S. 187 — 205.

GANS, J. (2000): Der Qanat, eine findige Bewässerungsanlage. Torba 2/00, S.19.

GORDON, E. I. (1967): The meaning of the ideagram KASKAL.KUR = „underground water course“ and its significance for bronze age historical geography. In: Journal of cuneiform studies Bd. 21, S. 70 — 88.

HARTMANN, C. (2001): ITRF-basierter Aufbau und Integration präziser archäologischer und geowissenschaftlicher Grundlagennetze - Konzipierung, Realisierung und Dokumentation der dazugehörigen geodätischen Leistungen (GPS-Auswertung mittels Berner GPS-Software 4.2, Handbucherstellung, Qualitätskontrolle, Netzausgleichung und Transformationen) am Beispiel der aktiv begleiteten Projekte Troia und Georgien des Ing.-Büro E. Messmer. Unveröffentlichte Diplomarbeit Fachhochschule Karlsruhe.

HANSEN, O. (1998): A note on an overlooked Heraklea and the DINGIR.KASKAL.KUR “underground water course”. In: Orientalia Suecana, XLVII.

HEIM, D. (1990): Tone und Tonminerale. Enke, Stuttgart.

HOARE, R. (2002): www.worldclimate.com/cgi-bin/grid.pl?gr=N40E026 © Copyright 1996 — 2002 Buttle and Tuttle Ltd, letzter Zugriff: 18.07.2003.

HÖHFELD, V. (2001): Die Landschaft Homers heute, Naturraum und Landschaftsressourcen in einer Abwanderungsregion. In: Troia Traum und Wirklichkeit. Archäologisches Landesamt Baden-Württemberg et al. (Hrsg.): Begleitbuch zur Ausstellung „Troia Traum und Wirklichkeit“, Theiss, Stuttgart.

HOMER: Ilias. Neue Übertragung von Wolfgang Schadewaldt, Insel, 1975.

HUTTER, C.-P./SCHWADERER, G. (2001): Natur und Kultur Hand in Hand – Die Troas im System des Vogelzugs. In: Troia Traum und Wirklichkeit. Archäologisches Landesamt Baden-Württemberg et al. (Hrsg.), Begleitbuch zur Ausstellung „Troia Traum und Wirklichkeit“, Theiss, Stuttgart.

LAGALY, G./KÖSTER, H. M. (1993): Tone und Tonminerale. In: Jasmund, K. (Hrsg.)/Lagaly, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone, Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopf, Darmstadt.

LATACZ, J. (2001): (W)Ilios ist Wilusa. Damals, Das aktuelle Magazin für Geschichte und Kultur, 4/2001, S. 20/21.

LAUFFER, S. (1979): Die Bergwerkssklaven von Laureion. Steiner, Wiesbaden, 2. Auflage.

KAYAN, İ. (1995): The Troia Bay and Supposed Harbour Sites in the Bronze Age. In: Studia Troica Band 5, Von Zabern, Mainz, S 211 — 235.

KAYAN, İ. (1996): Holocene Stratigraphy of the lower Karamenderes-Dümrek Plain and Archeological Material in the Alluvial Sediments to the North of the Troia Ridge. In: Studia Troica Band 6, Von Zabern, Mainz, S 239 — 249.

KAYAN, İ. (1997): Geomorphological Evolution of the Ciplak Valley and Archaeological Material in the alluvial Sediments to the South of the lower city of Troia. In: Studia Troica Band 7, Von Zabern, Mainz, S. 489 — 506.

KAYAN, İ. (1998): Geoarchaeological research in the Troad. Manuskript zum Vortrag beim Troia und Archäometrie-Kolloquium an der TU Bergakademie Freiberg zur Eröffnung des Lehrstuhles für Archäometallurgie am 4. Juni 1998.

KAYAN, İ. (2000): The Water Supply of Troia. In: Studia Troica Band 10, Von Zabern, Mainz, S. 135 — 144.

KNACKE-LOY, O. (1994): Isotopengeochemische, chemische und petrographische Untersuchungen zur Herkunftsbestimmung der bronzezeitlichen Keramik von Troia. Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen Band 77.

KORFMANN, M. (1998): Troia - Ausgrabungen 1997: Quellhöhle der Unterstadt und Umgebung, Quadrate tu14/15 – Troia VI (?) – Troia X (?). In: Studia Troica Band 8, Von Zabern, Mainz, S. 57 — 62.

KORFMANN, M. (1999): Troia - Ausgrabungen 1998: Unterstadt, Quellhöhle und Umgebung, Quadrate u15 und st14. In: Studia Troica Band 9, Von Zabern, Mainz, S. 22 — 25.

KORFMANN, M. (2000): Troia - Ausgrabungen 1999: Unterstadt, Quellhöhle und Umgebung, Quadrate u15 und tu14 sowie t14. In: Studia Troica Band 10, Von Zabern, Mainz, S. 32 — 37.

MATTHESS, G./UBELL, K. (1992): Lehrbuch der Hydrogeologie Band 1: Allgemeine Hydrogeologie Grundwasserhaushalt. Bornträger, Berlin, Stuttgart.

OKAY, A. (1991): Geology and Tectonics of the Biga Peninsula, Northwest Turkey. Bulletin Technical University Istanbul, Vol. 44, S. 191 — 256.

PEIFFER, S. /PECHER, K. (1997): Experimentelle aquatische Chemie. Spektrum Akademischer Verlag.

PICHLER, H./SCHMITT-RIEGRAF, C. (1993): Gesteinbildende Minerale im Dünnschliff. Enke Verlag Stuttgart.

- REINECK, H.-E. (1990): Kurzgefasste Sedimentologie. Clausthale Tektonische Hefte 27, Von Loga, Köln.
- ROSE, C. B. (1999): The 1998 Post-Bronze Age Excavations at Troia, The cave and the fishtanks. In: Sonderdruck aus Studia Troica Band 9, Von Zabern, Mainz, S. 55 — 61.
- RÖSLER, H.-J./STARKE, R. (1967): Einführung in die Tonmineralogie. 1. Lehrbrief, Bergakademie Freiberg.
- SCHWEDT, G./SCHNEPEL, F.-M. (1981): Analytisch-chemisches Umweltpraktikum. Thieme, Stuttgart.
- SCHWEDT, G. (1995): Mobile Umweltanalytik. Vogel, Würzburg, 1. Auflage.
- SMITH, A. (1954): Blind white fish in Persia. Readers Union, London.
- SÖDING, Z.: Photosedimentometer (Modell Lumosed der Firma Retsch), <http://dvsun3.gkss.de/Einrichtung/Chemie/cgu/>, letzter Zugriff: 18.07.2003.
- TUCKER, M. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. Enke, Stuttgart.
- TUCKER, M. (1996): Methoden der Sedimentologie. Enke, Stuttgart.
- UERPMANN, H. P./UERPMANN M. (2001): Leben in Troia, Die Pflanzen- und Tierwelt. In: Archäologisches Landesamt Baden Württemberg et al. (Hrsg.): Troia Traum und Wirklichkeit. Begleitbuch zur Ausstellung „Troia Traum und Wirklichkeit“, Theiss, Stuttgart.
- VOLKE, P./PETER, H.-J./MEINRATH, G./MERKEL, B. (2002): Hydrochemisches Praktikum. Skript zur Lehrveranstaltung. TU Bergakademie Freiberg. www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl_portal/Wasserchemie/HydrochemischesPraktikum.pdf, letzter Zugriff: 18.07.2003.

WEBER, C. (2003): Hydrogeologische Verhältnisse der östlichen Troas/Türkei. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.

WULFF, H.E. (1968): The Qanats of Iran. In: Scientific American 218 (4), New York, S. 94 — 105.

YALITRAK, C./ALPAR, B. (2002): Kinematics and evolution of the northern branch of the North Anatolian Fault (Ganos Fault) between the Sea of Marmara and the Gulf of Saros. In: Marine Geology, Vol.190, Nr.1-2, S. 351 — 366.

YILMAZ, Y. (1997): Geology of Western Anatolia. In: Schindler, C. (Hrsg.); Pfister, M. (Hrsg.): Active tectonics of northwestern Anatolia- the Marmara Poly-Projekt. vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich, S.31 — 51.

YILMAZ, Y. (2003): Seismotectonics and Geology of Troia and Surrounding Areas, Northwest Anatolia. In: Wagner, Günther A. (Hrsg.); Pernicka, Ernst (Hrsg.); Uerpmann, Hans-Peter (Hrsg.): Troia and the Troad. S. 55ff.

14.2 Abbildungen

| | |
|---|----|
| Abb. 1: Lage Troias in der Türkei (aus ANONYM 2003). | 6 |
| Abb. 2: Vereinfachte geologische Karte der Biga-Halbinsel (nach KNACKE-LOY 1994). | 10 |
| Abb. 3: Tektonische Karte der Türkei und Griechenlands (aus YALTIRAK 1998). | 11 |
| Abb. 4: Verteilung von Vulkaniten und Plutoniten in W-Anatolien (nach YILMAZ 1997). | 14 |
| Abb. 5: Lage des Kartiergebietes auf der Biga-Halbinsel. | 16 |
| Abb. 6: Vereinfachte geologische Karte der Troas (nach KAYAN 2000). | 23 |
| Abb. 7: Geologische Karte der Dardanellen (aus YALTIRAK 2000). | 25 |
| Abb. 8: Paläogeogr. Rekonstruktion der Karamenderes-Ebene (nach KAYAN 2000). | 29 |
| Abb. 9: Einfallen der Schichten im Schmidtschen Netz. | 31 |
| Abb. 10: Einfallen der Klüfte im Rosen-Diagramm. | 32 |
| Abb. 11: Lage der Quelhöhle südwestlich der Ausgrabungsstätte Troias. | 44 |
| Abb. 12: Plan der Höhle. | 45 |
| Abb. 13: Abzweig der Gänge II und III vom Hauptgang aus. | 47 |
| Abb. 14: Gang I a zwischen dem Hauptgang und Schacht 2. | 47 |
| Abb. 15: Zugang zu Gang I a über Barrieren der römischen Epoche unter Schacht 2. | 48 |
| Abb. 16: Sinterbildungen an den Wänden von Gang I a, Blick nach Südosten. | 48 |
| Abb. 17: Blinder Stollen im Gang I b zwischen Schacht 2 und 3 | 50 |
| Abb. 18: Abzweig der kleinen Seitenarme in südöstliche und südwestliche Richtung | 52 |
| Abb. 19: Römische Becken vor dem Höhleneingang. | 53 |
| Abb. 20: Sinter an der Firste des Ganges I a. | 56 |
| Abb. 21: Römisches Aquädukt über den Fluß Kemerdere. | 58 |
| Abb. 22: Normalprofil der lithologischen Einheiten. | 64 |
| Abb. 23: Korrelation der in der Höhle dokumentierten Profile | 65 |
| Abb. 24: Faziesrekonstruktionen nach STEWART (1958). | 75 |
| Abb. 25: Faziesrekonstruktion nach STEWART (1958). | 75 |
| Abb. 26: Faziesrekonstruktion nach PASSEGA (1964). | 76 |
| Abb. 27: Regellose Verteilung der Komponenten. | 79 |
| Abb. 28: Detailansicht eines Biogenrestes in mikritischer Matrix. | 80 |
| Abb. 29: Detailansicht von Komponenten mit dünner mikritischer Umhüllung. | 81 |
| Abb. 30: Regellose Verteilung der Komponenten. | 82 |
| Abb. 31: Detailansicht unterschiedlicher Ooid-Typen. | 82 |
| Abb. 32: Zuordnung der Röntgeninterferenzen der Probe 1037-1. | 89 |
| Abb. 33: Vergleich der Diffraktogramme von Texturpräparaten Probe 1036-3b. | 90 |

| | |
|---|-----|
| Abb. 34: Vergleich der Diffraktogramme .von Probe 1036-2. | 92 |
| Abb. 35: Schüttungsmengen der Quelhöhle 1998 bis 2002. | 104 |
| Abb. 36: Vergleich der Niederschläge in Çanakkale mit den Schüttungen der Höhle. | 105 |
| Abb. 37: Vergleich der Temperaturen der Quelhöhle und Çanakkale. | 111 |
| Abb. 38: Temperaturen des Wassers im Becken E, unter Schacht 2 und in der Zisterne. | 112 |
| Abb. 39: Prinzipdarstellung der hydrogeologischen Verhältnisse. | 116 |
| Abb. 40: Schematische Darstellung eines Qanates (nicht maßstabsgerecht). | 123 |

14.3 Tabellen

| | |
|--|-----|
| Tab. 1: durchschnittliche, maximale und minimale Temperaturen, Niederschlag | 18 |
| Tab. 2: Liste der Aufschlüsse | 36 |
| Tab. 3: Liste der Probenstücke. | 37 |
| Tab. 4: Ungleichförmigkeitswerte, Durchlässigkeitsbeiwerte und angewandte Methoden | 72 |
| Tab. 5: Übersicht über die in den Proben vorhandenen Phasen in Prozent. | 97 |
| Tab. 6: Ergebnisse der Messungen der physikochemischen Parameter des Wasser | 120 |

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Institut für Geologie

Studiengang Geologie



Anhänge zur Diplomkartierung und Diplomarbeit

vorgelegt von

cand.-geol. Pia Lippmann

betreut von

Prof. Dr. Broder Merkel

und

Dr. Christian Wolkersdorfer

TU Bergakademie Freiberg

Institut für Geologie

Lehrstuhl für Hydrogeologie

INHALTSVERZEICHNIS

DIPLOMKARTIERUNG

| | | |
|----------|-----------------------------|----|
| Anhang 1 | Aufschlußliste | 2 |
| Anhang 2 | Anschnitte der Probenstücke | 36 |

DIPLOMARBEIT

| | | |
|----------|--|----|
| Anhang 3 | Ergebnisse der Korngrößenanalysen | 45 |
| Anhang 4 | Modalbestand der gesiebten Probensubstanzen | 50 |
| Anhang 5 | Ergebnisse der Dünnschliffanalysen | 60 |
| Anhang 6 | Ergebnisse der röntgenographischen Analysen | 63 |
| Anhang 7 | Prozentuale Anteile der mittels röntgenographischer Analysen nachgewiesenen Proben, bezogen auf karbonatfreie Probensubstanz | 65 |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--|--|
| 1009 K | Kalkstein | 4 | > 57 | Schluff | hellgelb | - | homogen |
| | Sandstein | 3 | 40 | Kies | hellgelbgrau | - | nicht eingeregelt, oben viele größere Komponenten |
| | Grobsandstein | 2 | 22 | FS, MS | bräunlich | - | komponentengestützt |
| | Tonkalkstein nicht aufgeschlossen | 1 | > 35 > 300 | wenig FS | hellbraungrau | - | |
| 1009 J | Feinsandstein | 2 | 50 — 55 | | hellgelb, bräunlich | - | lagiger Farbwechsel, unregelmäßig |
| | Tonkalkstein nicht aufgeschlossen | 1 | > 10 100 — 150 | Schluff | grüngrau | - | Schicht wellig, +/- horizontal |
| 1009 I | Feinsandstein | 2 | > 50 | Ton | hell-/mittelgrau | - | feingeschichtet |
| | Sandstein | 1 | > 65 | oben toniger | hellgelb | - | nach oben feiner, toniger |
| 1009 H | Feinsandstein | 3 | > 43 | Ton, Schluff | hellgelb, hellgrau | wenige Muschelabdrücke, Schalen gelöst, Verockerungen | cm-mächtige Ton-/ Schluffbänder, netzartig |
| | Sandstein | 2 | 22 | Schluff | ocker, gelblich | - | homogen |
| | Ton-/Schluff-/Kalkstein | 1 | > 20 | FS | ocker, mittelgrau | - | lagig kleine weiße Kalkaggregate |
| 1009 G | Ton/Schluff-/Kalkstein | 9 | > 30 | FS | mittelgrau, ocker | - | homogen |
| | Feinsandstein | 8 | 10 | Schluff | hellgelbgrau | Muscheln, Steinkernerhaltung, einklappig, verockerte Oberflächen, komplett | keine Einregelung |
| | sandiger Tonstein | 7 | 30 | | hell-/dunkelgrau | - | Wechselagerung |
| | Tonkalkstein | 6 | > 10 | FS | hellgrau | - | feingeschichtet |
| | Tonkalkstein | 5 | > 18 | FS | hellgrau | - | homogen |
| | Sandstein | 4 | 37 | oben toniger | ocker/hellgrau | Muschel-/Schnecken­schalen, meist zerbrochen, immer nur eine Klappe mit Sand ver­füllt | fining upward, Schalen-bruchstücke zum Top hin stärker zerbrochen |
| | Feinsandstein | 3 | 4 — 5 | Ton, Schluff | hellgrau | - | keine Schichtung erkennbar |
| | Feinsandstein | 2 | 17 | Schluff | hellgelbgrau | weiße Schalenbruchstücke, stark zerbrochen (mm-Bereich) | homogen |
| | Sandstein | 1 | > 15 | | hellgelb | Muschelschalenbruchstücke (1 — 2 cm), zweiklappig, mit Sand ver­füllt, Schnecken­häuser | Schalen lagig angeordnet |
| | nicht aufgeschlossen | | > 50 | | | | |
| 1009 F | Sandstein | 4 | 20 — 25 | Schluff | hellgelb | weiße Schalenbruchstücke (0,5 cm), nicht gerundet | Fossilführung nur in Lagen |
| | Schluffkalkstein | 3 | 65 | FS | hell-/mittelgrau | | FS-Anteil nach oben abnehmend, coarsening upward |
| | Tonkalkstein | 2 | 8 — 9 | Schluff | weiß | sehr wenige Schalenbruchstücke | lateral unterschiedl. Mächtigkeit |
| | Sandstein | 1 | > 10 | Schluff | hellgrau | dünnschalige Gastropoden, größtenteils komplett, tw. angelöst | homogen |
| | nicht aufgeschlossen | | > 20 | | | | |
| 1009 E | Schluffkalkstein | 3 | > 20 | Ton | hell-/dunkelgrau | sehr geringer Fossilgehalt | plattig |
| 1009 E | Feinsandstein | 2 | 160 — 170 | oben: Ton, Schluff | hellgrau | sehr wenig, Gastropoden, zweiklappige Schalenabdrücke, Ganzkörpererhaltung | keine Einregelung, keine Lagen |
| | Sandstein | 1 | 170 — 180 | FS, MS | graugelb | | interne Schräg-, Kreuzschicht., schneiden sich gegenseitig |
| 1009 D | Feinsandstein | 5 | 25 — 30 | | hellgrau | vereinzelte Biogenreste (1 — 2 cm) | in Schichten lagig eingeregelt, gröbere Lagen eingeschaltet |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--|--|
| | Konglomerat | 4 | 20 | GS, FK, tonige Matrix | hellgrau | unterer Teil: Schalenreste | fining upward |
| | Feinsandstein | 3 | 6 — 18 | Schluff | strohgelb/ocker | | oben gröber, sandiger |
| | Biogenkalkstein | 2 | 60 — 70 | | hellgrau | Steinkerne, Schalenbruchstücke, gedrehte Schneckenhäuser | Schichtung nicht erkennbar |
| 1009 B | Feinsandstein nicht aufgeschlossen | 1 | 20 — 40 > 100 | Ton | ocker, braun | heller Schill, stark zerbrochen, in Lagen | homogen |
| | Karbonat | 11 | > 15 | Calcit-Kristalle | hellgrau | - | lagig |
| | Tonstein | 10 | 35 | homogen | hell, weiß | im unteren Teil Schill | homogen |
| | Biogenkalkstein | 9 | 20 | Ton-Schluff-Matrix | hellgrau | Schalenbruchstücke | Zweiteilung der Lage sichtbar, Ton- /Schluffanteil wechselt |
| | Tonstein | 8 | < 5 | homogen | braun, unten heller | - | homogen |
| | Biogenlage | 7 | 10 | Ton | hellgrau | zweiklappige Schalen und Steinkerne (gute Erhaltung) | keine Einregelung |
| | Biogenkalkstein | 6 | 5 | Schluff | hellgraubraun | stark zerbrochene Schalen (1— 2 cm lang) | keine Einregelung |
| | Schluffkalkstein | 5 | 25 | | hellgrau | Schill (im mm-Bereich) | nicht erkennbar |
| | Schluffkalkstein | 4 | 20 | Ton | hellgrau, hellbraun | heller Schill, stark zerbrochen | homogen |
| | Biogenkalkstein | 3 | 12 | Schluff | hellgrau | Schill, Schalenbruchstücke (max. 2 — 3 cm), überwiegend zweiklappig | tw. eingeregelt |
| | Sandstein | 2 | 9 | MS, GS | rötlichbraun | Schalenreste (im mm- bis cm-Bereich) | Wechsel zwischen biogenreichen und -armen Lagen |
| 1009 C | Tonkalkstein | 1 | 5 — 6 | Schluff, FS | mittelgrau | | nicht erkennbar |
| | Biogenkalkstein | 7 | > 15 | Ton, Sand | hellgrau | größere Schalenbruchstücke und Schill (2 — 3 cm) | homogen |
| | Feinsandstein | 6 | 6 | Schluff | rötlich | heller Schill, stark zerbrochen | eingeregelt |
| | Tonkalkstein | 5 | 4 — 5 | | mittelgrau | - | homogen |
| | sandiger Tonstein | 4 | 10 | Schluff | rötlich, gelb/grau | - | Wechsellagerung (Ton/Sand) |
| | Tonkalkstein | 3 | 30 | Schluff | hell-mittelgrau | heller Schill, stark zerbrochen, in Lagen | Wechsel zwischen schillreichen und -armen Lagen |
| | Biogenkalkstein | 2 | 12 | Ton | hellgrau | Schalenbruchstücke, klein, weiß, eckig | Schill +/- geschichtet |
| | Tonkalkstein | 1 | > 20 | Schluff | hellgrau | - | lagig, unterschiedl. mächtige Bänke sichtbar |
| 1009 A | Biogenkalkstein | 5 | 8 — 12 | Ton | dunkelbraun | klein, weiße zerbrochene Schalenreste | +/- horizontal |
| 1009 A | Tonstein | 4 | 18 | Schluff | hellgelb, weißlich | - | +/- horizontal |
| | Tonschluffstein | 3 | 6 | FS | braun | - | feinlaminiert (mm-Bereich) |
| | Biogenkalkstein | 2 | 8 | Ton, Schluff | hell, gelblich | Muscheln (hauptsächlich einklappig) | Schalen nicht eingeregelt |
| | Feinsandstein | 1 | > 5 | Schluff | weiß | | Schrägschichtung |
| 1019 | Kalkstein | 117 | 20 — 25 | Ton | hellgrau | - | knollige, wellige Oberfläche |
| | Tonkalkstein | 116 | 85 | | braun/weiß | - | karbonat. Einschaltungen, nach unten mächtiger |
| | Kalkstein | 115 | 100 | Ton | weiß | - | knollig, wellig, schalig |
| | Sandstein | 114 | 100 | MS, FS | hellgrau | - | Schräg-/Kreuzschichtung |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|---------------|--------------------|---------------------|-------------|----------------|---|---|
| 1019 | Sandstein | 113 | 15 — 20 | FK | hellgrau | - | brauner Tonstein (112) im unteren Bereich aufgearbeitet |
| | Tonstein | 112 | 15 | FS | braun | - | tw. Schichtung erkennbar |
| | Sandstein | 111 | 65 | | hellgelbgrau | - | nach Korngrößen in 4 Lagen unterteilbar, in Lagen coarsening upward |
| | Tonstein | 110 | 7 | Schluff | braun | - | Mittelsand-Einschaltungen |
| | Sandstein | 109 | 23 | GS | hellgelb | - | homogen |
| | Sandtonstein | 108 | 15 | Schluff | hellgelb/braun | - | Wechselagerung |
| | Sandstein | 107 | 18 | Ton | hellgelbgrau | - | homogen |
| | Tonstein | 106 | 7 | FS | braun | - | feingeschichtet |
| | Kalkstein | 105 | 75 | Ton | weiß | - | homogen |
| | Tonstein | 104 | 7 | FS | mittelgrau | - | homogen |
| | Kalkstein | 103 | 30 | | hellgrau | - | über slumpings: knollig, wellig |
| | Tonstein | 102 | 4 | Schluff, FS | mittelgrau | - | homogen |
| | Sandstein | 101 | 60 | FS, MS | hellgelb | - | slumpings, load casts, allgemein fining upward |
| | Sandstein | 100 | 60 | GS, FK | hellgrau | - | channel, schneidet Schichten 99, 98, 97 |
| | Tonstein | 99 | 10 | Sand | braun | - | aufgearbeitet |
| | Feinsandstein | 98 | 15 | Schluff | hellgelb | - | homogen |
| | Tonstein | 97 | 12 | Sand | hellgelb | - | Sandlinsen, unregelmäßig geschichtet, verrutscht |
| | Sandstein | 96 | 22 | | hellgelb | - | fining upward |
| | Tonstein | 95 | 10 | | braun | - | feingeschichtet |
| | Sandstein | 94 | 8 | | hellbraun | - | homogen |
| | Tonstein | 93 | 28 | | braun | - | homogen |
| | Sandstein | 92 | 7 | | hellgraubraun | - | homogen |
| | Tonstein | 91 | 8 | | braungraugrün | - | homogen, kleine Sandadern |
| | Sandstein | 90 | 20 | FS, MS | hellgelb | - | homogen, oben gröber |
| | Tonstein | 89 | 20 | | hellgrau | - | feingeschichtet |
| | Tonstein | 88 | 30 | | braun | - | homogen |
| | Sandstein | 87 | 210 | FS, MS | hellgelb | - | feingeschichtet, schwache Kreuzschicht., wellig |
| | Sandstein | 86 | 70 | Ton | hellgrau | - | feingeschichtet, laminiert |
| | Sandstein | 85 | 50 | | hellgelb | - | zerbrochene Schneckenhäuser, Muschelschalenabdrücke |
| | Sandstein | 84 | 0 — 20 | MS | hell, ocker | - | homogen, channel, schneidet Schichten 83, 82, 81 |
| Kalkstein | 83 | 17 | | hellgrau | - | eingeregelt Steinkerne, Schalen teilweise weggelöst | |
| Tonstein | 82 | 15 | | weiß/grau | - | wellig, eingeregelt | |
| Kalkstein | 81 | 10 — 15 | | weiß | - | Muschelschalenabdrücke (tw. komplett) | |
| Tonkalkstein | 80 | 13 | | weiß | - | zerbrochene Biogene, nicht eingeregelt | |
| Tonkalkstein | 79 | 15 | | graubraun | - | Muschelschalenabdrücke, verockert | |
| Tonkalkstein | 78 | 20 | FS | weiß | - | wenige Muschelschalenabdrücke | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|--|---|
| | Kalkstein | 77 | 100 | | hellgrau | Muschelschalen (größtenteils eingeregelt), Steinkerne, Schneckenhäuser | +/- eingeregelt |
| | Schluffkalkstein | 76 | 3 | Ton, FS | hellgrau | - | homogen, ungeschichtet |
| | Kalkstein | 75 | 8 | Ton, Schluff, FS | hellgrau | Steinkerne, Schalenreste, +/- komplett | homogen |
| | Tonkalkstein | 74 | 10 | | dunkelgrün | Schill, eingeregelt, Bruchstücke im mm-Bereich | eingeregelt Schalenreste |
| | Biogenkalkstein | 73 | 25 | | hellgrau | +/- komplette Steinkerne, wenige Muschelschalenabdrücke | homogen |
| | Tonkalkstein | 72 | 15 | Schluff | hellgrau | verockerte Abdrücke, +/- komplett | eingeregelt |
| | Tonkalkstein | 71 | 10 | Schluff, FS | hellgrau | eingeregelt Schalen, +/- komplett | eingeregelt |
| | Tonkalkstein | 70 | 60 | Schluff | hellgraubraun | in Lagen Biogenreste, Schalen mit Sediment verfüllt, tw. zerdrückt | teilweise Schalen eingeregelt |
| | Kalkstein | 69 | 37 | | weiß | einklappige Schalenabdrücke, komplett | kaum eingeregelt |
| | Sandstein | 68 | 12 | FS, MS | rötlich | Schalenreste, am Top vermehrt auftretend | eingeregelt |
| | Tonsandstein | 67 | 110 | | graugrün/hellgrau | - | Wechselagerung |
| | Biogenkalkstein | 66 | 20 | Ton, FS | hellgelb | vollständige Steinkerne, tw. eingeregelt, ein- und zweiklappig | tw. eingeregelt, Basis: toniger, Top: sandiger, fester |
| | Tonkalkstein | 65 | 25 | FS | hellgrau | Steinkerne (2 — 3 cm), zwei- und einklappig, Schalen weggelöst | keine Einregelung, in 3 Bänke unterteilbar (nach Komp.) |
| | Tonkalkstein | 64 | 11 | | graugrün | eingeregelt Schalenbruchstücke, lagig | zum Pflaster eingeregelt Bruchstücke |
| | Kalkstein | 63 | 10 | | hellgrau | einklappige Schalenreste, Steinkerne, tw. vollständig, eingeregelt | eingeregelt |
| | Sandstein | 62 | 22 | alle Korngrößen | hellgelb, ocker | - | interne Schrägschichtung, unterschiedl. KG |
| | Tonsandstein | 61 | 5 | | hellbraun | Schill, eingeregelt, Bruchstücke im mm-Bereich | Wechselagerung (Sand-, Tonstein) |
| | Sandstein | 60 | 40 — 45 | | hellgelb | - | interne Schrägschichtung, unterschiedl. KG, load casts |
| 1019 | Tonsandstein | 59 | 45 | | braun/hellgrau | im Ton wenig Schill (bis 5 mm) | fein laminiert (mm-Bereich), Ton geschichtet |
| | Sandstein | 58 | 17 | | hellgraubraun | Schill im mm-Bereich, eingeregelt | feinlaminiert |
| | Tonstein | 57 | 23 | FS | hellbraun | - | +/- horizontal geschichtet |
| | Sandstein | 56 | 10 | GS, FK | hellgrau | Schill bis 10 mm | |
| | Feinsandstein | 55 | 37 | Ton | graubraun | - | geschichtet |
| | Kalkstein | 54 | 25 | FS, MS | weiß | Schillreich (mm-Bereich) | unebene Schichtflächen, load casts |
| | Schluffkalkstein | 53 | 5 — 10 | tonig | grünbraun | Schill (mm-Bereich), eingeregelt | homogen |
| | Sandstein | 52 | 35 | | hellgrau | Schalenreste im mm-Bereich, Steinkerne erhalten, eingeregelt | load casts, Einregelung der Schalenreste |
| | Tonstein | 51 | 100 | | braun | - | homogen |
| | Feinsandstein | 50 | 35 | Schluffanteil | grün | - | eingeschaltete GS-Lagen |
| | Tonkalkstein | 49 | 10 — 15 | | braun | - | homogen |
| | Sandstein | 48 | 45 | GS, FK | graugrün | - | fining upward, Top: toniger werdend |
| | Tonkalkstein | 47 | 16 | GS | braun/grün | - | Wechselagerung (2 — 3 cm Lagen) |
| | Schluffkalkstein | 46 | 80 | Ton, FS | weiß | Muschelschalen | oben toniger |
| | Tonkalkstein | 45 | 15 | Schluff | weiß | fossilreich, Steinkerne, Schalenabdrücke, zerdrückt, meist komplett | Basis: mehr Schalenbruchstücke |
| | Tonkalkstein | 44 | 17 | Schluff | hellgrau | einschalige Muschelschalenreste, +/- komplett | |
| | Kalkstein | 43 | 27 | | weiß | Biogene enthalten | Basis: biogenführend |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------------|--|---|
| | Tonkalkstein | 42 | 57 | Schluff | hell | zerbrochene Muschelschalen | eingeregelt, größere grüne Tonbrocken eingelagert |
| | nicht aufgeschlossen Tonstein | 38 | 400 > 12 | | hellgelb | - | Top: horizontal geschichtet |
| | Schluffstein | 37 | 20 | | hellgrau, grünlich | - | horizontalgeschichtet |
| | Feinsandstein | 36 | 40 | FS | hellgelb | - | Mitte: Schrägschichtung |
| | Tonstein | 35 | 25 | Schluff | hellgrau | - | homogen |
| | Tonstein | 34 | 20 | | weiß | - | homogen |
| | Tonschluffstein | 33 | 80 | | graubraun, ocker | - | homogen, Gipshäutchen zw. einzelnen Schichten |
| | Kalkstein | 32 | 25 | Ton, Schluff | hellgrau | Steinkerne, Muschelschalenabdrücke | Biogene eingeregelt |
| | Schluffstein | 31 | 40 — 50 | Ton | hellgrau | - | homogen |
| | Tonkalkstein | 30 | 20 | | hellbraun | schillreich, +/- horizontal eingeregelt | Mitte: Lage ohne Schill |
| | Schlufftonstein | 29 | 9 | | hell | Muschelreste bis 2 cm, vollständige Steinkerne | homogen |
| | Feinsandstein | 28 | 20 | | hellgrau | Schill (mm-Bereich), lagig | lagig |
| | Feinsandstein | 27 | 13 | | hellbraun | - | homogen |
| | Tonstein | 26 | 140 | Schluff | hell-/dkl.grau | - | Wechselagerung |
| | Sandstein | - | 0 — 30 | Ton | hellgraugelb | - | channel-Bildung |
| | Tonstein | 25 | > 35 | Schluff | hellgrau | - | homogen |
| 1019 | nicht aufgeschlossen Sandstein | 22 | 100 > 13 | FS, MS | hellgelb | Steinkerne, Schalen weggelöst, bilden kompetene Lagen aus, lagig Schneckenhäuser, meist komplett erhalten | |
| | Kalkstein | 21 | 15 | FS | hellgrau | sehr wenig Fossilien | homogen |
| | Sandstein | 20 | 15 | | hellgrau | in Lagen Fossilpflaster, Steinkerne (2 — 3 cm), Schneckenhäuser enthalten; sonst fossilarm | fossilführende Lagen |
| | Sandstein | 19 | 20 | Schluff, Ton | gelbgrau | - | fining upward |
| | Sandstein | 18 | 12 | | weiß | wenige Schneckenhäuser | homogen |
| | Tonstein | 17 | 3 | Schluff, FS | mittelgrau | - | homogen |
| | Sandstein | 16 | 150 | GS, FK | hellgelbbraun | - | homogen |
| | Tonkalkstein | 15 | 75 | Sand | hellgrau | - | 2 — 3 cm Sandlage im Topbereich |
| | Sandstein | 14 | 28 | | hellgrau | einzelne weiße Schalenreste | homogen |
| | Schluffstein | 13 | 12 | Sand, Ton | hellgrau, ocker | - | Wechselagerung |
| | Sandstein | 12 | 45 | | hellgelbgrau | - | homogen |
| | Schlufftonstein | 11 | 1 — 2 | | hellgrau | - | slumping-Bildungen |
| | Feinsandstein | 10 | 6 | | hellgelb, ocker | - | homogen |
| | Tonsandstein | 9 | 5 — 10 | | mittelgrau/ocker | - | Wechselagerung |
| | Sandstein | 8 | 28 | FK | hellgrau, ocker | Schilllagen im mm-Bereich, einzelnen größere Schalenbruchstücke mit Aragonitschicht | Wechselagerung |
| | Sandstein | 7 | 9 | GS | hellgrau | - | homogen |
| | Feinsandstein | 6 | 20 — 40 | | hellgelbgrau | Steinkerne (3 — 5 cm), zweiklappig, +/- horizontal | channel-Bildung, Schalen eingeregelt |
| | Feinsandstein | 5 | 10 — 25 | | hellgrau | - | Top: feinkörniger |
| | Schluffstein | 4 | 9 — 12 | Ton, FS, MS | mittelgrau | - | Top: Wechsel mit FS/MS |
| | Sandstein | 3 | 50 | Schluff | hellgrau | Lagen fossilführend, einschalig, mit Sand ausgefüllt, Aragonitschicht z.T. erhalten | Grobsandlinsen (4x45 cm), sonst homogen |
| | Tonkalkstein | 2 | 7 | Schluff | hellgelbbraun | - | homogen |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------|-----------------|--|--|
| | Schluffkalkstein | 1 | > 6 | FS, Ton | hellgrau | - | homogen |
| 1020 | Kalkstein | 2 | > 120 | Schluff | weiß | Algenmatten, -lagen | homogen |
| | Tonkalkstein | 1 | > 20 | FS | braun | - | homogen |
| 1021 | Kalktonstein | 12 | 80 — 90 | | hellgrau/braun | - | Tonstein: homogen; Wechsellagerung |
| | Sandstein | 11 | 220 | | rötlich | - | tw. gröbere Lagen |
| | Kalkstein | 10 | 70 | | weiß, bräunlich | - | wolkige, lagige Strukturen |
| | Sandstein | 9 | 100 — 110 | alle Korngrößen | rötlich | - | keine Gradierung, Übergang nach S in Tonstein |
| | Kalkstein | 8 | 100 | | hellgrau | - | Top der Wechsellagerung |
| | Tonkalkstein | 7 | 300 — 350 | | grünbraun/braun | - | regellos verteilte Intraklasten, Tonstein homogen |
| 1021 | Kalkstein | 6 | 80 | FS, Ton, Schluff | hellgraubraun | - | fließender Übergang zu 1021-5 |
| | Tonkalkstein | 5 | 100 | FS | grünbraun | - | grünliche Tonsteinteile unregelmäßig verteilt |
| | Kalkstein | 4 | 20 — 120 | | hellgrau | - | schalig, lagige Struktur |
| | Tonstein | 3 | 20 — 70 | | braungraugrün | - | weiße Kalkadern |
| | Kalkstein | 2 | 60 | | hellgrau | - | dünn braune Tonsteine eingeschaltet, sonst homogen |
| | Tonstein | 1 | > 10 | | braun | - | homogen |
| 1022 | Kalkstein | 2 | 20 — 30 | | hellgrau | Schnecken- und Muschelschalen | ooidisch |
| | Tonstein | 1 | > 10 | FS | grünlich | - | homogen |
| 1023 H | Kalkstein | 24 | 25 — 30 | | hellgelb | Unterseite biogenreich, teilweise komplette Schalen erhalten | slumping-Bildung |
| | sandiger Tonstein | 23 | 90 | bis GS | hellgrau/braun | im Sand: mm-große Schalenbruchstücke | Wechsellagerung, laminiert; wellig |
| | Kalkstein | 22 | 25 | | hellgrau | - | homogen |
| | sandiger Tonstein | 21 | 105 | FS, Ton, Schluff | hellgelb/braun | in Lagen schillführend | Wechsellagerung |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--|--|
| | Kalkstein | 20 | 12 | | hellgrau | ein- und zweiklappige Muscheln, Schalen gelöst, Steinkerne, wellige Unter- und Oberkante eingeregelt | |
| | sandiger Tonstein | 19 | 120 | oben Ton | hellgraubraun | - | allmählicher Übergang von Ton- zu Sandstein; Tonstein von oben eingesunken |
| | nicht aufgeschlossen | | > 100 | | | | |
| | Sandstein | 17 | 22 | Kies | hellgelb | - | coarsening upward |
| | Kalkstein | 16 | 18 — 20 | | hellgrau | Muschelschalen, Steinkerne, +/- horizontal eingeregelt, Schalen meist weggelöst | homogen |
| | Kalkstein | 15 | 15 — 16 | | hellgrau | +/- komplette Steinkerne, zweiklappig | homogen |
| 1023 H | Kalkstein | 14 | 15 | | hellgrau | kleine, schlecht eingeregelt Schalenbruchstücke | wellige Oberfläche, sonst homogen |
| | Kalkstein | 13 | 20 | Ton | hellgrau, weiß | kleine zerbrochene Muschelschalen | homogen |
| | Kalkstein | 12 | 12 | Ton, Schluff, FS | hellgrau | komplette Steinkerne, ockergefärbte Oberfläche, Schalen weggelöst | Schalen eingeregelt |
| | Kalkstein | 11 | 100 | | hellgrau | Schalen, Steinkerne erhalten, kompetentere Lagen enthalten viele Fossilien | kompetente Abschnitte, nach oben feinplattiger |
| | Kalkstein | 10 | 60 | | hellgrau | 1 — 2 cm mächtiges Band mit Muschelschalenbruchstücken | +/- Parallelschichtung, Schilllage |
| | Tonstein | 9 | 10 — 20 | | graugrün | - | homogen |
| | Kalkstein | 8 | 25 | | hellbräunlich | wenige Muschelschalen | Schalen eingeregelt, schwach geschichtet |
| | Kalkstein | 7 | 14 | | hellgrau | Schalenreste, ein- und zweiklappig, lagig | homogen, Schilllagen |
| | Kalkstein | 6 | 12 | | hellgrau | - | homogen |
| | Kalkstein | 5 | 15 | | hellgrau | Schalenreste (< 1 cm) | aufgearbeitete Lagen |
| | Kalkstein | 4 | 20 | | hellgrüngrau | zerdrückte Muschelschalen (1 — 2 cm), tw. zweiklappig | eingeregelt Schalenreste |
| | Kalkstein | 3 | 20 | | hellgrau | zerbrochene Schalenreste (1 — 2 cm) | homogen |
| | Tonstein | 2 | 28 | FS, Schluff | dkl. grüngrau | in dünnen Lagen zerbrochene Schalenreste | geschichtet |
| | Kalktonstein | 1 | > 120 | | hellgelb/ocker | - | Wechsellagerung, Parallelschichtung |
| 1023 G | Tonkalkstein | 10 | > 200 | FS | graugrün/hellgrau | - | Wechsellagerung, Ton laminiert |
| | Kalkstein | 9 | 10 | FS | hellgelb | - | homogen |
| | Tonkalkstein | 8 | 7 | | mittelgrau | Mitte: dünne Sandlage mit wenigen Schalen, eingeregelt, teilweise komplett | lagig, dünnplattig |
| | Sandstein | 7 | 50 | alle Korngrößen | hellgelb, ocker | - | Tonlagen eingeschaltet, sonst homogen |
| | Tonkalkstein | 6 | 120 | wenig FS, Schluff | dkl. grüngrau | - | homogen |
| | Biogenkalkstein | 5 | 25 | | hellgelb | Schalen (bis 4 cm), teilweise eingeregelt, zweiklappig, Steinkerne, teilweise komplett | homogen |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|---|--------------------|---------------------|-------------|-------------------|---|--|
| | Schluffstein | 4 | 55 | Ton | hell/dkl.grau | - | Wechselagerung: heller und dunkler Lagen |
| | toniger Sandstein | 3 | 80 | | hellgrau/graugelb | zum Top schalenreicher, eingeregelt, zerdückt | Wechselagerung |
| | Tonkalkstein | 2 | 13 | Schluff, FS | hellgrau | - | Parallelschichtung |
| | toniger Sandstein nicht aufgeschlossen | 1 | > 90 > 200 | Schluff | grau/ocker | 2 — 3 cm mächtige Schilllage | +/- horizontale Wechselagerung |
| 1023 A | Kalkstein | 8 | > 60 | | hellgrau | Schalenabdrücke, Schalen weggelöst | wellig, knollig |
| | Kalktonstein | 7 | 50 | | hellgrau | Steinkerne, Muschelschalenabdrücke | Wechselagerung, wellig |
| | Tonstein | 6 | 11 | Schluff | graugrün | Muschelschalenabdrücke, Steinkerne, meist komplett | Biogene eingeregelt, sonst homogen |
| | Kalkstein | 5 | 30 | | hellgrau | viele zweiklappige Muschelschalen, tw. weggelöst, Hohlräume erhalten | Tonlinsen mit Schalenresten |
| | Tonkalkstein | 4 | 45 | | hellgrau | Topbereich: eingeregelt Schalen, mm- Bereich | parallel geschichtet |
| | Tonkalkstein | 3 | 12 | | hellgraugrünlich | Top: Muschelschalenpflaster | Schalenreste eingeregelt |
| | Kalkstein | 2 | 38 | | hellgrau | Steinkerne, komplett erhalten | |
| | Sandstein nicht aufgeschlossen | 1 | > 45 > 3000 | GS, FK | hellgrau | zerbroche Schalenreste | Kreuzschichtung |
| 1023 F | Kalkstein | 4 | > 20 | FS, MS | hellgrau | Unterkante mit Muschelschalenabdrücken, Schneckensteinkerne | homogen, mit welliger Unterkante |
| | Sandstein | 3 | 100 | FS, MS | hellgrau | Top: auffällig dickschalige Muschelschalen mit Aragonitschicht | Kreuz-, Horizontalschichtung sichtbar |
| | toniger Sandstein | 2 | 100 | | ocker/mittelgrau | im Sandstein angehäuft, zerbrochen, nicht eingeregelt | Wechsel., +/- horizontal gelagert |
| | Sandstein | 1 | > 10 | | hellgelb | - | Schichtung erkennbar, tw. FK eingeschaltet |
| | nicht aufgeschlossen Sandstein | 4 | > 25 > 150 | GS, FK | hellgelb, ocker | Schneckenhäuser, teilweise angelöst, Aragonitschicht meist erhalten | FK/Sand-Lagen, tonige Bänder |
| | Kalkstein | 3 | 15 | FS, MS | hellgrau | eingeregelt Schneckenhäuser | in Lagen gelblich verfärbt |
| | Sandstein | 2 | 70 | Schluff | hellgrau | vereinzelt stark zerbrochene Muschelschalenreste | homogen |
| | Tonkalkstein | 1 | > 60 | FS | grüngrau | mehrere Schilllagen, zerdrückte, vollständige Muschelschalen | FS-Lagen, Schilllagen |
| | nicht aufgeschlossen Kalkstein | 2 | > 100 > 20 | FS | hellgrau | - | wellig, knollig, keine Schichtung |
| | Kalkstein | 1 | > 150 | | hellgrau | vereinzelt Schalenreste, zerbrochen | homogen |
| 1023 C | Kalkstein | 1 | > 150 | FS, MS | hellgrau | Muschelschalen, Abdrücke, Steinkerne tw. noch mit Schalen | homogen |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|---|--------------------|---------------------|------------------|----------------------------|---|---|
| 1023 B | nicht aufgeschlossen Kalkstein | 1 | > 50 > 70 | FS, Ton, Schluff | hellgrau | mit Sediment verfüllte Schneckenhäuser, teilweise zerbrochen | homogen |
| 1024 B | Kalkstein | 8 | > 60 | | hellgrau | im oberen Teil Steinkernlagen | feingeschichtet |
| | Kalkstein | 7 | 110 | | hellgelb | Schalenabdrücke, Schalen weggelöst | eingeregelt |
| | Tonkalkstein | 6 | 10 | | graubraungrünlich | zerbrochene, zerdrückte Schalenbruchstücke | eingeregelt |
| | Kalkstein | 5 | 25 | | hellgelb | komplette Steinkerne | homogen |
| | Kalkstein | 4 | 120 | toing, schluffig | hellgrau | wenige Biogene, tw. Schalenerhaltung, tw. Abdrücke | tw. eingeregelt |
| | toniger Sandstein | 3 | 70 | | grau/hellgrau | - | Wechsellagerung, Tonstein: geschichtet; Sandstein: homogen |
| | Kalkstein | 2 | 100 | Ton/ FS | hellgelb | Muschelschalenreste, unterschiedlich häufig verteilt, tw. Schalen weggelöst | eingeregelt |
| 1024 A | toniger Sandstein nicht aufgeschlossen | 1 | > 140 > 300 | | rotbraun/hellgelb | - | interne Schichtung |
| | Sandstein | 15 | > 150 | | hellgrau | im oberen Bereich Schalenbruchstücke, mit Aragonit, Wandstärke: 2 — 3 mm | Kreuz-/Schrägschichtung |
| | Sandstein | 14 | 30 | FK, MK | hellgelb | zerbrochene Schalenreste, tw. eingeregelt | homogen |
| | sandiger Tonstein | 13 | 90 | | T: mittelgrau; S: gelblich | - | Kiesbänder, -einschaltungen, leichte Schrägschichtung |
| | toniger Sandstein | 12 | 50 | alle Korngrößen | T: weiß; S: hellgrau | - | Wechsellagerung |
| | Feinsandstein | 11 | 30 | | hellgelb | - | homogen |
| | Kalkstein | 10 | 200 | FS | hellgrau | - | homogen |
| | toniger Sandstein | 9 | 160 | schluffig | T: grau; S: gelb | - | Wechsellagerung |
| | Kalkstein | 8 | 50 | | hellgrau, weißlich | kleine Schalenhohlräume (ca. 5 mm) | homogen |
| | Sandstein | 7 | 130 | tw. FK | hellgelb | eingeregelter Schill | homogen |
| | Kalkstein | 6 | 40 | GS, FK, MK | hellgelb | Schill bis 3 cm, Aragonitschicht erhalten, gröbere und feinere Schilllagen, Schneckenhäuser | Kiese eingeregelt, in Lagen stark verfestigt |
| | sandiger Kalkstein | 5 | 200 | | gelb/violett | - | feingeschichtet, parallelgeschichtet |
| 1024 A | Sandstein | 4 | 16 | Ton | gelb | Schilllage (1 cm mächtig) | homogen |
| | Kalkstein | 3 | 7 | | hellgrau | wenige Muschelschalen, eingeregelt | eingeregelte Biogene, sonst homogen |
| | Kalkstein | 2 | 20 | | hellgelb | eingeregelte Schalenbruchstücke im mm- Bereich | homogen |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------|--|-----------------------------------|
| | Sandstein | 1 | > 60 | FS | gelblich | - | Schräg-/Kreuzschichtung |
| 1026 B | Kalkstein | 8 | > 90 | | hellgrau | Biogene, Abdrücke, Schalen tw. gelöst | homogen |
| | Biogenkalkstein | 7 | 37 | Ton | hellgelbgrau | Biogene, Abdrücke, Schalen tw. gelöst | Wechsellagerung |
| | Ton-/Kalkstein | 6 | 4 — 6 | | graugrün | geschichtete Schalenbruchstücke | geschichtet |
| | Kalkstein | 5 | 13 | | hellgrau | - | homogen |
| | Kalkstein | 4 | 13 | Ton | hellgrau | Muschelschalenreste | homogen |
| | Tonkalkstein | 3 | 7 | | graugrün | im Topbereich Muschelreste | homogen |
| | Biogenkalkstein | 2 | 30 | | hellgelb/braun | - | homogen |
| | Sandstein | 1 | > 10 | | hellgelb | - | homogen |
| 1026 A | nicht aufgeschlossen | | > 3000 | | | | |
| | Sandstein | 7 | 15 — 60 | GS, FK | hellgelbgrau | herausgewitterte Schalen, Schneckenhäuser, Hohlräume | homogen |
| | Sandstein | 6 | 110 | | hellgelb | - | homogen |
| | Sandstein | 5 | 90 | GS, FK | hellgelb | im Topbereich: Schill | lagig |
| | Feinsandstein | 4 | 11 | Glimmer | dlkgrau | lagenweise Schalenbruchstücke | eingeregelt |
| | Feinsandstein | 3 | 60 | Hell/Dunkelglimmer | hellgrau | - | leicht geschichtet |
| | Feinsandstein | 2 | 12 | | mittel/dklgrau | - | homogen |
| | Feinsandstein | 1 | > 10 | | hellgrau | - | geschichtet |
| 1027 | Sandstein | 10 | > 100 | MS, GS | hellgelb | - | homogen |
| | Feinsandstein | 9 | 80 | Glimmer | hellgrau | - | geschichtet |
| | Sandstein | 8 | 150 | GS, FK | hellgelb | - | größere Komponenten in Lagen |
| | Sandstein | 7 | 500 | | hellgelb | - | Wechsellagerung |
| 1027 | toniger Sandstein | 6 | 10 | | hellgrau | dickschalige Muschelschalenreste, erhalten Aragonit | homogen |
| | Tonkalkstein | 5 | 9 — 13 | | mittelgrau | +/- komplette Schalen, Abdrücke, Steinkerne | homogen |
| | Tonstein | 4 | 25 | | dklgrau | eingeregelter Schill, unterschiedl. Häufigkeit | homogen |
| | Tonkalkstein | 3 | 18 | | graugrün | Schill, nur in Lagen, nicht gerundete Kanten | homogen |
| | Tonstein | 2 | 8 | | mittelgrau | - | Kreuzschichtung |
| | Tonkalkstein | 1 | > 160 | FS | gelb | - | geschichtet, in der Mitte FS-Lage |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------|---------------------|---|---------------------------------------|
| 1028 | Feinsandstein | 11 | > 30 — 40 | | hellgrau | - | homogen |
| | Kalkstein | 10 | 170 | | hellgelb | in Lagen fossilführend, Schneckenhäuser, Muschelschalenbruchstücke | homogen |
| | Biogenkalkstein | 9 | 5 | | hellgelb | Steinkerne, zerdrückt, eingeregelt, kl. Ooide | homogen |
| | Tonstein | 8 | 40 | | hellgrau | - | nach oben sandiger |
| | Kalkstein | 7 | 60 | | hellgrau | Muschelschalen herausgelöst, Ooide, Schneckenhäuser | Top: stromatolithenartig, uneben |
| | Kalkstein | 6 | 90 | | weiß, hellgrau | kleinere Muschelschalenbruchstücke, eingeregelt | Wechselagerung |
| | Kalkstein | 5 | 5 | | hellgrau | einige wenige Muschelschalen | homogen |
| | Tonstein | 4 | 5 — 6 | | hellgrau | sehr kleiner, zerbrochener Schill | homogen |
| | Biogenkalkstein | 3 | 110 | Ton | hellgrau | Steinkerne, Schalen gelöst, Verockerung, zweiklappig, tw. Komplet | homogen |
| | Biogenkalkstein | 2 | 10 | | hellgrau | hauptsächl. Steinkerne, eingeregelt, Muschelschalenpflaster | homogen |
| 1029 | toniger Sandstein | 1 | > 90 | | mittelgrau/hellgrau | immer im oberen Bereich schillführend | Wechselagerung |
| | Sandstein | 20 | > 100 | | hellgrau | - | homogen, leichte Schichtung erkennbar |
| | Kalkstein | 19 | 100 | | weiß, hellgrau | wenige Schalenreste, tw. gelöst | Wechselagerung |
| 1029 | Kalkstein | 18 | 150 | FS | hellgrau | ab Mitte: Schalenreste, zerdrückt, komplett, zum Top stärker zerstört | geschichtet |
| | toniger Sandstein | 17 | 105 | | mittelgrau/ocker | Pflanzenhäcksel im Tonstein | Wechselagerung; Ton: kreuzgeschichtet |
| | Kalkstein | 16 | 13 | | hellgrau | Stromatolith | wellig, lagig |
| | toniger Sandstein | 15 | 80 | | dlkgrün/gelblich | Sand im oberen Bereich schillführend | Wechsel.; Ton: auskeilend |
| | Biogenkalkstein | 14 | 8 | | hellgraugelb | Steinkerne, Schalen gelöst | eingeregelt |
| | Sandstein | 13 | 20 | MS, GS | hellgrau | - | homogen |
| | Tonkalkstein | 12 | 5 — 10 | | dklbraun | - | homogen |
| | Sandstein | 11 | 70 | FS, GS | hellgrau | - | Kreuzschichtung |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------|----------------|--|--------------------------------------|
| | Tonkalkstein | 10 | 20 — 25 | | dklgrün | Schill | homogen |
| | Feinsandstein | 9 | 20 | | hellgrau | herausgewitterte Muschelschalen, Schalenabdrücke | homogen |
| | Sandstein | 8 | 17 | | hellgrau | tw. Schalenreste, tw. Hohlräume | fining upward |
| | Feinsandstein | 7 | 20 — 25 | | hellgrau | - | kreuzgeschichtet |
| | Sandstein | 6 | 20 — 40 | Kies | hellgrau | - | Kieslagen |
| | Tonkalkstein | 5 | 55 — 60 | GS | mittelbraun | - | homogen |
| | Sandstein | 4 | 80 | | hellgraubraun | - | GS-Band, schräg-, kreuzgeschichtet |
| | sandiger Tonstein | 2 | 100 | | hellgrau/braun | - | Wechselagerung |
| | Sandstein | 1 | > 120 | Schluff | hellgrau | - | geschichtet |
| 1030 | Sandstein | 7 | >200 | | hellgelb | - | kreuzgeschichtet, Kiesbänder, -lagen |
| | Biogenkalkstein | 6 | 85 | | hellgraubraun | schillreich, Schalen tw. gelöst | eingeregelt |
| | Biogenkalkstein | 5 | 9 | | hellgraubraun | viele Biogene, verbacken | porös |
| | Sandstein | 4 | 12 | FS, MS | gelb | - | geschichtet |
| | Tonkalkstein | 3 | 10 | Sand | gelb | Schalenreste, tw. gelöst | Sandband (0,5 — 1 cm) |
| 1030 | Tonstein | 2 | 7 | | gelbbraun | +/- eingeregelt Schalen | |
| | Tonstein | 1 | > 100 | | hellgrau | Schalenreste, tw. verockerte Schalenabdrücke | Schalen in Lagen |
| 1033 | Stromatholithenkalk | 14 | > 30 | | hellgrau | - | wellig, lagig |
| | Sandstein | 13 | > 250 — 300 | FS | hellgraugelb | - | lagig, bankig |
| | Biogenkalkstein | 12 | 50 | | hellgrau | Schalenabdrücke, Steinkerne | eingeregelt |
| | Biogenkalkstein | 11 | 55 | Ton, Schluff | hellgrau, weiß | in Lagen biogenführend | ungeschichtet |
| | Tonkalkstein | 10 | 80 | | hellgrau, weiß | in Lagen Muschelschalenbruchstücke | ockerfarbende Bänder |
| | Tonstein | 9 | 60 | FS | dklgrau | - | homogen |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|-----------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--|---|
| | Kalkstein | 8 | 20 | | hellgrau | - | wellige Oberfläche, stromatolithisch |
| | Biogenkalkstein | 7 | 75 | Sand, Ton, Schluff | hellgelb, verockert | Schalenbruchstücke | fossilfreie Tonlagen |
| | Tonstein | 6 | 40 | FS | hellgrau | - | geschichtet, laminiert |
| | Sandstein | 5 | 330 | FS, MS | hellgelbgrau | in einzelnen Lagen schillführend | Tonlagen, channels |
| | Tonstein | 4 | 30 | | grüngrau | - | tw. Kreuzschichtung |
| | Sandstein | 3 | 65 | Ton | hellgelb | Schill, GS-Lagen enthalten mehr Schill | homogen |
| | Kalkstein | 2 | 35 | Ton, Schluff | hellgelb | Schalenreste, tw. Zweiklappig | geschichtet, fossilführend nur in Lagen |
| | Tonkalkstein | 1 | > 90 | Schluff | hellgrau | unteres 2/3 schillführend | horizontelgeschichtet |
| 1035 | Biogenkalkstein | 16 | > 25 | | hellgrau | Steinkerne: Schnecken, Muscheln | homogen |
| | Sandstein | 15 | 7 | FS | hellgelb | - | homogen |
| | Sandstein | 14 | 60 | Ton | hellgrau | - | homogen |
| | Kalkstein | 13 | 95 | GS, MS | hellgrau | - | homogen |
| 1035 | Biogenkalkstein | 12 | 30 | FS | hellgrau | Steinkerne, eingeregelt, komplett | homogen |
| | Biogenkalkstein | 11 | 40 | | hellgrau | Steinkerne | homogen |
| | Biogenkalkstein | 10 | 25 | | hellgrau | Steinkerne, verockert | homogen |
| | Tonkalkstein | 9 | 45 | | hellgrau, weiß | - | geschichtet |
| | Karbonat | 8 | 50 | FS, MS, FK, GK | hell, weiß | unten Steinkerne | homogen |
| | Sandstein | 7 | 10 | MS | ockergelb | - | homogen |
| | Tonschluffstein | 6 | 60 | Kalkkomponenten | graugrün | - | homogen |
| | Stromatolith | 5 | 15 | | hellgraugelb | - | homogen |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|----------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--|---|---|
| | sandiger Biogenkalkstein | 4 | 80 | | hellgelb | Schalenreste | oben feinlam. Sandstein und Schill eingeregelt |
| | Ton-/Sandstein-WL | 3 | 110 | | grau-/ockergelb | - | Wechsellagerung |
| | Sandstein | 2 | 45 | | hellgraugelb | Schalen, Steinkerne +/- komplett, zerdrückt | lagenweise toniger, karbonatischer Tonlagen (cm) |
| | Sandstein | 1 | >150 | Kies | hellgraugelb | Abdrücke, Steinkerne | |
| 1036 A | Biogenkalkstein | 3 | 10 | Schluff, FS | hellgraugelb | Muschelabdrücke, Steinkerne | keine |
| | Tonstein | 2 | 20 | | hellgelb | - | keine |
| | Schluffstein | 1 | 120 | Ton | weiß | wenige Muschelschalen | keine |
| | nicht aufgeschlossen | | 10 — 20 | | | | |
| 1036 B | Sandstein | 8 | 240 | Ooide, GS-FK-Lagen | hellgraugelb | wenige Muschelschalen | Lagen von GS/FK-Komponenten, verschiedene Kompetenzen |
| | Kalkstein | 7 | 12 | Sand | hellgrau | wenige Muschelschalen, zweiklappig | - |
| | Sandstein | 6 | 83 | FS, MS | hellgelbgrau | - | - |
| | Tonstein | 5 | 55 | Schluff | weißgelblich | eingeregelt Muschelabdrücke, Schalen gelöst | - |
| | Tonstein | 4 | 12 | Schluff, FS | sehr helles braun, gräulich | Muschelabdrücke, geplättet, dünne Lagen von eingeregelten Steinkernen | horizontal, fein laminiert |
| | Tonstein | 3 | 35 | Schluff | hellgrau, bräunlich, rötlich, gelblich | vereinzelt Muschelabdrücke | horizontal, fein laminiert, unterschiedliche Farben der Lagen |
| 1036 B | Tonstein | 2 | 40 | Schluff, FS | hellgelb-weiß | Muschelabdrücke | horizontal |
| | Biogenkalkstein | 1 | >5 | Ooide | hellgrau | Muschelsteinkerne, eingeregelt | keine |
| 1037 | karbon. Sandstein | | >50 | | hellgelb | - | homogen |
| | Biogenkalkstein | 8 | 130 | | hellgraubraun | Steinkerne, herausgewitterte Schalen, Schneckenschalen | oben sandiger, Biogene eingeregelt |
| | Sandstein | 7 | 10 | FS, MS, Schill | gelb, rötlich | Schill | homogen |
| | Tonstein | 6 | 2 — 3 | | weiß, hellgrau | - | leichte Schichtung, sonst homogen |
| | Tonkalkstein | 5 | 60 | | hellgrau | eingeregelt Schalen | geschichtet |
| | Biogenlage | 4 | 55 | | hellgrau | Steinkerne, Schalen | homogen |
| | Sandstein | 3 | 7 | FS | hellgelb | wenig Schill | homogen |
| | Schilllage | 2 | 18 | | hellgelbgrau | Schalenabdrücke, -reste | homogen |
| | Tonstein | 1 | > 80 | Schill | hellgrau | - | geschichtet |
| 1038 | Sandstein | 3 | > 750 | Kies | rötlich | - | bis 2m mächt. schräggeschichtete Partien, feiner/gröber; Kiesbänder |
| | Sandstein | 2 | 350 | FK, GK | rötlich | - | FK/GK-Lagen (10cm) |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Lithologie | Schicht- nummer | Mächtigkeit [cm] | Anteile | Farbe | Fossilführung | Schichtung |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------|----------------------|---|
| | Sandstein | 1 | > 250 | Kies, Steine | rötlich | - | Bereiche mit MK-Nestern u. groben Nestern; leicht horizontal |
| 1040 | Basalt | 1 | > 500 | | dunkelgrau, schwarz | - | homogen, dicht |

Leerseite

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|---|----------|---------------------------------|--|------------------------|----------------|
| 1009 K | verfestigt, massig, porös | + | | porös | 4423650 35S 0436787 | |
| | mäßig verfestigt | | | großes Korngrößenspektrum (bis Kies) | | |
| | unverfestigt fest, trocken | | | | | |
| 1009 J | mäßig verfestigt brüchig, stückig | + | | weiße, 4 — 5 cm große Kalkaggregate knollig eingeschaltet | | |
| 1009 I | plattig, feingeklüftet, hart mäßig verfestigt | + | | Konkretionen deutlich nach W mächtiger werdend, Größe bis 50 cm Länge, stark verfestigt zum Top toniger werdend, fining upward | | |
| 1009 H | unverfestigt | + | | | 4423801 35S 0436853 | 42 |
| 1009 G | locker, körnig, unverfestigt bröselig, trocken, unverfestigt schwach verfestigt mäßig verfestigt | + | | kleine weiße Kalkaggr., regellos ocker/mittelgraue Färbung wechselt kleine weiße Kalkaggreg., regellos verteilt Schalenbruchstücke zu einer Art gehörend, sehr artenarm | | |
| | mäßig verfestigt feinplattig, schwach verfestigt hart, splittrig, senkrechte Risse, stark verfestigt | + | | cm-mächtige Feinsand- und Tonlagen im unteren Teil Dentriten sichtbar | 4423789 0436848 | 35S 38 |
| | schwach verfestigt | + | | deutliche Lagen sichtbar; unteren 12 cm: ocker; obere 25 cm: hellgrau; nach oben fester (kompetenter) werdend | | |
| | schwach verfestigt unverfestigt | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | Schalen stark angelöst, porös; fining upward | | |
| 1009 F | mäßig verfestigt | + | | unterschiedliche Färbung im Profil (hellgelb bis ocker/braun) | 4423801 35S 0436846 | 36 |
| | mäßig verfestigt | + | | helle Kalkmineralisationen (Nester) im oberen Teil angehäuft | | |
| | schwach verfestigt stark verfestigt | + | | | | |
| 1009 E | hart, fein geklüftet, schwach verfestigt | + | | lateral uneben ausgebildet | 4423778 35S 0436783 | 38 |
| 1009 E | Top: stärker verfestigt, stärker geklüftet | + | | ockerfärbende Bänder eingeschaltet, lateral nicht durchgängig | | |
| | unverfestigt, locker | - | 200/30, 60/10, 35/18, 280/25 | von dünnen karbonatischen Gängen durchzogen -> unregelmäßig, durchschneiden Schrägschicht., sehr große Konkretionen (bis 2 m Länge) | 4423772 35S 0436793 | 36 |
| 1009 D | schwach verfestigt, Konkretionen | + | Uk: 358/2; Ok: 12/6 | bemoost, zum Aufnahmezeitpunkt trocken, Wasserstellen davor, ehemaliger Brunnen, stark angewittert, markante Konkretionen | 4422620 35S 0436803 | 34 |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|---|-----------|---|---|-------------------------|----------------|
| | verfestigt | + | Uk: 350/12; 348/10; 349/10 Ok: 347/2; 329/2 | | | |
| | schwach | + | Ok: Streichen 292/10; 275/10; 305/5 | vereinzelte Kalkkonkretionen enthalten | | |
| | verfestigt, dicht, hart | + | nach W | andere Fossilführung als A, B, C, vereinzelte Calcite | | |
| | schwach, weich, durchfeuchtet | + | | Ton knetbar, wasserführende Schicht, tw. bemoost, (Töpferton ?) | | |
| 1009 B | verfestigt | + | | oberer Bereich verdeckt | | |
| | schwach | + | | | | |
| | mäßig | + | | unteren 7 — 8 cm: Biogenlage, wenig Bruchstücke; oberen 12-13 cm: viel Schill; Top: Ton-Schluff-Lage | | |
| | schwach verfestigt, bröselig | - | | | | |
| | verfestigt | + | | geringe Artenvielfalt, wenige Schalenbruchstücke | | |
| | verfestigt | + | | | | |
| | sehr locker | + | | | | |
| | unverfestigt, in Lagen stark verfestigt | + | | Bereiche mit wenigen, kleineren Bruchstücken, Lagen mit mehr und größeren Schalenresten eingeschaltet | | |
| | verfestigt | + | | rundliche Aggregate (Ooide?) | | |
| | schwach, bröselig | + | | Körner mit rotbraunem Überzug (Fe-Oxid) | | |
| 1009 C | verfestigt, an Schwächezonen brechbar | + | | | | |
| | mäßig | + | | | | |
| | schwach verfestigt | + | | | | |
| | mäßig | + | | gleich Schicht 1 bei Profil 1009 B | | |
| | mäßig | + | | Ton-Sand-Wechselagerung (0,5 — 1 cm mächtig) | | |
| | mäßig | + | | | | |
| | schlecht verfestigt | + | | fining upward, unterer Teil durch Schutt verdeckt | | |
| 1009 A | schwach verfestigt, bröselig | + | | unten höherer Matrixanteil -> matrixgestützt, oben höherer Bruchstückanteil -> komponentengestützt | 4423826 35 S 0436774 | 29 |
| 1009 A | schwach, intern kompetentere Knollen | | | bankig, massig, Mächtigkeit schwankt stark, kompetentere Knollen | | |
| | mäßig | + | | Brauntöne ändern sich lateral | | |
| | verfestigt | +(Matrix) | | Schalen vollständig, tw. zerdrückt, sehr artenarm, tw. Schalen weggelöst -> Steinkerne | | |
| | mäßig | + | | unterer Bereich von Schutt überrollt | | |
| 1019 | kompetent, hart, Geländekante | + | | markant, bildet Geländekante aus, Stromatolith | 4424251 35S 0439948 | 56 |
| | stückig, bröckelig, mäßig verfestigt | + | | Topbereich: in hellgrauen Tonstein übergehend | | |
| | kompetent | + | | -> sehr markant, Algenlagen, Stromatolith | | |
| | schwach verfestigt, locker, körnig | - | | Top: Verockerung, Schichtungen erkennbar | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|----------|-------------------------------|---|-------------|----------------|
| | hart, kompetent, Geländekante | + | | an der Basis: der Tonstein (112) aufgearbeitet von dieser Schicht | | |
| | schwach verfestigt, locker, körnig schwach verfestigt | - | | am Top: aufgearbeitet, mit Schicht 113 vermischt Basis: nach oben gröber bis FK; Mitte: homogen, Parallelschicht.; Top: bis FK, oben gröber bis reiner MS/GS ohne Matrix | | |
| | mäßig verfestigt | - | | | | |
| | locker, körnig, schwach verfestigt | - | | | | |
| | mäßig verfestigt | T: - S:+ | | Ton evt. als Bodenbildungen, Tonlagen nach oben mächtiger | | |
| | kompetent, hart | | | helle Tonlage (2 cm) zum Top mächtiger | | |
| | plattig, bröselig, mäßig verfestigt | - | | | | |
| | tw. porös, mäßig verfestigt | + | | große sichtbare Porosität | | |
| | plattig, mäßig verfestigt | | | | | |
| | über slumpings kompetenter, sonst mäßig verfestigt | + | | über slumpings festere, knolligere Ausbildung, sonst eher plattig ausgebildet | | |
| | plattig, bröselig, mäßig verfestigt | - | | stark schwankende Mächtigkeit | | |
| | mäßig verfestigt | - | | oben toniger, ockergefärbt; Komponenten regellos, slumpings, load casts | | |
| | stark verfestigt | + | | channel-Bildungen, keine Schichtung in der Rinne, Komponenten: Sedimentite, Quarze, Basalte | 4423965 | |
| | mäßig verfestigt | | | aufgearbeitet, Tonbrocken, matrixgestützt, mehr Sandstein (100) eingearbeitet | 35S 0439841 | |
| | kompetent, stark verfestigt | | Unterkante: 295/05; 302/05 | | | |
| | trocken,mäßig verfestigt, geklüftet (Ton) | | | MS-Lage unterschiedlich mächtig, im mittleren Bereich Schicht "verrutscht" | | |
| | locker, körnig | | | alle Korngrößen vorhanden, fining upward | | |
| | plattig, geklüftet, schwach verfestigt | | | | | |
| | mäßig verfestigt | - | | | | |
| | brüchig, plattig, geklüftet | - | | | | |
| | mäßig verfestigt | | | | | |
| | schwach verfestigt, plattig, geklüftet | | | von dünnem Sandlagen (-adern) durchzogen | | |
| | mäßig verfestigt | | | coarsening upward erkennbar | | |
| 1019 | schwach verfestigt, plattig, geklüftet | +/- | | Schichten 97 bis 89 —> Wechsellagerung | | |
| | fest, geklüftet | - | | leicht feucht, erdiger Geruch | | |
| | Basis: kompetent, Top: schwächer verfestigt | + | | in dünnen Lagen stärker verwittert, sandig = kompetent, Oberfläche wellig | | |
| | inkompetente/ kompetente Lagen | | | kompetente Lage (sandiger) als Geländekante hervorstehend | | |
| | stark verfestigt, kompetent, hart | + | | Schneckenhäuser tw. rekristallisiert, Top: dünne rekristallisierte, karbonatische Äderchen (mm-Bereich), Top: weniger Komponenten | | |
| | schwach verfestigt, körnig | | | eingeschnitten in die Schichten 83, 82, 81, tw. leicht abgesenkt, unten ocker, oben hell | | |
| | kompetent, stark verfestigt | + | | | | |
| | inkompetente/ kompetente Lagen | | | Wechsellagerung, unterschiedliche Kompetenzen in Lagen | | |
| | kompetent, massiv | + | | geschichtete FS-Lage an der Basis | | |
| | inkompetent | + | | | | |
| | inkompetent | + | | grünlich, bräunliche Partien | | |
| | schwach verfestigt | + | | | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfällen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|---|----------|-------------------------------|--|-----------|----------------|
| | komp., massiv, splitterig, Geländestufe bildend | + | | in Lagen wellig, knotig, einzeln hervorstehende Nasen bildend, Wechsel zwischen biogenarmen und -reichen Schichten | | |
| | schwach verfestigt | | | | | |
| | massig, kompetent | + | | markante wellige Unterkante | | |
| | inkompetent | + | | Schill in Lagen eingeregelt | | |
| | in Lagen kompetenter | + | | Wechsel in der Verfestigung innerhalb der Schicht | | |
| | inkompetent | + | | | | |
| | stark verfestigt | + | | wellige Oberfläche | | |
| | schwach verfestigt | + | | Biogenreste in Lagen, diagenetisch zerdückt | | |
| | inkompetente/ kompetente Lagen | + | | dünnes gelbes Band (mm-Bereich) | | |
| | mäßig verfestigt | - | | zum Top mehr Schalenreste | | |
| | mäßig verfestigt | | | Wechselagerung im cm-Bereich | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | kompetent mit inkompetenten Zwischenlage | + | | ganze Schicht besteht nur aus Steinkernen, Matrix nicht erkennbar | | |
| | schwach verfestigt | + | | Anteil der Fossilführung wechselt | | |
| | stark verfestigt | + | Unterkante: 260/10; 272/10 | | | |
| | schwach verfestigt | - | | Schrägschichtung, Veränderung der Korngrößen, vereinzelt fining upard erkennbar | | |
| | mäßig verfestigt | + | | im Sandstein Schalenbruchstücke enthalten | | |
| | mäßig verfestigt | | | load casts sichtbar, FS/MS/GS-Bänder (bis 10 cm mächtig) | | |
| 1019 | mäßig verfestigt | + | | gesamte Schicht laminiert (Ton-/Sandwechsel) | | |
| | mäßig verfestigt | + | | Schicht laminiert | | |
| | brüchig, stückig, mäßig verfestigt | | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | splittrig, hart, kompetent | | | | | |
| | kompetent, stark verfestigt | + | | load casts-Bildung, senkt sich in untere Schicht (53) ab | | |
| | feinstückig, mäßig verfestigt | + | | stark schwankende Mächtigkeit | | |
| | mäßig verfestigt | + | | load casts-Bildung, deutlich in die untere Schicht eingesunken | | |
| | klüftig, bröckelig, mäßig verfestigt | + | | im Topbereich: kleine Kalkkomponenten | | |
| | mäßig verfestigt | | | grünlich, bräunlicher Übergang in der Schicht | | |
| | mäßig verfestigt | + | | Calcit | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | schäumt wenig, zögend, kleine weiße Kalkmineralisationen dispers verteilt | | |
| | plattig, geklüftet, mäßig verfestigt | + | | | | |
| | kompetent | + | | Basis deutlich mehr Schalenbruchstücke | | |
| | inkompetent | + | | | | |
| | kompetent | + | | Oberfläche wellig, uneben | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|----------|--------------------------------------|---|-----------|----------------|
| | tw. stark geklüftet, sonst kompetent | + | | salzig schmeckend, zum Top geringerer Salzgehalt, einzelne verhärtete Lagen | | |
| | verfestigt, Geländekante ausbildend | | Einfallen: 290/00; 246/05; 264/03 | Wechselagerung von kompetenten hellen Tonlagen und zerklüfteten dunkelgrauen Tonsteinen | | |
| | mäßig verfestigt | + | | Basis: verockert, Gipshäutchen deutlich sichtbar zwischen einzelnen Lagen | | |
| | mäßig verfestigt | | | | | |
| | geklüftet, blockig, mäßig verfestigt | | | bis zu 10 cm breite Klüfte | | |
| | geklüftet, blockig, mäßig verfestigt | | | Gipshäutchen | | |
| | stark geklüftet, mäßig verfestigt | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | obersten 3 — 5 cm ockergefärbt, stärker verfestigt | | |
| | geklüftet, Top: stärker verfestigt | | | Kluffflächen verockert | | |
| | | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | schwach verfestigt, körnig | + | | Schalenbruchstücke in Lagen angereichert | | |
| | locker, körnig, schwach verfestigt | | | | | |
| | sehr bröckelig, mäßig verfestigt | + | | zwischen den Tonlagen mm-mächtige Ton-Gips-Lagen gelagert | | |
| | schwach verfestigt | | | gräbt sich ein, abgesenkt, bildet Störungen aus, verfüllt, +/- horizontal | | |
| | feinplattig, trocken | | | | | |
| 1019 | kompetent, bildet deutlichen Geländevorsprung aus | + | Einfallen: 238/01; 299/10; 260/05 | fossilreiche Lage verhärtet | | |
| | gering verfestigt | + | | | | |
| | verfestigt, Geländekante | + | | an der Oberseite Fossilpflaster | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | unterschiedliche Korngrößen, fining upward | | |
| | mäßig verfestigt | | | | | |
| | sehr locker, schwach verfestigt | + | | | | |
| | plattig, brüchig, mäßig verfestigt | + | | an der Bruchkante Calcit | | |
| | verfestigt, stark geklüftet | + | | | | |
| | schwach verfestigt | - | | Wechselagerung | | |
| | sehr locker, schwach verfestigt | + | | in Lagen erhöhten Sand-, Tonanteil | | |
| | schwach verfestigt | | | slumping-Bildungen, Mächtigkeit schwankt | | |
| | schwach verfestigt | | | starke Schwankungen der Mächtigkeit | | |
| | mäßig verfestigt | | | slumping-Bildungen | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | channel-Bildungen, sehr unterschiedliche Mächtigkeit, Steinkernlage | | |
| | mäßig verfestigt | | | fining upward | | |
| | | | Einfallen: 238/05; 272/05; 252/02 | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | blockig, verfestigt | + | | | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|------------|--|---|--------------------------|----------------|
| | blockig, mäßig verfestigt | + | | | | |
| 1020 | kompetent, stark geklüftet | + | | Algenmatten, platzt schalig ab, stark verwittet, porös | 4423339 35S 0439619 | 121 |
| | klüftig, hart, mäßig verfestigt | + | | dispers verteilt kleine weiße Kalkmineralisationen | | |
| 1021 | locker, körnig, schwach verfestigt, Lagen verhärtet | + | | Ton schäumt nur auf Schichtflächen, einzelne Abschnitte härter und karbonatischer, viele Windkanter | 4421915 35S 0439742 | 101 |
| | locker, körnig, einzelne Lagen härter | + | | großes Korngrößenspektrum, Windkanter | | |
| | kompetent, bildet Geländekante | + | | läuft mit 8/1021 südlich zusammen, bildet eine Schicht | | |
| | schwach, locker, körnig | + | | nach S in stückigen, homogenen Tonstein übergehend, auslaufend | | |
| | | + | | beginnende Bodenbildung | | |
| | schwach verfestigt, Lagen kompetenter | + | | unregelmäßiger Wechsel von Ton und Kalkstein, Tonstein schäumt auf Klufflächen | | |
| 1021 | kompetent, hart | + | | wolkige, ungleichmäßige Färbung, einzelne Partien: als homogener Tonstein ausgebildet | | |
| | feingeklüftet, Kluftabstand 0,5 — 1 cm, kompetent | + | | stark durchwurzelt, karbonatische Kluftfüllungen | | |
| | porös, stark verfestigt | + | | Algenmatten? Wechsellagerung mehrerer Kalkschichten, stark verwittert | | |
| | bröselig, feingeklüftet, mäßig verfestigt | + | | | | |
| | kompetent, hart, Geländekante | + | | stark verwittert | | |
| | feinklüftig, schwach verfestigt | + | | graugrüne Einschaltungen, Verwitterungserscheinungen | | |
| 1022 | bröckelig, stark verfestigt | + | | Oolith, sehr porös | 4423705 35S 0439972 | 110 |
| | schwach verfestigt, klüftig | | | | | |
| 1023 H | kompetent, splittiger Bruch, bildet größeren Geländevorsprung | + | Einfallen Oberkante: 151/05; 142/03; Unterkante: 55/05; 245/02; 55/12; 295/03; 204/10 | Übergang zu 23/1023 H blättrig, plattig, mögliche slumping-Struktur | 4423965 35S 0439856 ? | |
| | schwach verfestigt, locker | +/- | | Ton leicht karbonatisch, Tonlagen werden nach oben geringmächtiger | | |
| | kompetent, Geländekante, senkr. Klüfte (8 — 10 cm Abstand) | + | Einfallen Oberkante: 78/05; 260/04; Unterkante: 338/05; 303/04; 150/10 | möglich: zwei unterschiedl. Ablagerungen ineinander verzahnt, load casts | | |
| | Sand: schwach verfestigt; Ton: geklüftet | T: +; S: - | | Schichten schneiden sich gegenseitig, Tonsteinlagen mit Schill | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|-----------------------|--|---|-----------|----------------|
| | kompetent, splittrig, Geländekante bildend | + | Einfallen Oberkante: 235/05; 135/04; 220/03; Unterseite: 218/05; 208/10; 222/05; 212/00; 315/10; | Unter- und Oberkante leicht wellig | | |
| | stark geklüftet, stark verfestigt | S: +; T: +/- | | Ton schäumt auf Klüften, zum Top toniger, tw. Ton von oben in Sand eingesunken | | |
| | schwach verfestigt, locker kompetent | - + | | wellige Oberfläche, coarsening upward | | |
| 1023 H | inkompetent kompetent, Geländekante ausbildend inkompetent stark verfestigt splittrig, Geländekante bildend | + + + + | | Schalenbruchstücke gerundet, wellige Oberfläche | | |
| | in Lagen kompetent, sonst mäßig verfestigt | + | Einfallen Unterseite: 255/05; 240/10; 250/15 | | | |
| | stärker verfestigt als 10/1023 H | + | | | | |
| | sehr schwach verfestigt mäßig verfestigt. | - + | | Gipskristalle in Hohlräumen markante Klüfte, rundliche Außenkanten | | |
| | kompetent, Terasse bildend inkompetent | + + | Kluftflächen: (planar) 336/85; 008/70 | | | |
| | kompetent, bildet Vorsprung mäßig verfestigt inkompetent stark geklüftet, mäßig verfestigt Tonstein: schwach verfestigt, stark geklüftet, Sandstein: stärker verfestigt mäßig verfestigt | + + + - + | | Top und Basis weniger kompetent, plattig abplatzend an der Basis Ockerfärbung, Gipshäutchen zwischen den Schichten, gr. Gipskristalle an der Außenseite | | |
| 1023 G | mäßig verfestigt | + | Einfallen: 208/05 | dünne Störungen ziehen durch Schicht, tw. keilen Schichten aus, Ton: Gipshäutchen und rote Sandlagen eingeschaltet | | |
| | massiv, kompetent stark geklüftet, stark verfestigt | + + | | wenige, breite Klüfte durchziehen die Schicht | | |
| | schwach verfestigt, locker stark geklüftet, inkompetent, Mitte: stärker verfestigt kompetent | - + + | | ocker gefärbte Tonlage Gipskrusten auf Kluftflächen, schäumt zögernd | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] | |
|----------------------|--|----------|--|---|------------------------|----------------|--|
| | mäßig verfestigt | + | | dunklerer Schluff schäumt mit HCl mit Verzögerung | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | Tonsteinlagen mächtiger als Sandstein, zum Top alle Lagen fossilreicher schäumt mit HCl langsam, als Pulver schneller reagierend Schilllage eingeschaltet, Gips an den Tonlagen | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | | |
| | mäßig verfestigt | - | | | | | |
| 1023 A | komp. Geländekante bildend | + | Einfallen: 260/15; 275/15; 280/05; Uk: 130/10; 140/10; 158/05; 190/05; 330/10; 130/05; 225/03 | wellig, knollige Oberfläche | 4423868 35S 0439895 | 102 | |
| | kompetent , Tonstein schwach verfestigt | + | Einfallen: 262/10; 285/15; 310/00 | mächtigere Kalkbänke, dünne Tonsteinlagen | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | Oberseite wellig von Schalenpflaster rundliche Hohlräume von weggelösten Biogene | | | |
| | mäßig verfestigt | + | Einfallen: 210/00 | | | | |
| | kompetent | + | | Top: schluffiger werdend, eingeregelt Schalenreste Muschelpflaster | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | | |
| | horizontal geklüftet, mäßig verfestigt | + | Einfallen: 210/10; 275/00 | | | | |
| | unverfestigt, locker | + | | von gelb gefärbten Bändern durchzogen | | | |
| 1023 F | kompetent, bildet deutliche Terasse aus | + | | | | | |
| | inkompetent | + | | 30 — 40 cm im Topbereich: schalenreich, einige Lagen komplett fossilfrei | | | |
| | mäßig verfestigt grob, körnig, mäßig verfestigt | + | | Tonschicht wellig, uneben; Sandschicht mit vielen Schalen | | | |
| 1023 E | schwach verfestigt, locker | + | | sehr inhomogen | | | |
| | kompetent, bildet Geländekante aus verfestigt, kaum geklüftet mäßig verfestigt, fein geklüftet | + | | schäumt wenig, an der Basis Karbonatanreicherung | | | |
| | | + | | | | | |
| | | + | | | | | |
| 1023 D | kompetent, bildet Geländekante | + | Einfallen Oberkante: bildet Terrassen aus, Unter- und Oberkante sehr wellig, uneben 225/07;325/05;310/0 0 Einfallen Unterkante: 005/05; 230/04; 190/05 | | | | |
| 1023 C | inkompetent, bröckelig locker, körnig, schwach verfestigt | + | | | | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|-------------|---|---|------------------------|----------------|
| 1023 B | inkompetent | + | | Schalenbruchstücke teilweise angelöst, meist gerundet | 4424156 35S 0439976 | 49 |
| 1024 B | schwach verfestigt, Klüfte versinterte Kruste, sehr hart, splittrig, kompetent | + | Einfallen Unterkante: 310/00; 255/03; 305/11, 295/05; 290/05 | versinterte Kruste (cm breit), Schalen weggelöst | | 70 |
| | inkompetent | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | mäßig verfestigt | + | Kluftfläche: 285/85, 282/80, 290/90; 289/87; 287/90; 285/80 (planar) | | | |
| | mäßig verfestigt | - | | karbonatische Kluftfüllung, kleinere Tonfetzen im Sandstein; Tonstein wirkt aufgearbeitet | | |
| | kompetent, Vorsprung ausbildend | + | Einfallen Unterkante: 220/05; 230/10; 208/03; 202/00 | | | |
| | mäßig verfestigt | T: +/-; S:- | | Gipsausscheidungen, Ton wirkt im Topbereich aufgearbeitet | | |
| 1024 A | mäßig verfestigt | + | | Schalen tw. angelöst, porös; je größer die Komponenten, desto besser gerundet | 4424370 35S 0440082 | 50 |
| | kompetent | + | | mittlerer Tonstein unten wellig, Sandstein oben gelblich | | |
| | Tonstein: plattig, schwach verfestigt; Sandstein stärker verfestigt | + | | Wechselagerung im cm-Bereich | | |
| | locker, schwach verfestigt | + | | Schicht keilt seitlich aus | | |
| | mäßig verfestigt | + | | schlecht aufgeschlossen, Tonstein mit deutlichem Schluffanteil | | |
| | wenig verfestigt | + | | porös | | |
| | locker, schwach verfestigt | + | | an der Oberfläche herausgewitterte Hohlräume, dadurch wellige Oberfläche | | |
| | inkompetent | + | Einfallen : 195/02; 125/10; 180/00; 250/02; 255/02; 275/03 | | | |
| | stark verfestigt, Geländekante bildend | + | Einfallen Oberkante: 205/10; 220/03; 220/05 | zahlreiche Schneckenhäuser, diese Schichten stark verfestigt, dünne Tonlage in der Mitte | | |
| | unterschiedliche Verfestigung, mehrere stärker verfestigte Schichten | + | Einfallen: 291/00; 285/01; 250/01; 140/05, 325/01; 35/03; 240/00 | tw. rötliche FS-Lagen, Karbonatschichten keilen tw. aus, sind stark verfestigt | | |
| 1024 A | locker, schwach verfestigt | + | | | | |
| | kompetent | + | | | | |
| | schwach geklüftet, mäßig verfestigt | + | | obere 3 — 5 cm grünlich gefärbt | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|----------|---|--|------------------------|----------------|
| | inkompetent | + | | einige Schichten eisenrot, dünn, kompetenter | | |
| 1026 B | mäßig verfestigt | | | einspricht: 1023 A 7 | | |
| | mäßig verfestigt | + | | einspricht: 1023 A 6 | | 80-85 |
| | mäßig verfestigt | + | Einfallen Unterkante: 10/01; 18/03; 192/03; 225/02 | einspricht: 1023 A 5 | | |
| | mäßig verfestigt | + | Einfallen: 65/10; 255/05; 230/10; 220/00; 32/05 | einspricht: 1023 A 4 | | |
| | mäßig verfestigt | + | | einspricht: 1023 A 3 | | |
| | mäßig verfestigt | + | | einspricht: 1023 A 2 | | |
| | schlecht aufgeschlossen | | | einspricht: 1023 A 1 | | |
| 1026 A | kompetent Vorsprung ausbildend | + | Einfallen: 260/01; 278/02; 270/10; 288/05; 264/10; 300/00 | unterschiedl. Mächtigkeit, Hohlräume -> Markerhorizont; Hohlräume tw. mit Kristallen gefüllt | 4424127 35S 0440929 | 47 |
| | mäßig verfestigt | | | unregelmäßig einzelne Lagen verhärtet | | |
| | kompetent, Vorsprung ausbildend; einzelne schwächer verfestigte Lagen | + | | wellige Oberfläche, Terasse bildend, größere Hohlräume entstanden | | |
| | kompetent, bildet Vorsprung aus | + | Einfallen Oberkante: 118/05; 115/05; 190/12; Unterkante: 134/05; 90/05; 145/00; 156/05 | | | |
| | inkompetent | - | | feucht, bemoost, wasserführend | | |
| | stark verfestigt, bildet Vorsprung aus | - | | trocken | | |
| | locker, schwach verfestigt | - | | feucht, bemoost, wasserführend | | |
| 1027 | stark verfestigt | + | | | 4424350 35S 0440523 | 57/58 |
| | inkompetent | + | | | | |
| | kompetent | + | | | | |
| | Wechsel: stärker und schwächer verfestigten Lagen | | | schlecht aufgeschlossen | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| 1027 | kompetent | + | | Schichten 1027 1-5 bilden runden Trog, channel | | |
| | inkompetent | - | | obere 5 cm schillreich, sonst eher schillarm | | |
| | kompetent | + | | Mitte ohne Schill | | |
| | mäßig verfestigt | - | | | | |
| | schwach verfestigt | + | | | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|--------------|---|--|------------------------|----------------|
| 1028 | kompetent | | | wellige unebene Oberfläche | 4423833 35S 0439311 | 67 |
| | Wechsel zwischen schwach und stärker verfestigten Lagen | + | Einfallen Oberkante; komp. Lage: 233/02; 275/03; 298/02; 311/04; 282/08; 292/10; 288/04 | Wechselagerung aus inkompetenten, sandigen Lagen mit kompetenten, fossilführenden Lagen | | |
| | mäßig verfestigt | + | | ooidführend | | |
| | inkompetent | - | | Gipsausblühungen, stark ausgewaschene Schicht | | |
| | kompetent | + | | Top: stromatolithenartige Strukturen, sehr markant | | |
| | Wechsel zwischen schwach und stärker verfestigten Lagen | + | Einfallen Oberkante: 189/03; 342/05; 294/02; 243/00; 267/02; 331/05; 228/02; 035/02; 354/03; 347/02; 290/02; 255/05 | | | |
| | stark zerklüftet, mäßig verfestigt | + | | bemoost, stark verwittert | | |
| | schwach verfestigt | | | | | |
| | stark verfestigt | + | | Top: dicht gedrängte Schalen, zerbrochen, nicht eingeregelt, in Lebendstellung eingebettet | | |
| | kaum geklüftet, mäßig verfestigt | + | Eionfallen Oberkante: 145/05; 292/05; 287/03; 120/07; 355/02; 327/01; 003/00; 345/01; 315/00; 135/00 | | | |
| | inkompetent | S:+ ;T: - | | eher Sandstein mit Tonbändern | | |
| 1029 | stark verfestigt | | | | 4424103 35S 0439001 | 55 |
| | Wechsel zwischen schwach und stärker verfestigten Lagen | + | | dünnen Lagen ooidführend | | |
| 1029 | kompetent | + | | | | |
| | inkompetent | S: +/-; T: - | | Tonlagen mit Pflanzenhäcksel | | |
| | komp., bildet Vorsprung aus | + | | Stromatolith | | |
| | inkompetent | + | | Ton schäumt nur zögernd | | |
| | komp., bildet Vorsprung aus | + | | | | |
| | inkompetent | - | | | | |
| | inkompetent | + | | | | |
| | inkompetent | - | | | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|-----------------------------|----------|---|--|-------------------------|----------------|
| | komp., bildet Vorsprung aus | + | Kluftflächen: 130/75; 135/90; 130/85; 115/80; 115/90; 122/90; 212/75; 220/90; 220/85; 215/90; 222/90; 221/85; 219/87; 227/80; 37/87 Einfallen Unterkante: 130/05; 302/07; 90/00; 270/07; 255/03; 250/03; 275/01; 211/03; 22/01; 180/00; 218/05 | lateral starke Schwankungen der Mächtigkeit | | |
| | inkompetent | +/- | | | | |
| | kompetent | + | | Unterseite wellig, am Top häufiger Schill | | |
| | mäßig verfestigt | + | | | | |
| | kompetent | - | | im Topbereich verockert, Aufarbeitung des Tonsteins 1029/5 | | |
| | mäßig verfestigt | + | Kluftflächen: 182/80; 190/80 111/82; 90/85 | Calcit | | |
| | inkomp., stark geklüftet | - | | | | |
| | komp., trocken | T:-; S:+ | | Tonstein: Calcit | | |
| | inkomp. | + | | schäumt mit HCL angeritzt besser, dolomitisch | | |
| 1030 | inkompetent | | | tw. verhärtet | 4424039 35 S 0438549 | 58 |
| | komp. | + | | | | |
| | komp. | + | | | | |
| | schwach verfestigt | + | | feucht, porös, schäumt nur zögernd | | |
| | schwach verfestigt | + | | feucht, locker, knetbar | | |
| 1030 | schwach verfestigt | - | | Moos tw. nur an der Schichtgrenze | | |
| | inkompetent | +/- | | leicht bemoost | | |
| 1033 | stark verfestigt | + | | markanter Stromatolith | 4424000 35S 0438262 | 50 |
| | inkompetent | + | | z. T. channelartig, lagenweise gröber | | |
| | kompetent | + | | | | |
| | inkompetent | + | | | | |
| | schwach verfestigt | + | | Abbauspuren (anthropogen) | | |
| | schwach verfestigt | +/- | | | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfallen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|---|-----------------------|---|---|-----------|----------------|
| | kompetent | + | Einfallen: 150/20; 145/22; 115/15; 330/09; 109/08; 168/15; 158/14 Kluftfläche: 108/86; 112/82; 110/78; 106/82; 111/79; 104/85; 42/88; 198/88; 50/85; 205/90; 25/90 | Top: verockert, Stromolith | | |
| | schwach verfestigt schwach verfestigt | + T:-; S:+ | Kluftflächen: 171/87; 169/86; 170/90 | fossilfreie Tonsteine zwischengeschaltet, Top: sandig | | |
| | Wechsel von schwächer und stärker verfestigten Lagen inkompetent | + - | Kuftflächen (planar): 112/90; 110/85; 75/90; 75/85; 76/85; 75/90; 357/90; 155/80; 173/90; 0/90; 180/90 | Karbonatbänder senkrecht zur Schichtung verlaufend, mehrere kompetente channel-Bildungen eingeschaltet | | |
| | kompetent kompetent schwach verfestigt | + + + | | Tonmatrix grünlich, feinere Lagen enthalten weniger Schill Tonband eingeschaltet, wellige Übergänge im mittlern Bereich dunkler gefärbt | | |
| 1035 | kompetent, hart, splittrig inkompetent mäßig verfestigt kompetent, splittriger Bruch | + + + | Einfallen: 67/02, 129/03, 265/03, 52/05, 81/02 | homogen, plattig nach oben toniger werdend, Moosbewuchs in Hohlräumen Kristallisationen, Moosbewuchs | | |
| 1035 | inkompetent kompetent (Stufe) | + + | Einfallen Unterkante: 75/05, 52/08, 89/03, 62/02, 55/02, 36/02 | | | |
| | mäßig verfestigt inkompetent mäßig verfestigt inkompetent inkompetent stark verfestigt | + + + + + | Kluftflächen: 136/87, 123/85, 140/90, 311/87, 315/87 Einfallen: 310/18 | homogen, nach oben sandiger kleine Stromatolithen, gut ausgebildet | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfällen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|---|----------|--|--|--|----------------|
| | mäßig verfestigt | + | | herausgewitterte Ooide erhöhen Porosität | | |
| | mäßig verfestigt | | | Ton feinblättrig, dünne Lagen | | |
| | stark verfestigt | + | | Schillsandstein | | |
| | schwach verfestigt | + | | +/- homogen, nach oben toniger, grüner Tonstein | | |
| 1036 A | schwach kompaktiert | + | | Steinkerne eingeregelt, Lösungshohlräume | Höhleneingan g: 4423345 35S 434750 | |
| | keine | + | | homogen | | |
| | keine | + | | homogen | | |
| 1036 B | tw. kompetent, tw. inkompetent; Klüftung: 111/01, 299/04, 110/03, 105/02 | + | 225/01, 113/01, 145/09, 161/10, 181/07, 110/05, 161/03, 179/08, 110/02, 346/07 | unterschiedliche Anteile von Ooiden | | |
| | kompetent, verfestigt, bildet Vorsprung | + | 138/08, 334/09, 112/05, 340/02, 111/10, 258/02, 205/09 | wellige Unter- und Oberkanten | | |
| | locker, körnig | + | | homogen, am Übergang zu darunterliegender Schicht: Moos | | |
| | relativ fest | + | 80/05 | | | |
| | leicht, geklüftet | + | | verwittert weiß an der Obeffläche | | |
| | leicht, geklüftet | + | | teilt sich im Inneren der Höhle in 2 Teilschichten auf: 3a und 3b, getrennt von Schicht 4 | | |
| | | + | | | | |
| 1036 B | verfestigt | + | | Ooide bis 1 mm | | |
| 1037 | inkompetent | + | | | 4423791 35 S 0437743 | 43 |
| | kompetent, Geländestufe | + | | versintert, unten bemoost; coarsening upward, Erhöhung der Porosität durch herausgelöste Schalen | | |
| | mäßig verfestigt | + | | nass, bemoost, schlammig, Basis rötlicher | | |
| | mäßig verfestigt | | | nass, schlammig | | |
| | mäßig verfestigt | + | | feucht, leicht bemoost | | |
| | stark verfestigt | + | | feucht, weniger bemoost | | |
| | schwach verfestigt | + | | Wasser tropft heraus, Moos | | |
| | stark verfestigt | + | | Moos, feucht | | |
| | stark verfestigt | | | Moos, feucht | | |
| 1038 | mäßig verfestigt | | | channel-Bildungen mit Internsortierung, Sand/Kieskörper arbeiten sich gegenseitig auf, schneiden sich; ähnl. Schicht 1038/1; rötliche Färbung durch Eisenoxide | 4424859 35S 0441039 | 31 |
| | hart, körnig, stark verfestigt | - | | kiesig, oben sandiger werdend, Oberkante: Einsenkungen, aufgearbeitet durch überlagernden Kies; rötliche Färbung durch Eisenoxide | | |

Anhang 1

| Aufschluß- nummer | Verfestigung | Karbonat | Einfällen | Merkmale | GPS-Daten | Höhe [müNN] |
|----------------------|--|----------|-----------|---|-----------|----------------|
| 1040 | mäßig verfestigt | + | | in Lagen feiner werdend; Matrix sandig; rötliche Färbung durch Eisenoxide | | |
| | sehr kompetent, morphologische Höhen bildend | | | in Hohlräumen Kristallisation von Kalken, in der Grundmasse neugesproßte Minerale erkennbar | | |

Leerseite



Abb. 2.1: 1019-6

Karbonatischer Sandstein:

Dichter, hellgelber Feinsandstein mit karbonatischer Matrix. Im Gelände stellte sich die Schicht als channel-Ablagerung dar, mit deutlich schwankenden Mächtigkeiten. Die Matrix besteht aus schluffig-tonigem Material.

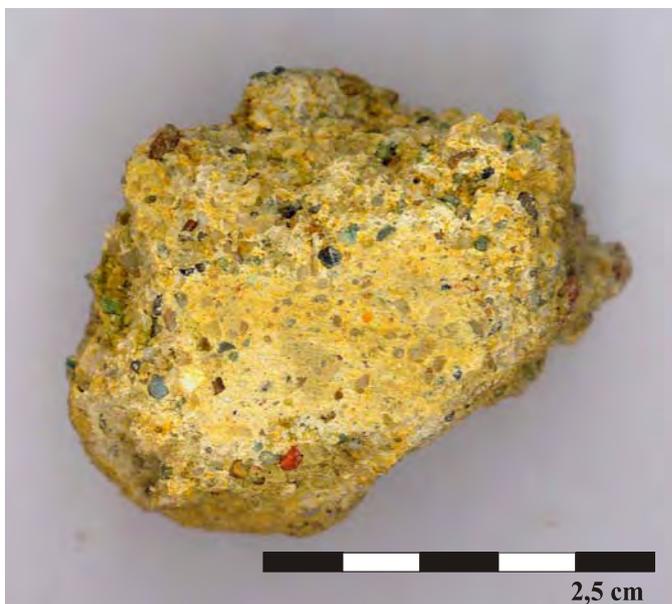


Abb. 2.2: 1019-16

Karbonatischer Sandstein:

Das Gestein ist schwach verfestigt und zeigt ein großes Korngrößenspektrum vom Ton, als Bindemittel, bis zum Feinkies. Besonders ist das im Gelände deutlich zu erkennende fining upward.



Abb. 2.3: 1019-42

Salziger karbonatischer Tonstein:

Der Tonstein enthält in Lagen eingeregelt zerbrochene Schalenreste und eingeschaltete hellgraue Schluffbänder. In Gelände war ein eindeutig salziger Geschmack des Gesteins festzustellen.



Abb. 2.4: 1019-87

Karbonatischer Sandstein:

Der Sandstein ist feingeschichtet. Das Gestein enthält Mikrofossilien, die im Gelände und im Anschnitt nicht zu erkennen sind. Die Schicht ist homogen, zeigt im Profil aber eine deutliche Änderung der Kompetenz und der Oberflächenstruktur.



Abb: 2.5: 1019-97/89

Wechselagerung zwischen karbonatische Sandsteinen und Mergeln:

Das Handstück zeigt eine Probe aus einem karbonatischen hellgelbbraunen Sandsteinschicht in der Wechselagerung. Die Wechselagerung besteht aus mehreren Ton- und Sandsteinen mit unterschiedlichem Verfestigungsgrad.



Abb. 2.6: 1019-103

Kalkstein:

Dieser Kalkstein zeigt markante, wellig-knollig ausgebildete Oberflächenstrukturen. Diese wolkigen Ausbildungen standen hauptsächlich über slumping-Bildungen des unterlagernden Sandsteines an.



Abb. 2.7: 1019-105

Oolithischer Kalkstein:

Das Gestein ist homogen, feinkörnig und kompetent ausgebildet. Im Gelände und im Probenanschnitt ist das oolithische Gefüge des Gestein nicht zu erkennen. 1-2 cm mächtige tonige Bänder ziehen sich durch das Handstück.



Abb. 2.8: 1019-115

Stromatolithenkalk:

Deutlich sichtbar ist das laminare Gefüge des Handstücks. Die einzelnen Lagen sind aufgebaut aus feinkörnigen Karbonatschlämmen und größerem karbonatischem Material.



Abb. 2.9: 1019-115

Stromatolithenkalk:

Im Bild sind deutlich die in Lagen angeordneten Hohlräume sichtbar. Gut zu erkennen ist die unregelmäßige Schichtung und teilweise unterschiedliche Färbung. Diese Hohlräume entstehen durch die Verwesung der Algen die den Stromatolith aufbauten.



Abb. 2.10: 1019-117

Kalkstein:

Im Handstück zeigt Fein- bis Grobsandkomponenten in einer karbonatischen Grundmasse. Im Profil bildete diese Schicht eine Geländekante aus.



Abb. 2.11: 1022

Kalkstein:

Das Handstück zeigt ein karbonatisches, feinförniges, dichtes Gestein in dem vereinzelt Ooide und Schalereste auftreten. Auffällig ist die mit bloßem Auge sichtbare hohe Porosität durch Lösungshohlräume und chanel.



Abb. 2.12: 1023

Wechselagerung zwischen nicht karbonatischem Sandstein und Mergel: Das Bild zeigt einen dichten hellbraunen Mergel mit einem lockeren Sandstein. Der Mergel bildet eine deutlichen Schichtung aus, die unregelmäßig ausgebildet ist. In einzelnen Lagen sind weiße Schalenreste eingeregelt.



Abb. 2.13: 1024

Versintenter Biogenkalk:

Im Gelände war diese Schicht mit mehrere cm mächtigen Sinterbildungen überzogen. Das Gestein ist lagenweise härter und bricht splittrig, möglicherweise sind diese Lagen versintert. Die enthaltenden Biogene sind eingeregelt.



Abb. 2.14: 1026-2

Kalkstein:

Dieses Gestein besteht aus dünnen Schalenresten in einer dichte, feinkörnigen Grundmasse. Das Handstück stammt aus einem Profil mit natürlichem Wasseraustritt und stellt eine trockene Lage zwischen zwei im Gelände feuchten und bemoosten Lagen dar.

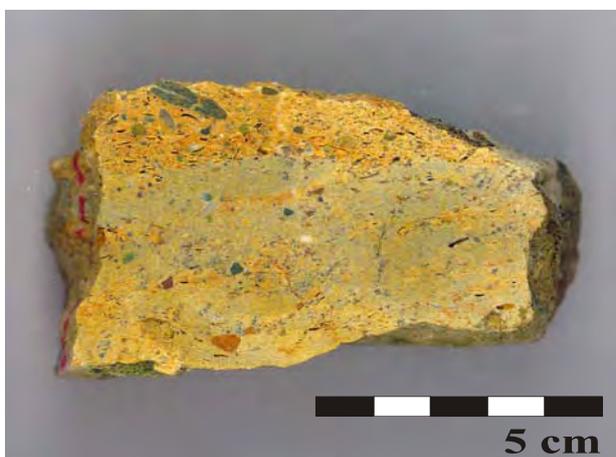


Abb. 2.15: 1026-3

Karbonatischer Sandstein:

Dieser hellgelbe Feinsandstein mit schluffig-toniger Grundmasse ist im Aufschluß leicht bemoost und feucht. Die Schicht ist leicht geschichtet und sehr inkompetent.



Abb. 2.16: 1030-4

Biogenkalk:

Dieses Handstück stammt aus einem weiteren Aufschluß mit natürlichem Wasseraustritt. Die Schichtenfolge entspricht dem Profil 1026. Das Bild zeigt einen stark verfestigten biogenreichen Kalkstein mit tonigen Einschaltungen.



Abb. 2.17: 1033-8

Stromatolithenkalk:

Deutlich erkennbar ist im Anschnitt die unregelmäßige Schichtung und die unterschiedliche Färbung des Gesteins. Dieser Stromatolith ist dichter und feinlaminiertes als 1019-115. Es ist auch eine geringere Porosität sichtbar. Besonders sind die domartigen Strukturen im oberen Teil des Bildes. In den Stromatolith sind vereinzelt hellgraue, tonige Lagen eingeschaltet.



Abb. 2.18: 1035-4

Biogenkalk:

Der dichte Kalkstein besteht aus Biogenen, hauptsächlich Schalenresten, in einer feinkörnigen karbonatischen Matrix. Die hohe sichtbare Porosität ist auf das Herauslösen von Schalenresten zurückzuführen. Im oberen Teil des Handstücks befindet sich ein körniger, feinlaminiertes

Sandstein, der bei der Aufbereitung des Handstückes abbrach. Dieses Stück spiegelt nicht die ganze Schicht wieder.



Abb. 2.19: 1036-5



Abb. 2.20: 1036-7



Abb. 2.21: 1036-8



Abb. 2.22: 1036-12



Abb. 2.23: 1037-8

Biogenkalk:

Deutlich ist in der Abbildung die Einregelung der Biogene, Schalenreste auch Schneckenhäuser, zu sehen. Die größeren Klaster sind Quarze und Gesteinsfragmente. Die Schicht gehört zu einem Profil mit natürlichem Wasseraustritt. Das Gestein wirkt leicht versintert, ist selbst aber nicht feucht oder bemoost.



Abb. 2.24: 1037-8

Biogenkalk:

Sichtbar wird hier der lagige Aufbau des Handstückes. Größere kast- und biogenreichere Lagen wechseln mit Lagen kleinerer und weniger Klaster. In diesem Bild sind die sichtbaren Porositätenm deutlich. Einzelne Schalenreste wurden herausgelöst und bilden jetzt Hohlräume aus.



Abb. 2.25: 3004-2

Basalt:

Dieser dichte Basalt stand an der Südost-Grenze des Kartiergebietes an. Sichtbar sind die Blasen Hohlräume die teilweise kalzitisch verfüllt sind. Die Hohlräume sind leicht gelängt.

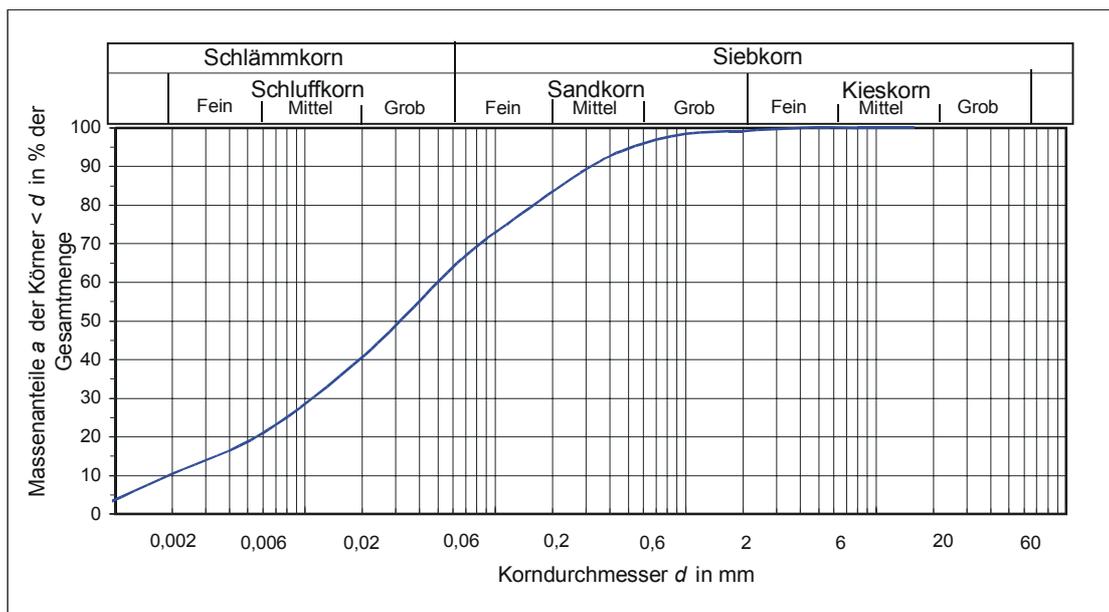
Siebanalyse nach DIN 18123

Juli/Aug 2002

Projekt: **Troia**
 Probenbezeichnung: **TRO-2607-KK-1036-1**
 Gesamtmasse Trockene Probe: **162,7 g**
 Einwaage Siebanteil: **162,7 g**
 Siebverlust: **0,4%**

Meter NN:
 Lithologie: toniger Sandschluffstein
 Trockensiebung
 Naßsiebung

| Maschenweite mm | Rückstand g | Rückstand % | Summe % | | |
|--------------------|----------------|----------------|------------|------------------------------|--------------|
| 100 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | | |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₅ : | 0,001 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₀ : | 0,002 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₆ : | 0,004 |
| 2 | 1,31 | 0,81 | 99,19 | d ₂₀ : | 0,006 |
| 1 | 1,20 | 0,74 | 98,45 | d ₂₅ : | 0,009 |
| 0,5 | 6,00 | 3,70 | 94,75 | d ₃₀ : | 0,012 |
| 0,28 | 10,40 | 6,42 | 88,33 | d ₅₀ : | 0,036 |
| 0,125 | 19,30 | 11,91 | 76,41 | d ₆₀ : | 0,054 |
| 0,063 | 18,50 | 11,42 | 65,00 | d ₇₅ : | 0,117 |
| 0,02068 | 38,41 | 23,71 | 41,29 | d ₈₄ : | 0,224 |
| 0,006 | 32,74 | 20,21 | 21,08 | d ₉₅ : | 0,534 |
| 0,002 | 17,16 | 10,59 | 10,49 | U: | 27,9 |
| 0,000621 | 16,99 | 10,49 | 0,00 | C: | 1,5 |
| 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | INMAN σφ: | 2,89 |
| < 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | FOLK & WARD σ ₁ : | 2,76 |
| Summe | 162,0 | 100,00 | | TRASK S _O : | 3,64 |
| | | | | SK ₁ : | -0,10 |
| | | | | K _G : | 0,96 |



Anhang 3.1: Ergebnisse der Korngrößenanalyse von Probe 1036-1.

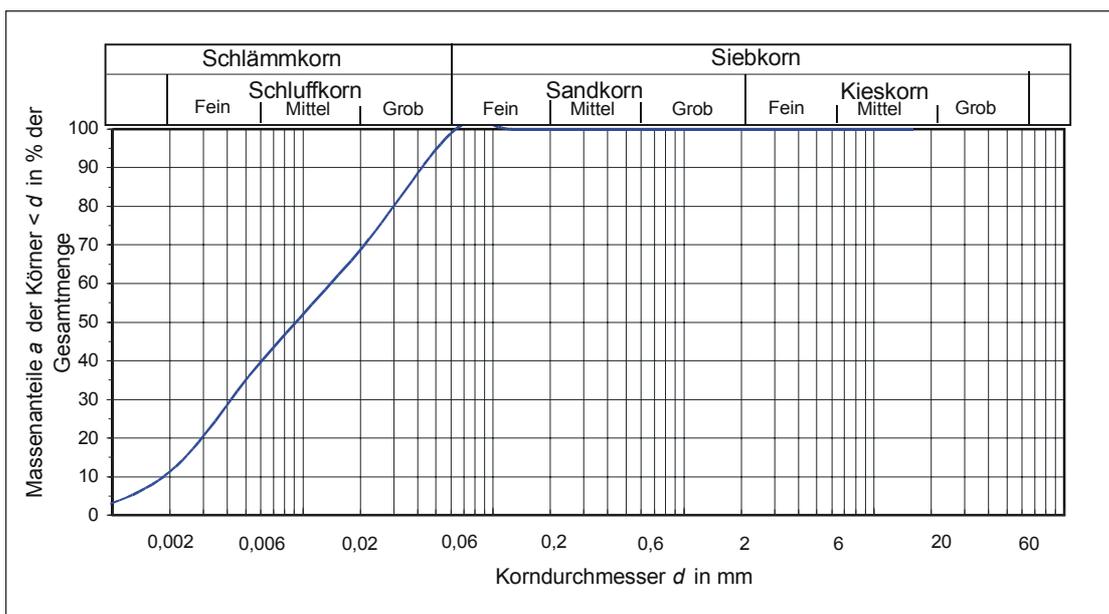
Siebanalyse nach DIN 18123

Juli/Aug 2002

Projekt: **Troia**
 Probenbezeichnung: **TRO-2607-KK-1036-3a**
 Gesamtmasse Trockene Probe: **152,3 g**
 Einwaage Siebanteil: **152,3 g**
 Siebverlust: 5,6%

Meter NN:
 Lithologie: toniger Schluffstein
 Trockensiebung
 Naßsiebung

| Maschenweite mm | Rückstand g | Rückstand % | Summe % | | |
|--------------------|----------------|----------------|------------|--------------------------|--------------|
| 100 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | | |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₅ : | 0,001 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₀ : | 0,002 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₆ : | 0,003 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₂₀ : | 0,003 |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₂₅ : | 0,004 |
| 0,5 | 0,01 | 0,01 | 99,99 | d ₃₀ : | 0,005 |
| 0,28 | 0,03 | 0,02 | 99,97 | d ₅₀ : | 0,011 |
| 0,125 | 0,07 | 0,05 | 99,92 | d ₆₀ : | 0,016 |
| 0,063 | 0,11 | 0,08 | 99,84 | d ₇₅ : | 0,028 |
| 0,02068 | 43,31 | 30,13 | 69,72 | d ₈₄ : | 0,041 |
| 0,006 | 43,00 | 29,91 | 39,81 | d ₉₅ : | 0,056 |
| 0,002 | 40,89 | 28,44 | 11,37 | U: | 8,7 |
| 0,000621 | 16,34 | 11,37 | 0,00 | C: | 0,7 |
| 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | INMAN $\sigma\phi$: | 1,97 |
| < 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | FOLK & WARD σ_1 : | 1,82 |
| Summe | 143,8 | 100,00 | | TRASK S ₀ : | 2,68 |
| | | | | SK ₁ : | -0,09 |
| | | | | K _G : | 0,80 |



Anhang 3.2: Ergebnisse der Korngrößenanalyse von Probe 1036-3 a.

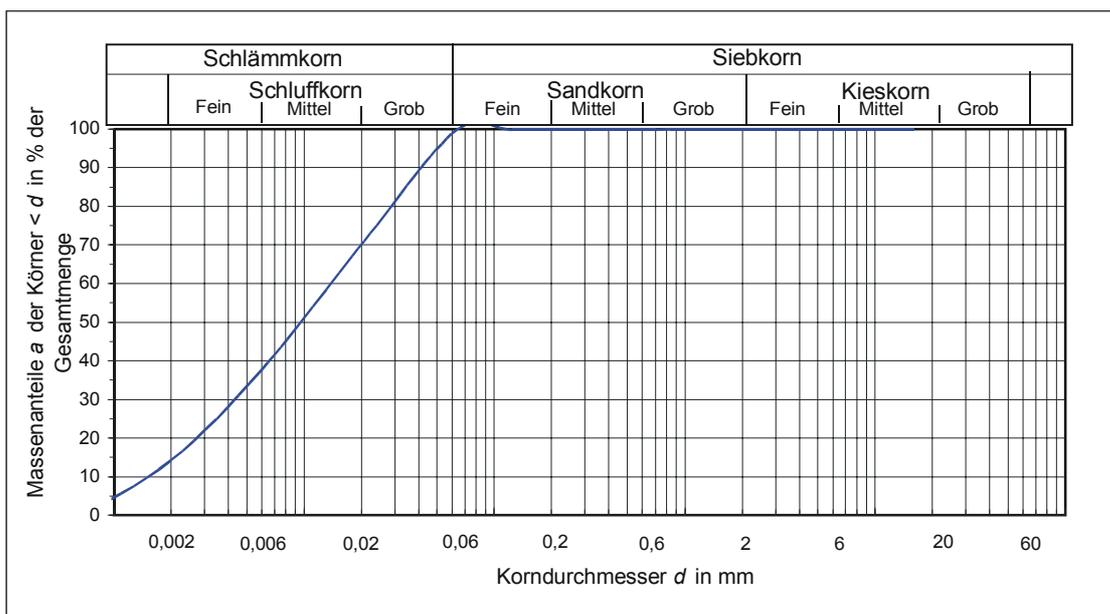
Siebanalyse nach DIN 18123

Juli/Aug 2002

Projekt: **Troia**
 Probenbezeichnung: **TRO-2607-KK-1036-3b**
 Gesamtmasse Trockene Probe: **120,2 g**
 Einwaage Siebanteil: **120,2 g**
 Siebverlust: 0,0%

Meter NN:
 Lithologie: toniger Schluffstein
 Trockensiebung
 Naßsiebung

| Maschenweite mm | Rückstand g | Rückstand % | Summe % | | |
|--------------------|----------------|----------------|------------|------------------------------|--------------|
| 100 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | | |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₅ : | 0,001 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₀ : | 0,002 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₆ : | 0,002 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₂₀ : | 0,003 |
| 1 | 0,06 | 0,05 | 99,95 | d ₂₅ : | 0,004 |
| 0,5 | 0,22 | 0,18 | 99,77 | d ₃₀ : | 0,005 |
| 0,28 | 0,01 | 0,01 | 99,76 | d ₅₀ : | 0,011 |
| 0,125 | 0,03 | 0,03 | 99,73 | d ₆₀ : | 0,016 |
| 0,063 | 0,09 | 0,08 | 99,65 | d ₇₅ : | 0,027 |
| 0,02068 | 34,37 | 28,61 | 71,05 | d ₈₄ : | 0,040 |
| 0,006 | 39,92 | 33,23 | 37,82 | d ₉₅ : | 0,056 |
| 0,002 | 28,28 | 23,54 | 14,28 | U: | 10,0 |
| 0,000621 | 17,16 | 14,28 | 0,00 | C: | 0,9 |
| 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | INMAN σφ: | 2,06 |
| < 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | FOLK & WARD σ ₁ : | 1,89 |
| Summe | 120,1 | 100,00 | | TRASK S ₀ : | 2,63 |
| | | | | SK ₁ | -0,16 |
| | | | | K _G : | 0,83 |



Anhang 3.3: Ergebnisse der Korngrößenanalyse von Probe 1036-3 b.

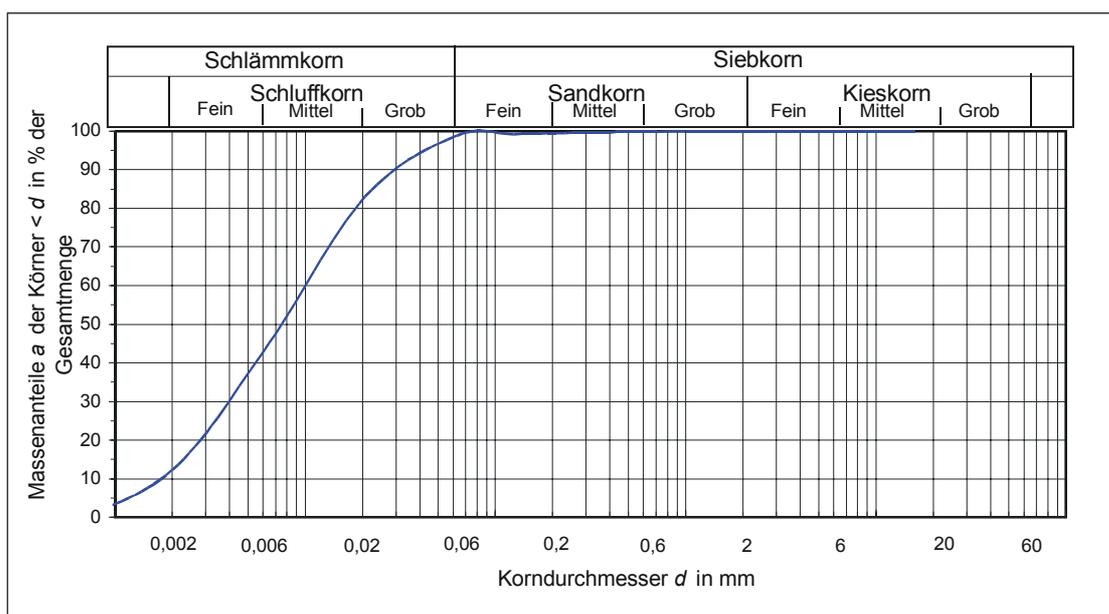
Siebanalyse nach DIN 18123

Juli/Aug 2002

Projekt: **Troia**
 Probenbezeichnung: **TRO-2607-KK-1036-4**
 Gesamtmasse Trockene Probe: **147,5 g**
 Einwaage Siebanteil: **147,5 g**
 Siebverlust: **0,0%**

Meter NN:
 Lithologie: toniger Schluffstein
 Trockensiebung
 Naßsiebung

| Maschenweite mm | Rückstand g | Rückstand % | Summe % | | |
|--------------------|----------------|----------------|------------|--------------------------|--------------|
| 100 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | | |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₅ : | 0,001 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₀ : | 0,002 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₆ : | 0,002 |
| 2 | 0,04 | 0,03 | 99,97 | d ₂₀ : | 0,003 |
| 1 | 0,09 | 0,06 | 99,91 | d ₂₅ : | 0,004 |
| 0,5 | 0,23 | 0,15 | 99,76 | d ₃₀ : | 0,004 |
| 0,28 | 0,22 | 0,15 | 99,61 | d ₅₀ : | 0,009 |
| 0,125 | 0,61 | 0,42 | 99,20 | d ₆₀ : | 0,012 |
| 0,063 | 0,52 | 0,35 | 98,85 | d ₇₅ : | 0,018 |
| 0,02068 | 23,44 | 15,89 | 82,95 | d ₈₄ : | 0,023 |
| 0,006 | 59,26 | 40,18 | 42,77 | d ₉₅ : | 0,053 |
| 0,002 | 44,89 | 30,44 | 12,33 | U: | 7,1 |
| 0,000621 | 18,19 | 12,33 | 0,00 | C: | 0,9 |
| 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | INMAN $\sigma\phi$: | 1,62 |
| < 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | FOLK & WARD σ_1 : | 1,64 |
| Summe | 147,5 | 100,00 | | TRASK S ₀ : | 2,20 |
| | | | | SK ₁ : | -0,08 |
| | | | | K _G : | 0,99 |



Anhang 3.4: Ergebnisse der Korngrößenanalyse von Probe 1036-4.

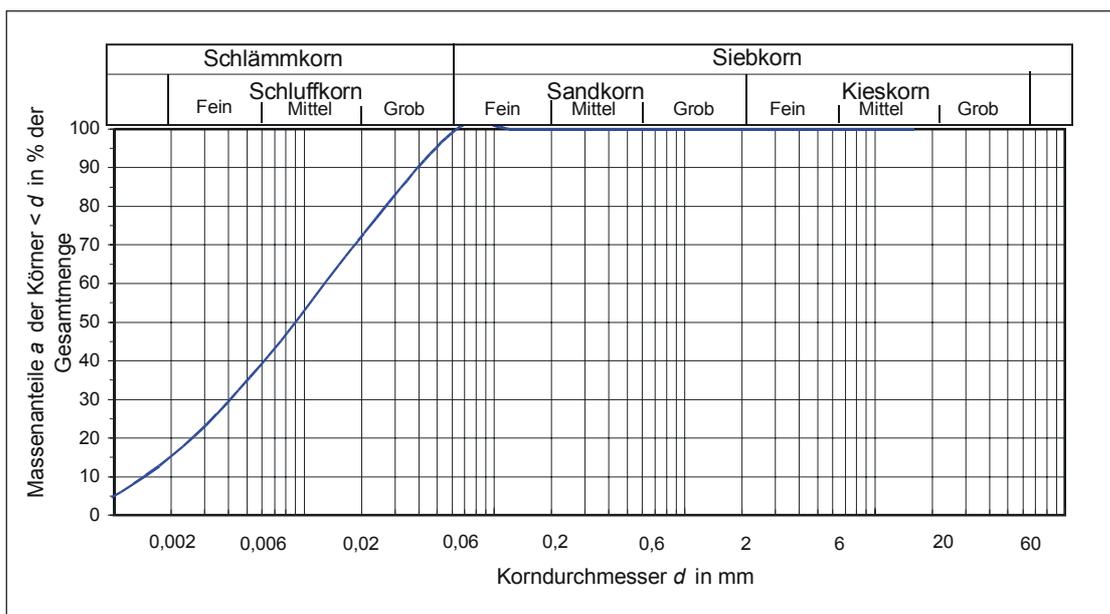
Siebanalyse nach DIN 18123

Juli/Aug 2002

Projekt: **Troia**
 Probenbezeichnung: **TRO-2607-KK-1036-9**
 Gesamtmasse Trockene Probe: **117,8 g**
 Einwaage Siebanteil: **117,8 g**
 Siebverlust: 0,0%

Meter NN:
 Lithologie: toniger Schluffstein
 Trockensiebung
 Naßsiebung

| Maschenweite mm | Rückstand g | Rückstand % | Summe % | | |
|--------------------|----------------|----------------|------------|--------------------------|--------------|
| 100 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | | |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₅ : | 0,001 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₀ : | 0,002 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₁₆ : | 0,002 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₂₀ : | 0,003 |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | d ₂₅ : | 0,004 |
| 0,5 | 0,01 | 0,01 | 99,99 | d ₃₀ : | 0,004 |
| 0,25 | 0,02 | 0,01 | 99,97 | d ₅₀ : | 0,011 |
| 0,125 | 0,06 | 0,05 | 99,92 | d ₆₀ : | 0,015 |
| 0,063 | 0,12 | 0,11 | 99,81 | d ₇₅ : | 0,024 |
| 0,02068 | 31,62 | 26,84 | 72,97 | d ₈₄ : | 0,038 |
| 0,006 | 39,53 | 33,56 | 39,41 | d ₉₅ : | 0,055 |
| 0,002 | 28,42 | 24,13 | 15,29 | U: | 9,9 |
| 0,000621 | 18,01 | 15,29 | 0,00 | C: | 0,9 |
| 0,000313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | INMAN $\sigma\phi$: | 2,08 |
| < 0,00313 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | FOLK & WARD σ_1 : | 1,90 |
| Summe | 117,8 | 100,00 | | TRASK S ₀ : | 2,57 |
| | | | | SK ₁ | -0,14 |
| | | | | K _G : | 0,86 |



Anhang 3.5: Ergebnisse der Korngrößenanalyse von Probe 1036-9.

Anhang 4: Modalbestand der gesiebten Probesubstanzen. Seite. 1/10.

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|--|-------------------|
| 1036-1 | 1 mm | Aggregate | schlecht | tonig-karbonatisch, Ooiden, hellbraun, gelblich, porös | 20 — 30 |
| | | Biogenkalkdetritus | schlecht | Muschelabdrücke, hellgelblich, bräunlich, porös | |
| | | Quarz | schlecht- | angelöst, tw Karbonatüberzug; milchig, trüb, klar | 5 — 10 |
| | 500 µm | Ooide | kanten | elliptisch, platt, rund, hellgelb, bräunlich | 75 — 80 |
| | | Biogene | | Schalenreste, Schneckenhäuser, tw. komplett, | 5 — 10 |
| | | Quarz | | milchig, trüb, klar | 5 |
| | | Aggregate | schlecht | tonig-karbonatisch, porös, gelblich, hell, homogen | 10 |
| | | Biogenkalkdetritus | | Schalenabdrücke, hellgelb, bräunlich | 5 |
| | 280 µm | Ooide | | rund, elliptisch, einzelne zerbrochen, hellbräunlich, gelblich | 80 — 85 |
| | | Quarz | schlecht | klar | 5 — 10 |
| | | Aggregate | | tonig-karbonatisch | 5 — 10 |
| | | Biogene | nicht | Ostrakoden, ein- und zweiklappig | < 5 |
| | | Glimmer | nicht | bräunlich, grünlich, durchscheinend | akzessorisch |
| | 125 µm | Quarz | schlecht | | 25 — 30 |
| | | Ooide | | | 45 — 50 |
| | | Biogene | nicht | ellipt. Schalen | 15 — 20 |
| | | Fe-Oxide | nicht | rotbraun | 2 — 3 |
| | | Glimmer | nicht | grünlich, bräunlich | akzessorisch |
| | | Gips | | Plättchen, klein, transparent | akzessorisch |

Anhang 4: Modalbestand der gesiebten Probesubstanzen. Seite. 2/10.

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundungsgrad | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|---------------------|---|-------------------|
| 1036-1 | 63 µm | Quarz | schlecht | tw. umkrustet | 30 — 35 |
| | | Ooide | nicht | dunkel, grünlich, bräunlich, durchscheinend | 30 — 35 |
| | | Glimmer | nicht | Ooide und Schalen | akzessorisch |
| | | Gesteinsfragmente | | | 30 — 35 |
| | | Schwerminerale | | | akzessorisch |
| | | Gesteinsfragmente | | Ooide und Schalen | 60 |
| | | Quarz | | klar | 40 |
| 1036-2 | 2 mm | Schwerminerale | | | akzessorisch |
| | | Glimmer | | Plättchen, klein, transparent | akzessorisch |
| | | Gips | | klar | akzessorisch |
| | | Aggregate | kanten | tonig-karbonatisch, hell, homogen; Schalenabdrücke | |
| | | Aggregate | gut-kanten | s.o., Schalenabdrücke, homogen, hellgrau, Verbackungen | |
| | | Aggregate | gut-kanten | s.o., Schalenabdrücke | |
| | | Aggregate | gut-kanten | s.o., hellgrau, Schalenabdrücke | |
| | | Aggregate | gut-kanten | s.o., Ostrakoden, umkrustete Körner | |
| | | Aggregate | gut | s.o., walzenförmig, Schalenabdrücke, Schalenbruchstücke | |
| | | Aggregate | gut | s.o., meist einzelne Körner | |

Anhang 4: Modalbestand der gesiebten Probesubstanz. Seite. 3/10.

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|--|-------------------|
| 1036-3a | 1,00 mm | Eisenoxid | | plattig, rotbraun | |
| | | Aggregate | rundlich | Tonig-karbonatisch, weiß, hell | |
| | 500 µm | Eisenoxid | | rotbraun, z.T. wie umkrustete Biogene, sonst unförmig | 65 |
| | | Schalen | nicht | zerdrückt | |
| | | Aggregate | | weiß | 35 |
| | 280 µm | Schalen | nicht | Ostrakoden , nur 1 Art, 1/2 zerbrochen, 1/2 komplett, eingedellt, oval, weiß, dünnchalig | 70 — 80 |
| | | Eisenoxid | | | 10 — 15 |
| | | Aggregate | | | 5 — 10 |
| | 125 µm | Quarz | schlecht | klar, wenige | |
| | | Eisenoxid | | | 25 — 30 |
| | | Schalen | nicht | oval, zerdrückt, weiß | 60 |
| | | Quarz | schlecht | klar | 5 |
| | | Glimmer | | | akzessorisch |
| | | Dunkelmin. | nicht | | akzessorisch |
| | | Aggregate | | | 15 |
| | 63 µm | Schalen | nicht | nur zerbrochene | 70 — 80 |
| | | Aggregate | | | 10 |
| | | Glimmer | | einzelne grüne/braune Plättchen | |
| | | Eisenoxid | | rotbraun | 10 — 15 |
| | | Dunkelmin. | nicht | glänzend | 5 — 10 |

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|--|-------------------|
| 1036-3b | 1 mm | Quarz | tw. kanten. | trübe und klare Komponenten | 50 |
| | | Gesteinsfragmente | kanten bis gut | tw. Biogene Strukturen erkennbar, tw. verockert, porös | |
| | | Eisenoxid | nicht | wellige Oberflächen, Primärstruktur nicht erkennbar | |
| | 500µm | Quarz | kanten. | hell, gelblich, tw. milchig, tw. klar | 40 — 50 |
| | | Gesteinsfragmente | kanten bis gut | tw. Kalksteine | 40 — 50 |
| | | Eisenoxid | nicht | | 10 |
| | | Schalenreste | nicht | komplett, zerdrückt, rotbraunglänzender Fe-Überzug | 5 |
| | 280 µm | Gesteinsfragmente | kanten bis gut | haupts. Karbonate | 45 — 50 |
| | | Quarz | kantengrundet | hell bis gelblich, milchig, klar | 35 — 40 |
| | | Eisenoxid | nicht | porös | 10 — 15 |
| | | Schalenreste | nicht | einzelne angelöste Bruchstücke, löchrig | < 5 |
| | | Dunkelmin. | nicht | einzelne Körner, schwarz mit bunt-metallischem Glanz | < 5 |
| | 125µm | Gesteinsfragmente | | einzelne Metamorphite, Kalksteine | 70 |
| | | Quarz | | klar-/trüb | 15 — 20 |
| | | Eisenoxid | | porös, unterschiedl. geformt | 10 |
| | | Schalenreste | nicht | | 5 |
| | | Dunkelmin. | nicht | Sulfide | akzessorisch |
| | > 63µm | Tonpartikel | gut | | 65 — 70 |
| | | Eisenoxid | | porös, leicht glänzend | 15 — 20 |
| | | Quarz | kaum | klar, weiß, Fettglanz auf den Flächen | 10 — 15 |
| | | Dunkelmin. | nicht | plattig, metallisch glänzend | < 5 |
| | | Schalenreste | nicht | | akzessorisch |
| | < 63 µm | Quarz | kaum | klar | |
| | | Tonpartikel | gut | | |

Anhang 4: Modalbestand der gesiebten Probesubstanzen. Seite 5/10.

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|--|-------------------|
| 1036-4 | 2 mm | Aggregate | kanten | tonig-karbonatisch, porös, hellgrau | 100 |
| | 1 mm | Aggregate | kanten | s.o., uneben, homogen, Abdrücke, strukturlos | 100 |
| | 500 µm | Aggregate | kanten-gut | s.o. hellgelb, hellgrau, homogen, porös | 100 |
| | | Eisenoxide | | | akzessorisch |
| | 280 µm | Aggregate | gut | s.o., hellgelbgrau, tw. Verockerungen | 95 |
| | | Quarz | kanten | milchig, klar | 5 |
| | | Glimmer | | | akzessorisch |
| | | Gips | nicht | Plättchen | akzessorisch |
| | 125 µm | Eisenoxide | | | <5 |
| | | Schwermin. | | | akzessorisch |
| | | Glimmer | | | akzessorisch |
| | | Aggregate | gut | | 95 |
| | | Gips | | plättchenförmig | akzessorisch |
| | 63 µm | Aggregate | sehr gut | kugelig | 100 |
| | | Eisenoxide | | | akzessorisch |
| | | Quarz | | | akzessorisch |
| | | Gips | | | akzessorisch |
| | | Glimmer | | | akzessorisch |

Anhang 4: Modalbestand der gesiebten Probesubstanzen. Seite 6/10.

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|---|---|---|---|
| 1036-5 | 500µm | Aggregate Quarz. | schlecht schlecht | tonig-karbonatisch hellgrau, tw. verockert trüb | 95 < 5 |
| | 280µm | Biogenreste Aggregate Biogenreste Quarz Gips Glimmer | nicht kanten nicht schlecht kaum kanten | tonig-karbon., hellgrau, gelblich, strukturlos, homogen, dicht, tw verockert dklbraun, rötlich, zerbrochen, Relikte von Tierpanzern ? klar klar hell, dünn, transparent | akzessorisch 95 < 5 akzessorisch akzessorisch akzessorisch |
| | 125 µm | Aggregate Biogenreste Dunkelmin. | kanten bis gut nicht kanten | tonig-karbonatisch, hellgrau, tw verockert zerbrochen, Panzerteile dunkel | 90 — 95 < 5 2 — 3 |
| | 63 µm | Gips Quarz Aggregate Dunkelmin. Quarz Gips | kaum schlecht gut schlecht schlecht schlecht | hellgrau, gelblich metallisch glänzend | akzessorisch akzessorisch 95 < 5 akzessorisch akzessorisch |
| | < 63 µm | Aggregate Dunkelmin. Gips Hellglimmer | gut nicht nicht transparent | tonig-karbonisch, hellgelbgrau metallisch glänzend klar transparent | 95 5 akzessorisch akzessorisch |

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|--|-------------------|
| 1036-6 | 2 mm | Aggregate | | Quarz-Glimmer-Ton-Aggregate | |
| | | Quarz | gut | milchig | |
| | 1 mm | Aggregate | | tonig-karbonatisch | 95 |
| | | Quarz | | wenige | < 5 |
| | | Gesteinsfragmente | gut | | < 5 |
| | 500 µm | Aggregate | | | 85 — 90 |
| | | Quarz | unterschiedl. | mit karbonatischer Kruste gut gerundet, ohne Kruste trüb, nicht gerundet | 10 — 15 |
| | | Schalenreste | nicht | Ostrakoden, weiße Schalen, dünnchalig | < 5 |
| | 280 µm | Aggregate | | | 50 — 60 |
| | | Schalenreste | nicht | tw. zerbrochen, tw mit Sediment verfüllt | 15 — 20 |
| | | Quarz | unterschiedl. | einzelne Körner zeigen Umkrustung mit Karbonat -> sehr gut gerundet | 15 — 20 |
| | | Glimmer | | einzelne Plättchen, grünlich, bräunlich, Kristallform erkennbar | akzessorisch |
| | 125 µm | Schalenreste | nicht | Ostrakoden, weiß, meist zerbrochen, 2-klappig | |
| | | Aggregate | | hell, porös | |
| | | Quarz | schlecht | einzelne Körner mehrmals von Karbonatlagen umwachsen -> Ooide ? | 10 — 15 |
| | | Glimmer | nicht | | < 5 |
| | | Aggregate | | nur noch vereinzelt | 5 |
| | | Gips | nicht | transparente, farblose Plättchen | akzessorisch |
| | > 63 µm | Quarz | | klar, milchig, hell, tw. leicht gelblich | 50 — 60 |
| | | Aggregate | gut bis kanten | weiß, porös | 40 — 50 |
| | | Schalenreste | nicht | klein, eckig | 5 — 10 |
| | | Glimmer | nicht | einzelne Plättchen | akzessorisch |
| | | Gips | nicht | einzelne Kristalle, plattig, eckig, leicht glänzend | akzessorisch |

| Proben-Nr. | Korngr. | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|----------------|--------------------|----------------|---|-------------------|
| 1036-9 | 1 mm | Schalenreste | nicht | mit Tonpartikeln verklebt, oval | |
| | | Gesteinsfragmente | | Biogenkalksteine, porös, Fossilien erkennbar | |
| | 500 µm | Schalenreste | nicht | Ostrakoden, hell, immer nur eine Klappe erhalten, 75 % zerbrochen | 30 — 40 |
| | | Aggregate | gut | | 25 — 30 |
| | | Quarz | nicht | klar, tw. trüb, fettglänzende Flächen | 25 — 30 |
| | | Gesteinsfragmente | schwach | | 10 — 15 |
| | 280 µm | Schalenreste | nicht | Ostrakoden: oval, dünnchalig, meist komplett, 2-klappig; Knochenbruchstücke, transparent, rotbraun, Wirbel, Zähne, Rippen | 85 |
| | | Quarz | schlecht | | 10 |
| | | Gesteinsfragmente | | | 5 |
| | 125 µm | Schalenreste | nicht | mit einzelne dünnen Knochenbruchstücken, rotbraun, unterschiedl. Ausbildung | 90 — 95 |
| | | Glimmer | nicht | Plättchen, braun, grünlich, Kristallform tw. erkennbar | |
| | | Quarz | schlecht | vereinzelt | 5 — 10 |
| | | Dunkelmin. | nicht | metallisch glänzend | |
| | > 63 µm | Schalenreste | nicht | zerbrochen mit Zähnen (spitz, Pulpahöhle) | 90 |
| | | Quarz | schlecht | klar | 5 |
| | | Gesteinsfragmente | nicht | Biogenkalke | < 5 |
| | | Dunkelmin. | nicht | | akzessorisch |
| | < 63 µm | Schalenreste | nicht | | 70 — 80 |
| | | Tonplättchen | rund | ocker, gelblich, orange, oval, platt | 10 |
| | | Knochenreste | nicht | rotbraun, transparent, zerbrochen | 10 — 15 |
| | | Dunkelmin. | nicht | | zusammen |
| | | Glimmer | nicht | | < 5 |
| | | Gesteinsfragmente | schlecht | | |

Anhang 4: Modalbestand der gesiebten Probesubstanzen. Seite 9/10.

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|---|-------------------|
| 1036-10 | 2 mm | Aggregate | gut | hellgrau, porös, Schalenabdrücke, Schalen gelöst, Hohlräume mit Rekrystallisationen | |
| | | Schalenreste | nicht | matt, weiß, angelöst, porös | |
| | 1 mm | Aggregate | gut | Biogenkalk, Schalenabdrücke, Hohlräume, Rekrystallisationen,, Gastropoden | |
| | | Schalenreste | nicht | weiß, porös | |
| | 500 µm | Aggregate | gut | hellgrau, ocker, porös, Schalenabdrücke | 80 — 90 |
| | | Schalenreste | nicht | weiß, porös, einzelne Gastropoden | 5 — 10 |
| | | Gesteinsfragmente | kanten | metamorphe, magmatische und sedimentäre Bruckstücke | 5 |
| | | Quarz | kaum | einzelne Körner, trüb | <5 |
| | 280 µm | Aggregate | gut | Hauptsächlich Biogenkalk | 75 — 80 |
| | | Quarz | kaum | trüb, hell, rosa, klar | 10 |
| | | Schalenreste | nicht | Ostrakoden, weiß, strukturlos, angelöst, tw. Steinkerne | 10 |
| | | | kanten | | <5 |
| | | Glimmer | kaum | grünlich, bräunlich | akzessorisch |
| | | Dunkelmin. | nicht | metallischer Glanz | akzessorisch |
| | 125 µm | Aggregate | gut | hellgrau, ocker, porös | 90 |
| | | Schalenreste | nicht | weiß, porös, ovale Schalen, tw. vollständig | 5 — 10 |
| | | Quarz | kaum | leicht trüb | 5 — 8 |
| | | Gesteinsfragmente | kanten | sehr unterschiedl. Ausbildung und Färbung | <5 |
| | | Dunkelmin. | schlecht | metallisch glänzend | akzessorisch |
| | | Glimmer | kaum | grünliche, bräunliche Kristalle erkennbar | akzessorisch |
| | | Gips | nicht | klare Plättchen | akzessorisch |

| Proben-Nr. | Korngröße | Komponenten | Rundung | Beschreibung | Anteil [%] |
|-------------------|------------------|--------------------|-----------------|--|--|
| 1036-10 | 63 µm | Aggregate. | gut | hellbraun | 80 |
| | | Quarz | kaum | klar | 20 |
| | | Dunkelmin. | nicht | dunkel, sulfidisch | akzessorisch |
| | | Glimmer | kaum | grünlich, bräunlich | akzessorisch |
| | | Schalenreste | kaum | Bruchstücke, weiß, angelöst | akzessorisch |
| | < 63 µm | Aggregate | gut | | 95 |
| | | Dunkelmin. | kaum | dunkel | akzessorisch |
| | | Glimmer | kaum | einzelne Plättchen | akzessorisch |
| | | Quarz | schlecht | | akzessorisch |
| | 1036-11 | 4 mm | Aggregate | schlecht-kanten | Hellgelbbraun, Mollusken-Abdrücke, rekristallisiert, kristalline Überzüge, Hohraumauffüllungen |
| 2 mm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o., Schalen weggelöst, dicht | 100 |
| 1 mm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o., löchrig, Hohlräume, Porosität auf Grund von Hohlräumen | 100 |
| 500 µm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o., einzelne Kristallkrusten | 100 |
| 280 µm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o., hellgelb, karbonatische, kristalline, Krusten | 100 |
| 125 µm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o. | 100 |
| 63 µm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o., hellgelb, weißlich | 97 — 98 |
| | | Glimmer | kanten | dkl. grün, dick, metallisch glänzend | 2 — 3 |
| < 63 µm | | Aggregate | schlecht-kanten | s.o. | 100 |
| | | Glimmer | kanten | grün | akzessorisch |

| Schliff-Nr. | Komponenten | Farbe | Pleochroismus | Spaltbarkeit | Ausföschung | Kristallform/ Rundung | Lichtbrechung | Quantitative Abschätzung |
|----------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|-------------|------------------------------|------------------|-----------------------------|
| 1036-2 | Quarz | transparent | keiner | keine | tw. undulös | schlecht bis kantengerundet | höher als Matrix | 25 — 30 % |
| | Gesteinsfragmente | verschieden | keiner | | | gut, tw. kanten bis schlecht | höher als Matrix | 1 — 2 % |
| | Glimmer | transparent | keiner | | | faserig | | akzessorisch |
| | org. Substanz | opak | keiner | | | nicht | | 2 — 3 % |
| | Eisenoxide | rotbraun | keiner | keine | | nicht | | akzessorisch |
| 1036-5 | Matrix | hellbraun | | | | | | 60 — 65 % |
| | Biogene | bräunlich | keiner | keine | | | | |
| | Quarz | transparent | keiner | keine | undulös | | höher als Matrix | 1 % |
| | Peloide | braun | keiner | keine | | | | 2-3 % |
| | Matrix | hellgraubraun | keiner | | | | | 90 — 95 % |
| 1036-8 | Ooide | hellbraun | keiner | keine | | | | 50 % |
| | Quarz | transparent | keiner | keine | | | | |
| | Gesteinsfragm. | | keiner | | | gut bis sehr gut | | 10 — 20 % |
| 1036-12 | Matrix | weiß | | | | | | 20 — 30 % |
| | Ooide | | keiner | keine | | | | 40 % |
| | Quarz | transparent | keiner | keine | | nicht bis kanten-gerundet | | 7 % |
| | Plagioklas | transparent | keiner | keine | | schlecht gerundet | | akzessorisch |
| | Matrix | hellgrau | keiner | | | | | 50 — 55 % |

Anhang 5: Ergebnisse der Dünnschliffanalysen. Seite 2/3.

| Schliff-Nr. | Komponenten | Besonderheiten |
|--------------------|--------------------|--|
| 1036-2 | Quarz | regellos verteilt, mono-, polykristallin |
| | Gesteinsfragmente | Metamorphite, Sedimente, kleine Quarzite |
| | Glimmer | Hell- und Dunkelglimmer, regellos verteilt, teilweise stark angewittert |
| | org. Substanz | zwischen den Körnern verteilt |
| | Eisenoxide | in einzelnen Bereichen angereichert |
| | Matrix | mikritisch, dicht |
| 1036-5 | Biogene | Schalenbruchstücke, gelöst, z.T. rekristallisiert, Fe-Oxidränder erhalten |
| | Quarz | |
| | Peloide | klein, rundlich, dunkel, feinkörnig, ohne Internstruktur |
| | Matrix | Mikritisch |
| | Ooide | Kerne: quarzreiche Gesteinsbrüchstücke, Quarz, Biogenstücke; Radial- und Tangentialooide mit unterschiedlicher Krustendicke, |
| 1036-8 | Quarz | Quarz und Gesteinsfragmente ohne ooidische Umkrustung, unterschiedliche Art und Liefergebiete, größere Korngrößen (bis 1,5 cm) |
| | Gesteinsfragmente | |
| | Matrix | Sparitisch |
| | Ooide | Radial- /Tangentialooide, Kerne: Quarz, Gesteinsbruchstücke; unterschiedliche Krustendicke |
| 1036-12 | Quarz | Hauptsächlich als Ooidkern, teilweise auch ohne Kruste; zeigen z.T. Lösungserscheinungen; mono- und polykristallin, z.T. metamorph überprägt |
| | Plagioklas | |
| | Matrix | sparitisch |

Anhang 5: Ergebnisse Dünnschliffanalysen. Seite 3/3.

| Schliff-Nr. | Komponenten | Porosität | Klassifizierung | Foto |
|--------------------|--------------------|---|--|-----------------------------|
| 1036-2 | Quarz | Matrixporosität Typ I/II: 2 — 15% (ARCHIE 1952) | DUNHAM (1962): | Übersichtsbild: 5x10x2,5 |
| | Gesteinsfragmente | sichtbare Porosität: 10 — 20 % Lösungsporen und -bahnen (CHOQUETTE & PRAY 1970) | Wacke/Packstone | |
| | Glimmer | | FOLK (1959, 1962): Intramikrit | |
| | org. Substanz | | | |
| | Eisenoxide | | | |
| 1036-5 | Matrix | | | Übersicht: 2,5x10x2,5 |
| | Biogene | Matrixporosität Typ I/II: 2 — 15 % (ARCHIE 1952) | DUNHAM (1962): Mudstone | |
| | Quarz | sichtbare Porosität: Risse, Hohlformporen (CHOQUETTE & PRAY 1970) | FOLK (1959, 1962): Mikrit (Pelmikrit) | |
| | Peloide | | | |
| | Matrix | | | |
| 1036-8 | Ooide | Matrixporosität Typ II/III: 5 — 7% (ARCHIE 1952) | DUNHAM (1962): | Übersicht: 2,5x10x2,5 |
| | Quarz | sichtbare Porosität: Schirm-, Partikellösungs- und Hohlformporen (CHOQUETTE & PRAY 1970) | Pack/Grainstone | |
| | Gesteinsfragmente | | FOLK (1959, 1962): Oosparit | |
| | Matrix | | | |
| | Ooide | Matrixporosität Typ I: 2 — 5% (ARCHIE 1952) | DUNHAM (1959): Wacke- /Packstone; | |
| 1036-12 | Quarz | sichtbare Porosität: 3 — 5 %, Risse, Ooidhohlräume (CHOQUETTE & PRAY 1972) | FOLK (1959, 1962): Oosparit, Oncosparit | Übersicht: 2,5x10x2,5 |
| | Plagioklas | | | |
| | Matrix | | | |

Anhang 6: Ergebnisse der röntgenographischen Analysen. Seite 1/2

| Probe | Korngröße | Anteil Masse [%] | Quarz [mg] | Quarz [%] | Calcit [mg] | Calcit [%] | Ankerit [mg] | Ankerit [%] | Arag. [mg] | Arag. [%] | Häm. [mg] | Häm. [%] | Kalifsp [mg] | Kalifsp [%] |
|----------|---------------|---------------------|---------------|--------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|
| 1036-2 | < 2 µm | 24,2 | 4,0 | 1,0 | - | - | 27,0 | 6,5 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 — 63 µm | 48,8 | 8,0 | 3,9 | - | - | 78,0 | 38,1 | - | - | - | - | - | - |
| | > 63 µm | 3,9 | 28,0 | 1,1 | 1,0 | Spur | 50,0 | 1,9 | - | - | 1,0 | Spur | 3,0 | 0,1 |
| | Karbonat | 23,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,0 | - | 6,0 | - | Spur | - | 46,5 | - | - | - | Spur | - | 0,1 |
| 1036-3 a | < 2 µm | 30,0 | 6,0 | 1,8 | - | - | 16,0 | 4,8 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 — 63 µm | 44,4 | 18,0 | 8,0 | - | - | 40,0 | 17,8 | - | - | - | - | 6,0 | 2,7 |
| | > 63 µm | 0,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | 25,6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,0 | - | 9,8 | - | - | - | 22,6 | - | - | - | - | - | 2,7 |
| 1036-3 b | < 2 µm | 27,6 | 6,0 | 1,7 | - | - | 11,0 | 3,0 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 — 63 µm | 47,0 | 21,0 | 9,9 | - | - | 36,0 | 16,9 | - | - | - | - | 7,0 | 3,3 |
| | > 63 µm | 0,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | 25,4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,0 | - | 11,5 | - | - | - | 20,0 | - | - | - | - | - | 3,3 |
| 1036-4 | < 2 µm | 30,8 | 5,0 | 1,5 | - | - | 16,0 | 4,9 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 — 63 µm | 45,2 | 16,0 | 7,2 | - | - | 51,0 | 23,1 | - | - | - | - | - | - |
| | > 63 µm | 0,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | 24,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,0 | - | 8,8 | - | - | - | 28,0 | - | - | - | - | - | - |
| 1036-9 | < 2 µm | 33,4 | 3,0 | 1,0 | 7,0 | 2,3 | 3,0 | 1,0 | 51,0 | 17,0 | - | - | - | - |
| | 2 — 63 µm | 43,9 | 6,0 | 2,6 | 55,0 | 24,2 | 4,0 | 1,8 | 28,0 | 12,3 | - | - | - | - |
| | > 63 µm | 0,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | 22,7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,0 | - | 3,6 | - | 26,5 | - | 2,8 | - | 29,3 | - | - | - | - |

Anhang 6: Ergebnisse der röntgenographischen Analysen. Seite 2/2.

| Probe | Korngröße | Plagioklas [mg] | Plagioklas | Chlorit [mg] | Chlorit [%] | Kaolinit [mg] | Kaolinit [%] | Illit [mg] | Illit [%] | WL [mg] | WL I % |
|----------|---------------|--------------------|------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|---------------|--------------|------------|--------------|
| 1036-2 | < 2 µm | - | - | Spur | - | 5,0 | 1,2 | 18,0 | 4,3 | 46,0 | 11,1 |
| | 2 — 63 µm | 3,0 | 1,5 | 5,0 | 2,4 | 1,0 | 0,5 | 2,0 | 1,0 | 3,0 | 1,4 |
| | > 63 µm | 11,0 | 0,4 | 3,0 | 0,1 | - | - | 3,0 | 0,1 | - | - |
| | Karbonat | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | - | 1,9 | - | 2,6 | - | 1,7 | - | 5,4 | - | 12,5 |
| 1036-3 a | < 2 µm | - | - | Spur | - | 7,0 | 2,1 | 16,0 | 4,8 | 55,0 | 16,5 |
| | 2 — 63 µm | 3,0 | 1,3 | 7,0 | 3,1 | 2,0 | 0,9 | 10,0 | 4,4 | 14,0 | 6,2 |
| | > 63 µm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | - | 1,3 | - | 3,1 | - | 3,0 | - | 9,2 | - | 22,7 |
| 1036-3 b | < 2 µm | - | - | - | - | 7,0 | 1,9 | 14,0 | 3,9 | 62,0 | 17,1 |
| | 2 — 63 µm | 5,0 | 2,3 | 12,0 | 5,6 | 4,0 | 1,9 | 7,0 | 3,3 | 8,0 | 3,8 |
| | > 63 µm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | - | 2,3 | - | 5,6 | - | 3,8 | - | 7,2 | - | 20,9 |
| 1036-4 | < 2 µm | - | - | Spur | - | 6,0 | 1,8 | 16,0 | 4,9 | 57,0 | 17,6 |
| | 2 — 63 µm | 4,0 | 1,8 | 8,0 | 3,6 | Spur | - | 7,0 | 3,2 | 14,0 | 6,3 |
| | > 63 µm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | - | 1,8 | - | 3,6 | - | 1,8 | - | 8,1 | - | 23,9 |
| 1036-9 | < 2 µm | - | - | - | - | 4,0 | 1,3 | 10,0 | 3,3 | 22,0 | 7,3 |
| | 2 — 63 µm | 1,0 | 0,4 | - | - | 2,0 | 0,9 | 2,0 | 0,9 | 2,0 | 0,9 |
| | > 63 µm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Karbonat | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | - | 0,4 | - | - | - | 2,2 | - | 4,2 | - | 8,2 |
| | Gesamt | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100,0 |

Anhang 7: Prozentuale Anteile der mittels röntgenographischer Analysen nachgewiesenen Phasen, bezogen auf karbonatfreie Probensubstanz.

| Probe | Korngröße | Anteil | Quarz | Hämatit | Kalifsp | Plg | Chlorit | Kaolinit | Illit | WL | Gesamt |
|---------|-----------|--------|-------|---------|---------|-------|---------|----------|-------|-------|--------|
| 1036-2 | < 2 µm | 31,46 | 1,72 | - | - | - | - | 2,15 | 7,76 | 19,82 | - |
| | 2 — 63 µm | 63,51 | 23,10 | - | - | 8,66 | 14,44 | 2,89 | 5,77 | 8,66 | - |
| | > 63 µm | 5,03 | 3,61 | Spur | Spur | 1,42 | Spur | - | Spur | - | - |
| | Gesamt | 100,00 | 28,43 | Spur | Spur | 10,08 | 14,44 | 5,04 | 13,53 | 28,48 | 100,00 |
| 1036-3a | < 2 µm | 40,32 | 2,88 | - | - | - | - | 3,36 | 7,68 | 26,40 | - |
| | 2 — 63 µm | 59,68 | 17,90 | - | 5,97 | 2,98 | 6,96 | 1,99 | 9,95 | 13,92 | - |
| | > 63 µm | 0,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,00 | 20,78 | - | 5,97 | 2,98 | 6,96 | 5,35 | 17,63 | 40,33 | 100,00 |
| 1036-3b | < 2 µm | 37,02 | 2,50 | - | - | - | - | 2,91 | 5,82 | 25,79 | - |
| | 2 — 63 µm | 62,98 | 20,66 | - | 6,89 | 4,92 | 11,81 | 3,94 | 6,89 | 7,87 | - |
| | > 63 µm | 0,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,00 | 23,16 | - | 6,89 | 4,92 | 11,81 | 6,85 | 12,71 | 33,66 | 100,00 |
| 1036-4 | < 2 µm | 40,53 | 2,41 | - | - | - | Spur | 2,89 | 7,72 | 27,50 | - |
| | 2 — 63 µm | 59,47 | 19,42 | - | - | 4,85 | 9,71 | Spur | 8,50 | 16,99 | - |
| | > 63 µm | 0,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,00 | 21,83 | - | - | 4,85 | 9,71 | 2,89 | 16,22 | 44,49 | 100,00 |
| 1036-9 | < 2 µm | 43,19 | 3,32 | - | - | - | - | 4,43 | 11,07 | 24,36 | - |
| | 2 — 63 µm | 56,81 | 26,22 | - | - | 4,37 | - | 8,74 | 8,74 | 8,74 | - |
| | > 63 µm | 0,00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Gesamt | 100,00 | 29,54 | - | - | 4,37 | - | 13,17 | 19,81 | 33,10 | 100,00 |