Untersuchungen zur Trennung von Jurahornsteinen verschiedener Fundorte

- archäologisch und chemisch -

Anne Marie Bertsch



Untersuchungen zur Trennung von Jurahornsteinen verschiedener Fundorte – archäologisch und chemisch –

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
Anne Marie Bertsch
aus Königsberg/Pr.

Tübingen
2013

Tag der mündlichen Qualifikation:	8. August 2013
Dekan:	Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Ernst Pernicka
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Dr. h. c. Muharrem Satir

Meinem Mann Dieter und meiner Schwester Ulla (†) gewidmet

Vorwort und Dank

Hornstein war im süddeutschen Raum das am häufigsten verwendete Rohmaterial des modernen Menschen zur Herstellung von Steinzeitgeräten (Artefakten). Es waren dies vor allem Kratzer, Bohrer, Stichel, Klingen, Rückenmesser und Pfeilspitzen im Jungpaläolithikum (jüngere Altsteinzeit), Mikrogeräte im Mesolithikum (Mittelsteinzeit) und neolithische (jungstein zeitliche) Werkzeugformen wie Bohrer, Kratzer, Pfeilspitzen, End- und Lateralretuschen. Ferner wurden im Neolithikum Sicheln, Sicheleinsätze und zusätzliche Grobgeräte sowie ausgesplitterte Stücke aus Hornstein hergestellt. Bis weit in die Bronzezeit hinein gab es noch Artefakte aus Hornstein. Ebenso wie Feuerstein wurde das Material, vom Paläolithikum an, auf oder nahe der Oberfläche aufgelesen. Erst im Neolithikum stieg bei den sesshaften Bauern offensichtlich der Bedarf an Steingeräten so stark an, dass sich die Suche von Rohmaterial auf Kuhlen (bis mannstiefe Gruben), Pingen (mehr als mannstiefe Gruben) und Bergwerke ausdehnte.

Von starkem Interesse ist seit Jahren die Frage, wohin, besonders im Neolithikum, Rohmaterial, Halbfertigprodukte und Werkzeuge aus Hornstein der schwäbischen Alb gelangten und ob es, ebenso wie für den Arnhofener Plattenhornstein, Handelswege gab. Die wichtigste Voraussetzung zur Klärung dieser Frage ist, dass Hornsteine verschiedener Fundorte optisch und/oder chemisch unterschieden werden können. Mit der hier vorliegenden Grundlagenarbeit wird ein Schritt in diese Richtung unternommen.

Während der viereinhalb Jahre, in denen ich mich mit dem Thema der Arbeit sowohl praktisch als auch theoretisch beschäftigte, gab es viele Menschen, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen und bei denen ich mich von ganzem Herzen bedanken möchte.
Von den schwäbischen Jurahornsteinproben stammen 36 aus den Grabungen der Jahre 2006-2008 im „Borgerhau“, in „Wippingen“ und „Grund“ unter der Leitung von Frau Prof. Dr. L. E. Fisher (Universität Springfield, Illinois), Frau Dr. S. Harris (Universität Santa Barbara, Kalifornien), Frau Dr. C. Knipper (CEZ-Archäometrie Mannheim) und Herrn Dr. R. Schreg (RGZM Mainz); vier Wippinger Hornsteine sind Survey-Funde des Jahres 2005. Die 15 „Wittlinger“ Hornsteine kommen als Lesefunde von Frau Prof. Dr. L. E. Fisher, Frau Dr. S. Harris, Frau Dr. C. Knipper und H. Mollenkopf aus den Jahren 2003 und 2009 aus dem Gewann „Stuttgarter Teil“. Auch die 15 „Arnhofener“ Hornsteine sind Lesefunde, allerdings aus verschiedenen Quellen: sechs von Herrn Prof. Dr. H. Floss (Universität Tübingen), vier von Herrn T. Hammerl (M.A.) (Museum Abensberg) und fünf sind eigene Lesefunde. Zum internationalen Vergleich kamen fünf Trias-Cherts aus dem Ungarischen Nationalmuseum Budapest (Frau Prof. Dr. K. T. Biró) dazu. Vielen Dank, ohne das Herausgeben von immer mehr Hornsteinproben wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.
Bei der Beschreibung der Hornsteinproben stellte sich oft die Frage, ob es sich um ein Artefakt oder einen natürlichen Trümmer handelt. Diese und weitere Fragen wurden mir stets von Frau Prof. Dr. L. E. Fisher, Frau Dr. S. Harris und Frau Dr. C. Knipper beantwortet, danke für Eure Geduld. Herzlich bedanke ich mich auch bei Frau H. Jensen, der Institutsfotografin

(Institut für Ur- und Frühgeschichte, Universität Tübingen), die mir manchen guten Ratschlag für das Fotografieren der Hornsteine gab.
Großes Glück hatte ich, dass ich auf einen der besten Kenner der Jurafauna Süddeutschlands traf (so Prof. Dr. J. Nebelsick, Invertebraten-Paläontologie, Universität Tübingen, mündlich), Herrn Dr. G. Schweigert (Staatliches Museum für Naturkunde, Stuttgart), und dass er bereit war, alle auf und in den untersuchten Hornsteinen erkennbaren Fossilien zu bestimmen. Und damit nicht genug, er gab mir den Tip, doch auch eine Unterscheidung der Hornsteine mittels Schwammnadelgehalt zu versuchen, worauf er ihren ungefähren Gehalt mittels „Feuchtfingerprobe“ einschätzte. Auch der Vorschlag für den Nachweis der Schwammnadeln durch je einen Dünnschliff je Fundort und Aufnahmen davon mittels Polarisationsmikroskop stammen von ihm. Herzlichen Dank für den großen Einsatz.
Die Aufnahmen mit dem Polarisationsmikroskop konnte ich bei Herrn Dr. U. Neumann (Petrologie, Universität Tübingen) machen. Danke für die Hilfe dabei, ebenso für die Bereitschaft, geologische Fragen zu beantworten.
Anleitung und Unterstützung bei der praktischen Arbeit bekam ich auf vielfältige Weise: beim Zersägen der Hornsteine von Frau I. Gill-Kopp (geowissenschaftliches Präparationslabor, Universität Tübingen), ebenfalls von ihr wurden die schönen Dünnschliffe gefertigt; beim Schmelzen der WDRFA-Tabletten war stets Herr B. Steinhilber (Isotopengeochemie, Universität Tübingen) Ansprechpartner und vor Ort; Herr Dr. H. Taubald (Isotopengeochemie, Universität Tübingen) führte die Messungen am WDRFA-Gerät mit internationalen Standards durch und druckte die Ergebnisse aus; Frau G. Stoschek (Isotopengeochemie, Universität Tübingen) führte mich in die Fluoridmethode ein und bestimmte die $\delta^{18}O$-Werte von 30 Hornsteinen. Ihnen allen gilt mein besonderer Dank.
Bei der statistischen Arbeit hatte ich mich mit vielen Fragen und mancherlei Unsicherheiten auseinanderzusetzen. Wichtige Ratschläge kamen hier von Frau Dr. S. Harris und Frau Dr. C. Knipper, besonders aber von Herrn Prof. Dr. H.-U. Pfretzschner (Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen), der mir auch vorschlug, es bei diesem Datenmaterial mit der Diskriminanzanalyse zu versuchen. Wenn ich wieder einmal nicht weiterkam, war Frau J. Hinz (M.A., am Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen) eine stets geduldige Ansprechpartnerin, die manches Problem löste und mir damit weiterhalf. Herr A. Kögl (M.A.), SPSS-Dozent des ZDV (Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen), war freundlicherweise bereit, den statistischen Teil meiner Arbeit auf Richtigkeit durchzusehen. Bei allen bedanke ich mich herzlich. Ein weiterer ganz besonderer Dank geht zusätzlich an Herrn Prof. Dr. H.-U. Pfretzschner, der in der Zeit zwischen der Abgabe der Voten und der Promotionsprüfung die ganze Arbeit gelesen und wichtige Teile der Statistik noch einmal durchgerechnet hat.
Während der Zeit meiner Doktorarbeit hatte ich viele wissenschaftliche Fragen und Probleme. Stets bekam ich Antwort, Rat und Unterstützung von Frau Dr. C. Knipper (Anthropologie, Universität Mainz) und vor allem in vielen Besprechungsstunden zu geochemischen Details von Herrn Dr. H. Taubald (Isotopengeochemie, Universität Tübingen). Ganz besonders herzlich bedanke ich mich bei beiden, die außerdem das Durchsehen der fertigen Arbeit übernahmen.
Dankbar war ich auch für kurze Gespräche mit Herrn Prof. Dr. Th. Aigner (Sedimentgeologie, Universität Tübingen), Herrn Dr. Ch. Berthold (Angewandte Mineralogie, Universität Tübingen), Herrn Dr. M. Martin (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg), Herrn

Prof. Dr. M. Kučera (Mikropaläontologie, Universität Tübingen), Herrn Prof. Dr. J. Nebelsick (Invertebraten-Paläontologie, Universität Tübingen), Herrn Prof. Dr. R. Schönberg (Isotopengeochemie, Universität Tübingen) und Herrn Dr. M. Wille (Isotopengeochemie, Universität Tübingen).
Am Verlauf der Arbeit stets interessiert zeigten sich Frau Prof. Dr. L. E. Fisher (Anthropologie, Universität Springfield, Illinois), Herr Prof. Dr. E. Pernicka (Archäometrie, Universität Tübingen), Herr Prof. Dr. Dr. h. c. M. Satir (Geochemie, Universität Tübingen) und Herr Dr. R. Schreg (RGZM, Mainz). Mancher gute Vorschlag stammte von ihnen, danke.

Bei Frau Chr. Geier und besonders bei Herrn D. Alexander bedanke ich mich, dass sie das Layout und ein weiteres Korrekturlesen der Arbeit übernommen haben.

Der ganz besondere Dank gilt meinem Mann Dieter, ohne seine Zuwendung hätte ich die Arbeit nicht schreiben können. Er hat die zeitlichen und psychischen Belastungen dieser Zeit mit Humor getragen und uns stets, als neuer Küchenchef des Hauses, mit kulinarischen Leckerbissen bei Stimmung gehalten. Er war es auch, der diese Arbeit Korrektur gelesen hat.

Anne Marie Bertsch (a.d.bertsch@t-online.de)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 1

1.1 Forschungsgeschichte der Trennung von Hornsteinen und Cherts verschiedener Fundorte mittels geochemischer Analysen 2

1.2 Ziele, Fragen und Methoden der Arbeit 5

2 Fundorte der untersuchten Hornsteine und Cherts 7

2.1 Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim 7

2.2 Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis 12

2.3 Wippingen „Höfermahd“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis 15

2.4 Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis 17

2.5 Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Urach, Kreis Reutlingen 19

2.6 Ungarische Cherts 22

2.7 Zusammenfassung 22

3 Zusammenfassende Beschreibung der untersuchten Hornsteine 24

3.1 Grundformen 25

3.2 Qualität 27

3.3 Farbe und Musterung 28

3.3.1 Sägeschnittfärbung 28

3.3.2 Musterungen 31

3.3.3 Patina 35

3.4 Cortex 36

3.4.1 Cortexdicke 36

3.4.2 Cortexfarbe 38

3.4.3 Cortexpatina 40

3.4.4 Glanz 41

3.5 Fossilien 45

3.5.1 Fossilien auf dem Cortex 45

3.5.2 Fossilien im Hornsteininneren 49

3.6 Zusammenfassung 54

4 Untersuchung der Hornsteine mittels Sauerstoffisotopie ($\delta^{18}O$) 58

4.1 Prinzip der Sauerstoffisotopie 58

4.1.1 Sauerstoff-Isotopenfraktionierung im Wasser 59

4.1.2 Anwendung der Sauerstoffisotopie auf Hornstein 60

4.2 Bestimmung von $\delta^{18}O$ einiger Hornsteinproben 62

4.2.1 Aufbereitung des Hornsteins mit der Fluorid-Methode in der Silikatanlage 62

4.2.2 Bestimmung von $\delta^{18}O$ mit dem Massenspektrometer Finnigan MAT 252 66
4.3 Ergebnisse der sauerstoffisotopischen Untersuchungen 71
4.4 Hinweise auf die Hornsteinentstehung durch $\delta^{18}O$-Werte 73
4.4.1 Entstehung der schwäbischen und bayerischen Hornsteine 73
4.4.2 $\delta^{18}O$-Werte und Bildungstemperatur der Hornsteine 81
4.4.3 Streuung der $\delta^{18}O$-Werte desselben geologischen Zeitraumes 83
4.4.4 Tendenzielle Abnahme der $\delta^{18}O$-Werte mit dem Alter der Cherts 90
4.4.5 Entstehungszeitraum der Hornsteine und $\delta^{18}O$ 93
4.5 Zusammenfassung 95

5 Untersuchung von Hornstein mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse 97
5.1 Prinzip der Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) 97
5.2 Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (WDRFA) als Methode 101
5.2.1 Anregung der Probensubstanz 101
5.2.2 Dispersion der Fluoreszenzstrahlung im Spektrometer 103
5.2.3 Messung der Fluoreszenz mittels Detektoren 105
5.2.4 Periphere Datenauswertung 107
5.3 Bestimmung der elementaren Zusammensetzung des Hornsteins mittels WDRFA 108
5.3.1 Vorbereitungen für die WDRFA 108
5.3.2 Quantitative Bestimmung mit dem S4 PIONEER 111
5.4 Auswahl verwendbarer WDRFA-Daten 112
5.5 Trennung von Hornsteinfundorten durch binäre Diagramme 114
5.6 Zusammenfassung 118

6 Statistische Untersuchungen der WDRFA-Daten 119
6.1 Einige statistische Werte und ihre Definition 119
6.2 Untersuchung auf Normalverteilung 121
6.3 Ausreißerwerte, Extremwerte 124
6.4 Vergleich der Mittelwerte mittels ANOVA 126
6.5 Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung 129
6.6 Korrelationsanalyse 132
6.6.1 Korrelation in binären Diagrammen 132
6.6.2 Korrelationsanalyse nach Bravais und Pearson 133
6.7 Zusammenfassung 138

7 Trennung der Hornsteinfundorte durch multivariate statistische Methoden 140
7.1 Faktorenanalyse 140

7.1.1 Grundlegendes zur Faktorenanalyse ... 140
7.1.2 Faktorenanalyse der untersuchten Hornsteine insgesamt ... 142
7.1.3 Faktorenanalyse der Hornsteine einzelner Fundorte ... 145
7.1.4 Vergleich der Faktorenmittelwerte der vier Fundorte mittels ANOVA ... 148
7.2 Diskriminanzanalyse ... 153
7.2.1 Schritte der Diskriminanzanalyse ... 154
7.2.2 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse ... 155
7.2.2.1 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit allen Variablen ... 156
7.2.2.2 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit selektiv ausgewählten Variablen ... 158
7.2.3 Prüfung der Modellgüte der Diskriminanzfunktionen zur Trennung der verschiedenen Fundorte ... 161
7.2.4 Versuch einer Herkunftsbestimmung von Hornsteinen aus einem Siedlungskontext ... 163
7.3 Clusteranalyse ... 165
7.3.1 Schritte der Clusteranalyse ... 165
7.3.2 Ablauf des agglomerativen Verfahrens nach Ward ... 167
7.3.3 Ergebnis der Clusteranalyse ... 168
7.4 Zusammenfassung ... 170

8 Zusammenfassung und Ausblick ... 172

9 Abstract ... 176

10 Literatur ... 178

Anhang ... 197

Katalog ... 297

1 Einführung

Seit 2002 war eine Arbeitsgruppe der Universitäten von Illinois-Springfield (USA) und Tübingen mit Frau Prof. Dr. L. E. Fisher, Frau Dr. S. Harris, Frau Dr. C. Knipper und Herrn Dr. R. Schreg auf der Blaubeurer Alb tätig. Sie arbeiteten umfangreiche Sammlungsbestände auf und machten Geländebegehungen (Abb. 1). Reiche Oberflächenfundstreuungen brachten sie mit neolithischer Siedlungstätigkeit oder Abbau und Verarbeitung von Jurahornsteinen in Verbindung (Fisher & Knipper 2003; Knipper et al. 2005; Knipper et al. 2007; Fisher et al. 2008a; Fisher et al. 2008b; Harris et al. 2009). Nach geomagnetischen Sondagen, die archäologische Befunde möglich erscheinen ließen, wurden in Blaubeuren-Sonderbuch „Grund“ 2006 sieben kleine Testschnitte angelegt. Rotlehmreste, Reibsteine, Geräte mit Sichelglanz und Scherben früh- bis mittelneolithischer Keramik (vor allem Stichbandkeramik) wiesen auf eine Siedlung mit dauerhafter Anwesenheit von Menschen in einer rauen und wasserarmen Gegend hin. In Gruben reichlich vorhandenes Hornsteinrohmaterial sowie 60 Kerne, sehr große Kortexabschläge und Trümmer ließen an Erstverarbeitung denken (Knipper et al. 2007).

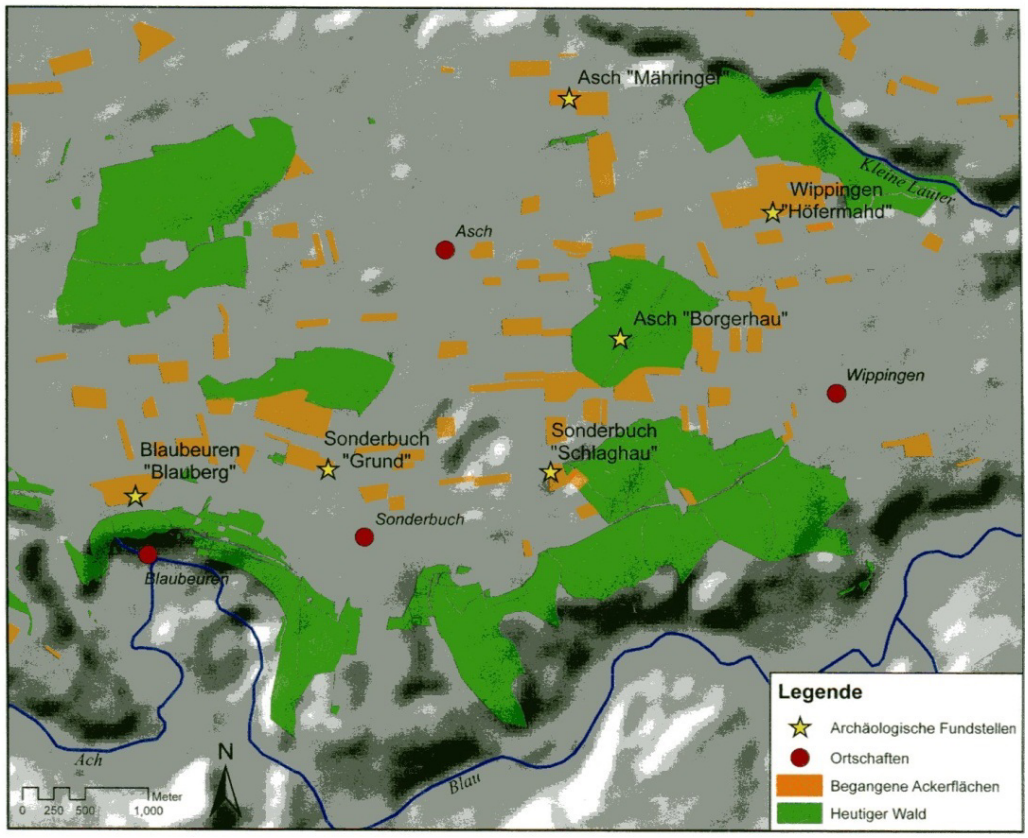


Abb. 1: Blaubeurer Alb. Lage der 2002-2008 begangenen Ackerflächen sowie der mit geomagnetischen Prospektionen, Bohrungen und Sondagen näher untersuchten Fundstellen (Harris et al. 2009 Abb. 15). Die Lage der Blaubeurer Alb zwischen Stuttgart und Budapest ist auf Abb. 2 zu sehen.

Bei Begehungen im Winter 2006/2007 entdeckten dann C. Knipper und R. Schreg ein jungsteinzeitliches Pingenfeld mit über 200 Gruben wieder, das im Wald „Borgerhau“, oberhalb von Blaubeuren, zwischen Asch und Blaustein-Wippingen, ca. 2,5 km von Sonderbuch

„Grund“ entfernt liegt (Abb. 1). Nach geomagnetischen Prospektionen wurden im Sommer 2007 sechs Sondageschnitte angelegt. Flache, aber auch tiefe, teilweise bis 2 m unter die heutige Geländeoberfläche reichende Gruben waren unterschiedlich verfüllt. Überall konnte eine Kombination von Hornsteinabbau und Ablagerung von Produktionsabfall der Steingeräteherstellung nachgewiesen werden. Geringe Anteile an Klingen und Werkzeugen legten nahe, dass Kerne und Grundformen möglicherweise zum Gebrauch und zur weiteren Bearbeitung von der Rohmaterialgewinnungsstelle wegtransportiert wurden (Fisher et al. 2008b). Damit war es klar, Hornsteingewinnung zog offensichtlich einst jungsteinzeitliche Menschen auf die raue südöstliche Alb. Das geschah übrigens noch früher, bereits zur Zeit der jüngeren linearbandkeramischen Kultur, wie sich 2008 bei Grabungen in Sonderbuch „Schlaghau“ herausstellte (Abb. 1) (Harris et al. 2009). Von der U.S. National Science Foundation, die das Forschungsprojekt förderte (Award BCS-0316125), kam die Anregung, Hornstein auch chemisch zu untersuchen.

1.1 Forschungsgeschichte der Trennung von Hornsteinen und Cherts verschiedener Fundorte mittels geochemischer Analysen

Zur optischen Zuordnung von Artefakten aus Jurahornstein und deren Rohmaterialquellen gibt es einige Untersuchungen, unter anderem von Burkert (1996; 2001); Strien (2000); Binsteiner (2001); Affolter (2002). Dagegen fehlen veröffentlichte, chemische Analysen süddeutscher Hornsteine mit diesem Ziel weitgehend. Das ist nicht verwunderlich, gehören doch Cherts allgemein zu den am schwierigsten zu untersuchenden und zu charakterisierenden unter den gewöhnlichen Gesteinen der Geologie (Morgenstein 2006).

Der englische Begriff *chert* steht für harte und dichte Gesteine mit muscheligem Bruch, die zur Herstellung von Werkzeugen dienten, umfasst also Hornstein und Feuerstein. Hornstein ist eine spezielle Verkieselungsform des Mesozoikums und kommt in der Trias-, Jura- und Kreidezeit der Alpen, des Schweizer Jura und des Schwäbischen und Fränkischen Jura vor (Hesse 1988; Hauptmann 1980, 8-10; Floss 1994, 104; Binsteiner 2006, 35; Markl 2008, 362).
In dieser Arbeit bezeichne ich alle anderen verwandten Rohmaterialien, die kein Hornstein sind, als Cherts.

Im Gegensatz zu den spärlichen Hornsteinanalysen zur Fundorttrennung gab es in den letzten 15 Jahren im englischsprachigen Raum durchaus erfolgreiche Versuche, SiO_2-reiche Steine, meist Cherts, verschiedener Fundorte mittels chemischer Analyse zu trennen. Fast alle denkbaren apparativen Möglichkeiten kamen dabei zum Einsatz: ED-RFA (Energie-Dispersive Röntgen-Fluoreszenz-Analyse), INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis), ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry), ICP-MS (Inductivly Coupled Plasma-Mass Spectrometry), LA-ICP-MS (Laser Ablation-ICP-MS) und PGAA (cold neutron Prompt Gamma Activation Analysis).
Zur statistischen Auswertung der chemischen Analysen wurden binäre Diagramme, Streudiagramme, PCA (Principal Component Analysis) und Clusteranalyse verwendet.

Malyk-Selivanova et al. (1998) beschäftigten sich mit Cherts in Schichten aus dem unteren Jura, der Trias, dem Perm und dem Karbon (Mississippian) in Schiefer, Dolomit und Kalk in Nordwest-Alaska. Die Gruppe fand in den Cherts aus Fundstellen verschiedenen geologischen Alters und stratigraphischer Schichten verschiedene geochemische Signaturen. Es wurden 289 Artefakte von 57 prähistorischen Fundorten mit 12 Chert-Variationen aus neun Aufschlüssen in den westlichen Brooks Range verglichen. Die chemischen Daten wurden durch INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) erhoben. Von den INAA-Daten wurden statistisch für einzelne geologische Fundstellen signifikante Elemente (*Na, Ba, Cs, Mn, Fe, Sr, Sc, Sb, Th, Hf, U*) oder Elementverhältnisse (*Ba/Al, La/Al, Co/Fe, Rb/Sr, U/Th, Th/Sc, Eu_n/Sm_n, La_n/Ce_n, Ce_n/Ce_n*, La_n/Ce_n*[1]), Mittelwerte und die Standardabweichungen 3σ, 2σ und 1σ bestimmt und in binären Diagrammen dargestellt. In einem nächsten Schritt konnten die Artefakte über ihre INAA-Werte, die sich innerhalb des 3σ-Bereichs im binären Diagramm bestimmter Elementkombinationen der geologischen Fundstelle befanden, dieser zugeordnet werden. Das war für 20 % der Artefakte erfolgreich. Insgesamt konnten vier Aufschlüsse sicher mit 51 Artefakten so in Beziehung gebracht werden, dass sie als prähistorische Steinbrüche gelten können.

Dello-Russo (2004) untersuchte 22 Proben aus zwei prähistorischen Steinbrüchen in New Mexiko/USA und elf Pfeilspitzen aus dem Early Archaic (4800-3200 v. Chr.) und dem Late Archaic (1800-800 v. Chr.) mittels XRF (X-Ray Fluorescence). Es handelte sich um Rhyolit aus dem Oligozän, einem vulkanischen Material mit ca. 70-77 % SiO_2 (Markl 2008, 293). Das Material der beiden Steinbrüche konnte vor allem auf Grund des Bleigehaltes chemisch unterschieden und dies in bivariaten Diagrammen (*Pb* vs. TiO_2 bzw. *Ga, Nb* und *Zr*) dargestellt werden. Zwei der elf Projektilspitzen konnten eindeutig dem Black Canyon Steinbruch zugeordnet werden, dagegen war die Zuordnung von sieben Steinspitzen zum Sedillo Hill Steinbruch unsicher.

Morgenstein (2006) verglich jeweils sieben beziehungsweise 15 Chert-Artefakte zweier archäologischer Fundorte in den USA und jeweils deren potentielles Rohmaterial dafür durch geochemische Analysen mittels ICP (Inductivly Coupled Plasma) und ICP-MS (ICP- Massenspektrometrie). Die Nachweisgrenzen lagen für die ICP bei 0,01 % bzw. 10 ppm, für ICP-MS bei 0,1 ppm. Der erste Fundort war die Elko-Formation in Nord-Nevada, tertiär und im Kalk gelegen; der zweite Fundplatz lag auf einer oberen Pleistozänterrasse am Tolt River östlich von Seattle, Washington, in Gestein teilweise vulkanischen Ursprungs. Es erfolgte kein chemischer Vergleich der Cherts beider Fundorte. Entsprechend ihrer unterschiedlichen Geologie wurden verschiedene chemische Elemente und Methoden jeweils für die Zuordnung von Chert und potentiellem Rohmaterial erfolgreich verwendet:

- Elko-Fundplatz: Clusteranalyse mit zehn Elementen (*Ca, Al, Ba, Sr, Cs, Ce, La, Nd, Th, U*): sechs der sieben Artefakte bildeten mit den sechs geologischen Proben ein gemeinsames Cluster; eine Streudiagrammanalyse mit drei Elementen (*Cs, Th, U*) bestätigte das Ergebnis.

[1] $Element_n$ bedeutet Normalisierung in Bezug auf den durchschnittlichen, nacharchaischen australischen Schiefer (PAAS).

- Tolt-Fundplatz: weniger klare Trennung verschiedener Cherttypen (geologisch und archäologisch) in 2 Streudiagrammen mit zwei mal drei Elementen (*Ca, K, U; Fe, Cu, V*).

Evans et al. (2007) untersuchten je fünf „black chert" von vier geologischen Fundorten im Kalk der nördlichen und südlichen Peninnes Englands und versuchten diesen je fünf Proben von zwei archäologischen Fundstellen zuzuordnen. Zur chemischen Analyse verwendeten sie ICP-AES, ICP-MS (ICP-Mass Spectrometry) und LA-ICP-MS (Laser Ablation-ICP-MS) für dieselben Proben mit unterschiedlichen Ergebnissen, wobei von den drei Analysenmethoden die Ergebnisse der LA-ICP-MS und ICP-MS besser übereinstimmten. Zur Unterscheidung der geologischen Fundorte wurde die PCA (Principal Component Analysis) verwendet, was zu sehr guten Trennungsergebnissen führte. Zudem konnten die vier geologischen Fundstellen durch ein bivariates Diagramm der ICP-MS-Werte (*Sr* vs. *Mn*) getrennt werden. Bei dieser Untersuchung fällt auf, dass die geologischen Fundstellen sehr homogen erscheinen. Etwas höhere *Sr*- und *Mn*-Konzentrationen und die Aussage von Evans et al., dass „black chert" nicht ganz Flintqualität besitze, könnten die Annahme unterstützen, dass „black chert" nur ca. 90 % SiO_2 enthalten. Leider fehlen dem Artikel Tabellen zur chemischen Zusammensetzung der „black chert". Von den zehn Proben archäologischer Fundstellen konnte eine einer geologischen Fundstelle zugeordnet werden.

Kasztovszky et al. (2008) beschäftigten sich mit der chemischen Zusammensetzung von insgesamt 100 Artefakten und Rohmaterialproben verschiedener Silices. Sie bestanden aus Flint und anderen archäologisch wichtigen Materialien wie Limnoquarzit, Radiolarit, „hornstone" (Silex aus der Trias), ferner felsigem Porphyr und Obsidian, außerdem modernen Schlacken. Für die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung verwendete die Gruppe PGAA (cold neutron Prompt Gamma Activation Analysis), eine zerstörungsarme Methode. Die Messwertgrenze lag für die Elementoxide zwischen 0,001 % (TiO_2) und 0,6 % (SiO_2), für die Spurenelemente zwischen 0,06 % (*S*) und 0,000007 % (*Gd*). Mit den Konzentrationen der untersuchten Elementoxide und Elemente und der PCA (Principal Component Analysis) als statistischer Methode konnte Obsidian von Flint zusammen mit anderen, archäologisch wichtigen Materialien sicher getrennt werden, nicht jedoch Flint von Limnoquarzit, Radiolarit, „hornstone" und felsigem Porphyr. Im binären Diagramm (K_2O vs. SiO_2) ließen sich die stark SiO_2-haltigen „hornstone", Radiolarite und Limnoquarzite von felsigem Porphyr abtrennen. Mediterraner Obsidian ließ sich von karpathischem mittels PCA trennen.

Burke & Gaulthier (2011) überprüften, inwieweit 24 Artefakte von sechs Fundorten und geologisches Material eines Steinbruchs aus der Kreide im südlichen Quebec in ihrer Zusammensetzung übereinstimmten. Sie waren unter Verwendung von ED-RFA (Energie-Dispersive Röntgen-Fluoreszenz-Analyse) und INAA vor allem auch deshalb erfolgreich, da Hornfels, ein archäologisch weniger wertvolles Material, nur zu ca. 65 % aus SiO_2 besteht, also zu etwa 35 % aus weiteren chemischen Elementen.

Dem süddeutschen Jurahornstein näher kommt die Arbeit von *Postl et al. (2007)*, welche die im äußerlichen Erscheinungsbild ähnlichen Plattenhornsteine einer kupferzeitlichen Siedlung

mit Hornsteinverarbeitungsstätte in Rein bei Graz und prähistorisch genutzte Hornsteine aus Baiersdorf bei Erlangen (Fränkische Alb) chemisch und über den Fossilgehalt zu unterscheiden versuchten. Erste Versuche mittels RFA waren nicht erfolgreich, dagegen konnten mit der LA-ICP-MS die Konzentrationen der Spurenelemente Lithium (*Li*) und Bor (*B*) genügend genau bestimmt werden (Nachweisgrenze ca. 0,1 ppm). Gerade diese beiden Elemente *Li* und *B* sind in Hornsteinen aus Meerwasser (Baiersdorf) um ca. eine Größenordnung höher konzentriert als in Hornsteinen aus Süßwasser (Rein), was die Trennung ermöglichte.

Mit der chemischen Trennung von süddeutschen Jurahornsteinen beschäftigten sich *Bressy & Floss (2006)* erstmals in der Literatur. Acht Proben Jurahornstein und vier Proben Bohnerzhornstein von sieben süddeutschen Fundorten sollten testweise getrennt werden. Es wurden mit der minimal-invasiven Technik der LA-ICP-MS die relativen Konzentrationen an Spurenelementen der geologischen Proben bestimmt, vor allem von *Rb, Zr, Nb, Hf, Pb, U* und *REE* (seltene Erden) und die Ergebnisse mittels binärer Diagramme dargestellt.

Die Trennung von Gesteinen verschiedener Fundorte, die der Herstellung von Artefakten in der Vergangenheit dienten, waren immer dann, soweit überschaubar, erfolgreich, wenn

- der SiO_2-Gehalt < 80 % und somit der Gehalt der übrigen chemischen Elementoxide und Elemente ca. 20 % erreichte (Rhyolit, Hornfels, Obsidian, Porphyr) (Dello-Russo 2004; Kasztovszky et. al. 2008; Burke & Gaulthier 2011)
- bei einem SiO_2-Gehalt > 95 %, wenn Cherts in sehr unterschiedlicher geologischer Umgebung gebildet wurden:
    - in Süßwasser beziehungsweise in Meerwasser (Postl et al. 2007)
    - vulkanischen oder nicht vulkanischen Ursprungs (Kasztovszky et al. 2008)
    - in Kalk- oder Silikatgestein (Malyk-Selivanova 1998)

Allgemein besteht nicht nur in Deutschland die Meinung, dass die chemische Variabilität des Hornsteins innerhalb einer Fundstelle größer ist als zwischen verschiedenen Fundstellen, und dass eine Trennung von Hornstein aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung aussichtslos erscheint (Mommsen 1986, 134; Kuleff & Djingova 1990, 463; Affolter 2002, 21; Kasztovsky et. al. 2008; Binsteiner 2008, persönliche Kommunikation).
Diese Arbeit ist die erste, neben dem Versuch von Bressy & Floss (2006), die sich vorgenommen hat, süddeutsche Jurahornsteine aus einem relativ eng begrenzten Gebiet und mit einer durchschnittlichen SiO_2-Konzentrationen von 98 % chemisch zu trennen.

1.2 Ziele, Fragen und Methoden der Arbeit

Das Hauptziel dieser Arbeit war, optische und chemische Merkmale zu finden, die der Unterscheidung von Jurahornsteinen verschiedener Fundorte dienen könnten.

Dabei waren die Fragen zu klären,

- welche der optischen Merkmale sich besonders zur Unterscheidung von Jurahornsteinen eignen,
- welche der mittels WDRFA bestimmten chemischen Elementoxide und Elemente verwendbar sind, und ob es für eine Trennung bevorzugte Elementoxide und/oder Elemente gibt,
- ob und inwieweit der $\delta^{18}O$-Gehalt von Jurahornsteinen sozusagen als Marker eine Unterscheidung der Jurahornsteine ermöglicht,
- welche der möglichen statistischen Verfahren sich für eine Trennung eignen und wie sicher deren Ergebnisse sind.

Als Nebenziel dieser Arbeit entwickelte sich im Laufe der Zeit die Frage nach der Entstehung der schwäbischen und bayerischen Hornsteine unter Einbeziehung der $\delta^{18}O$-Werte.

Das Fernziel, dem diese Arbeit näher kommen möchte, ist eine relativ sichere Zuordnung von Artefakt und Herkunftsort des Rohmaterials und damit die Erforschung vor allem auch jungsteinzeitlicher Handelswege.

Folgende Methoden standen für die Untersuchungen zur Verfügung:

- Beobachtung und Vergleich optischer Merkmale, einige Dünnschliffe und Aufnahmen davon mit dem Polarisationsmikroskop Leica Laborlux 12 Pol S
- Wellenlängen-dispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (WDRFA) mit dem Bruker AXS S4 PIONEER als eine relativ genaue Methode zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Hornsteine
- $\delta^{18}O$-Bestimmung: Freisetzung des Sauerstoffs mit der Fluoridmethode, Messung von $\delta^{18}O$ mit dem Massenspektrometer Finnigan MAT 252 als Methode zur Bestimmung von Temperaturunterschieden während der Hornsteinbildung, hier auch als Möglichkeit zur Trennung von Hornsteinfundorten gedacht
- Statistische Untersuchungen der Hornsteindaten mit Excel, WinSTAT für Excel und SPSS 19

Es handelt sich hier um eine Grundlagenarbeit, die letztlich auch die Frage klären soll, ob die Anlage einer chemischen Datenbank zur Unterscheidung von Hornsteinen sinnvoll ist.

2 Fundorte der untersuchten Hornsteine und Cherts

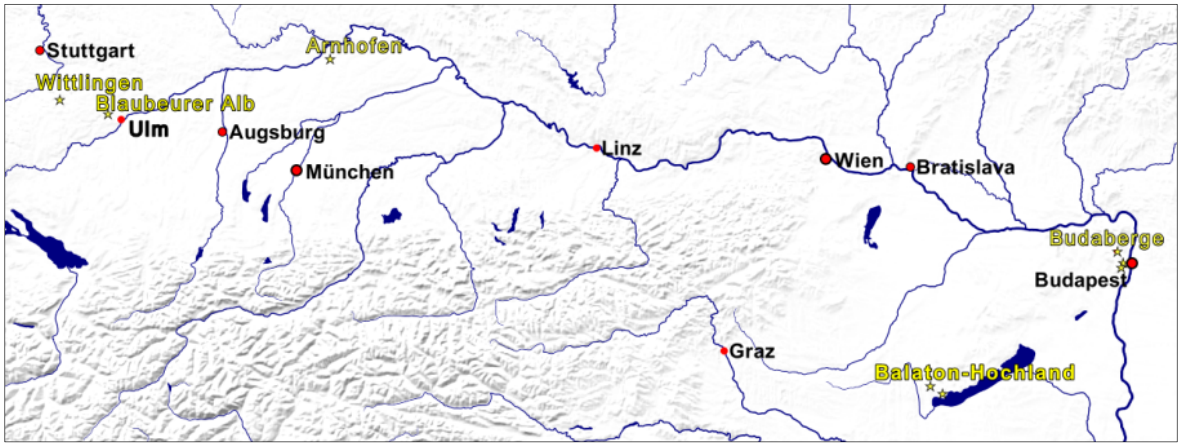


Abb. 2: Fundortbereiche der untersuchten schwäbischen, bayerischen Hornsteine und der ungarischen Cherts (in gelber Schrift) (Digitale Kartengrundlage: Map Creator 2.0).

Untersucht wurden 75 Hornsteine, davon kamen 40 von der Blaubeurer Alb, 15 aus dem knapp 30 km entfernten Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach und weitere 15 aus dem ca. 160 km Luftlinie entfernten bayerischen Abensberg-Arnhofen „Steinbruch Rind“. Zum internationalen Vergleich wurden fünf Trias-Cherts verschiedener Fundstellen in Ungarn untersucht. Die Hornsteine der Blaubeurer Alb ihrerseits kamen von drei verschiedenen Stellen: 20 Hornsteine aus dem neolithischen Pingenfeld Asch im „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, 15 Hornsteine aus dem ca. 1,5 km Luftlinie davon entfernten Wippingen „Höfermahd“, Gemeinde Blaustein, und fünf aus der jungsteinzeitlichen Siedlung Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, mit Entfernungen von ca. 2,5 km vom „Borgerhau“ und ca. 4 km von „Höfermahd“ (Abb. 1). Alle untersuchten süddeutschen Fundplätze liegen im Oberen Massenkalk des Oberjura, bestehend aus Liegender Bankkalk-Formation, Zementmergel-Formation und zum Teil Hangender Bankkalk-Formation (Gwinner 1974; 1980a; 1980b; 1998; Weber 1978a; 1978b; Geyer 1997a; 1997b; Villinger 2005).

Zunächst werden nachfolgend die einzelnen Fundstellen und deren Geschichte kurz beschrieben.

2.1 Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim

Es handelt sich um eine schon seit der Mitte des 19. Jh. bekannte und 1925 von Schnittmann beschriebene Fundstelle für gebänderten Plattenhornstein. Sie wurde 1933 von Deecke mit Hornsteinen nördlich der Donau, vom Ries bis zum Staffelstein am Main, in Beziehung gebracht (Binsteiner 2005, 44). Dass in Arnhofen Hornstein abgebaut worden war, hatte M. Moser schon 1972 entdeckt. 1981 veranlasste B. Engelhardt dann die erste Notaufnahme eines Schachtes in einer der Abbauwände der damaligen Kies- und Sandgrube Buchenrieder und

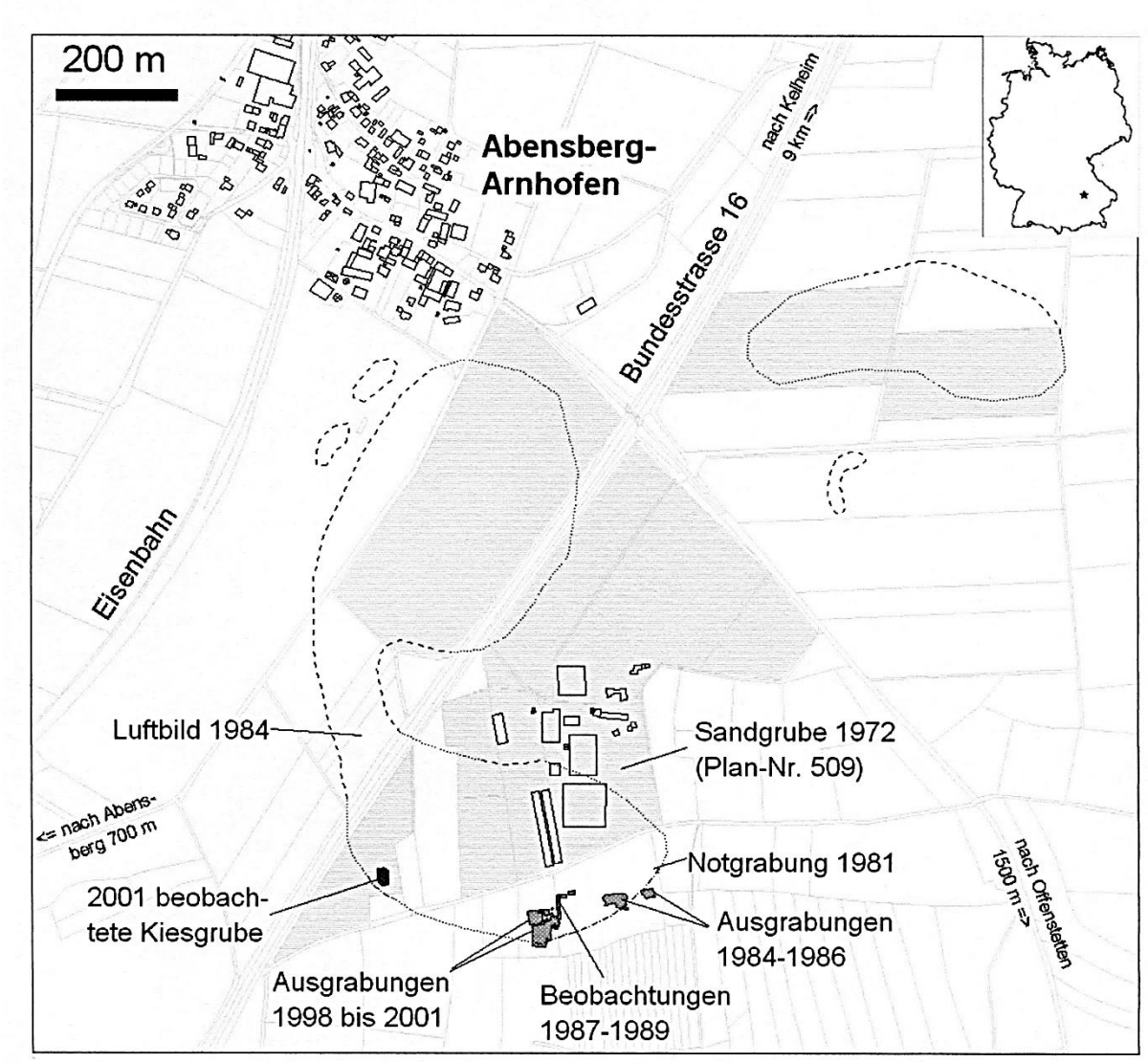


Abb. 3: Abensberg-Arnhofen. Ausdehnung des Bergwerkes und Lage der Grabungen bis 2001. Hellgrau gerastert wurde der Bereich der Baumschule (2003), dunkelgrau gerastert wurden die bis 2001 beobachteten und ergrabenen Flächen. Die Grenzen des Bergwerkes wurden teils durch Grabungen (Strichpunktlinie), teils durch Luftbilder (gestrichelte Linie) bestimmt; in Bereichen ohne Erkenntnisse wurde die minimale Ausdehnung kartiert (feine Punktlinie) (Roth 2008, 24 Abb. 1.5. Kartengrundlage: „Flurkarte" Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Ausschnitte der digitalen Flurpläne NO 34/10 und 33/10).

leitete daraufhin die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen des Hornsteinabbaureviers ab 1984 (Gayck 2000, 264; Eisele & Rind 2001; Binsteiner 2005, 47; 62; Rind 2006; Roth 2008, 12). Aufgrund von Geldmangel wurden 1986 die laufenden Arbeiten durch das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege in München eingestellt. Auf Eigeninitiative und mit Eigenmitteln begleitete A. Binsteiner 1987-1989 den weiteren Sand- und Kiesabbau archäologisch (Binsteiner 2005, 62). Nachdem 1998 wieder eine Abbaugenehmigung für die Sand- und Kiesvorkommen erteilt worden war, leitete die Kreisärchäologie Kelheim unter M. M. Rind sofort erste Notbergungen der angeschnittenen Schächte ein. Gemeinsam mit den Universitäten Frankfurt und Köln wurden die Arbeiten im Rahmen eines DFG-Projektes fortgeführt. Bis

zum Jahr 2000 kamen zu den 55 bereits bekannten Schächten noch mindestens 193 weitere hinzu (Binsteiner 2005, 62 f.; Eisele & Rind 2001; Roth 2008, 221).



Abb. 4: Abensberg-Arnhofen. Blick 2001 von Ost nach West auf mehrere Befundsplana in der Kiesgrube „Brandl“. Im Vordergrund Querschnitte durch die neolithischen Schächte; im Hintergrund die mit Büschen bestandene Parzelle „Buchenrieder“ (Roth 2008 Abb. 18, Ausschnitt).

In allen jungpaläolitischen Phasen im südlichen Mitteleuropa wurde Arnhofener Hornstein genutzt; die mesolithische Nutzung ist auch am 200 km entfernten Ullafelsen in Tirol bekannt (Roth 2008, 77). Bislang ist nur der Südostrand des Bergwerkes ausgegraben (Abb. 3; Abb. 4). Ob und wo das Hornsteinflöz im Bergwerksgelände an die Oberfläche kam, ist umstritten (vgl. Binsteiner 2005, 65; Roth 2008, 34 f.). Der Abbau des Hornsteins im Neolithikum begann vermutlich im Nordwesten in Tiefen von 3-4 m. Der daraus folgende Abbautypus eines trichterförmigen Pingenbaues konnte am Nordrand der Ausgrabungsflächen nachgewiesen werden. Umstritten ist, ob es, durch tektonische Ereignisse bedingt, zu meterhohen Versätzen der Jurakalke kam oder ob das Hornsteinflöz durch Verkarstung (und Dolinenbildung) horizontal einen stark unregelmäßigen Verlauf nahm (vgl. Binsteiner 2005, 66; Roth 2008, 34 f.). Der Pingenbau ging dann offensichtlich unmittelbar in einen Duckelbau (ohne unterirdische horizontale Gänge) mit Schächten bis 8,20 m Tiefe und 0,7-2 m Durchmesser über. Im höffigen Bereich erweiterten die Bergleute den Schachtdurchmesser auf bis zu 3 m. Nach dem Abbau wurden die Schächte vor allem mit Aushubmaterial bereits abgeteufter Schächte (tertiäre Sande und quartäre Schotter), dem auch minderwertiges Feuersteinmaterial untergemengt wurde, wieder verfüllt (Abb. 4) (Gayck 2000, 30-33; 268; Eisele & Rind 2001; Binsteiner & Ernstson 2001; Binsteiner 2005, 63; 65 f.; Roth 2008, 14). Anschaulich zeigt die schematisierte Blockdarstellung den Duckelbau (Abb. 5). In 8 km Umkreis befanden sich mehrere neolithische Siedlungen (Binsteiner & Ernstson 2001).

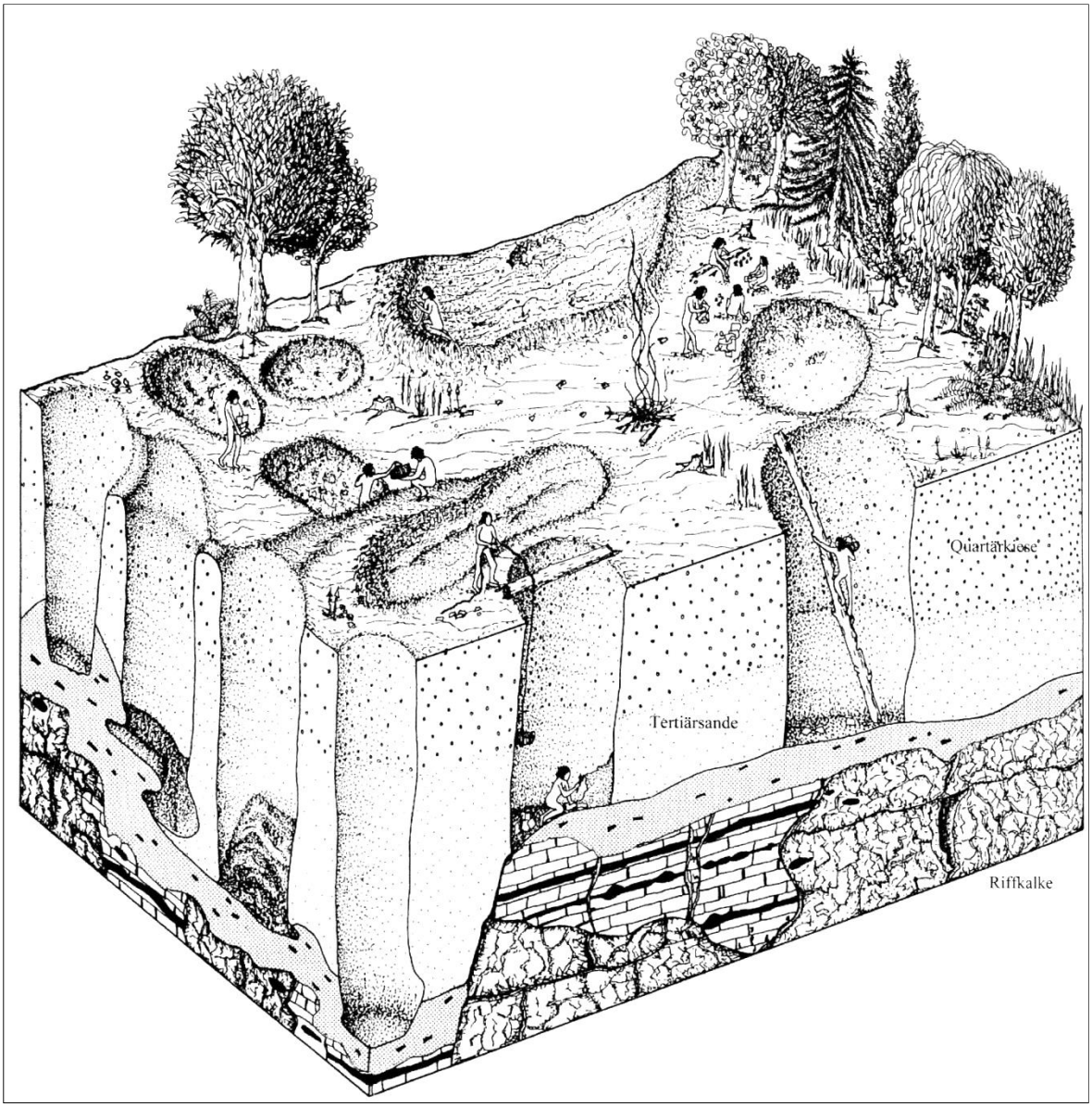


Abb. 5: Feuersteinbergwerk Abensberg-Arnhofen. Schematisierte Blockdarstellung des Schachtabbaus (Binsteiner 2006, Abb. 30).

Nach ^{14}C-Datierung begann der Abbau nach 5400 v. Chr. in der Zeit der Linienbandkeramik, er wurde nach 5000 v. Chr., an der Wende zum Mittelneolithikum, intensiviert. Zwischen 4700 v. Chr. und 4400 v. Chr. gab es fünf Rodungsphasen zur Erweiterung des Bergbaugeländes (Roth 2008, 75). Für das Mittelneolithikum (Stichbandkeramik und Oberlauteracher Gruppe) ist der stärkste Hornsteinabbau durch Artefakte in benachbarten Siedlungen bezeugt (Rind 2006). In das Jungneolithikum, spätestens 4100 v. Chr., wird die letzte Rodungsphase (zumindest im Grabungsgebiet) angesetzt (Roth 2008, 75); während der Münchshofener Kultur im Jungneolithikum endete der Hornsteinabbau in Arnhofen (Rind 2006). Die ^{14}C-Datierung einzelner Schächte ergab keine Hinweise auf eine zeitliche Abfolge der Schächte (Roth 2008, 66).

Den neueren Forschungen von 1998-2001 zufolge, muss mit einer Minimalfläche des Bergwerkes von ca. 40 ha gerechnet werden; je nach zugrunde gelegter Schachtdichte von mindes-

tens 11/Ar bis maximal 33/Ar, sind zwischen 44.000 und 132.000 bis ca. 8 m tiefe Schacht- und Grubenanlagen zu erwarten (Roth 2008, 26).

Der Arnhofener gebänderte Hornstein ist nicht nur wegen der teilweise sehr guten Qualität und der gewaltigen Menge, man rechnet mit 5.740 t (Roth 2008, 915) oder 13 Millionen bis maximal 80 Millionen Klingen (Binsteiner 2005, 63), bei den Archäologen auf großes Interesse gestoßen. Es ist vor allem auch die Tatsache, dass der Arnhofener Plattenhornstein, im Gegensatz zu fast allen anderen Hornsteinarten, aufgrund seiner Färbung und feinen planparallelen Bänderung optisch leicht und sicher bestimmbar ist (Binsteiner 2005, 97 Tab. 49; 98). So konnte festgestellt werden, dass er im Neckarland, im Rhein-Main-Gebiet, in Niedersachsen, Westfalen, Thüringen und Böhmen verbreitet war. Aber auch in Ober- und Niederösterreich, vor allem im Raum Linz und Melk, sowie im Bezirk Horn fand man ihn (Abb. 6) (Binsteiner 2006 Abb. 27).

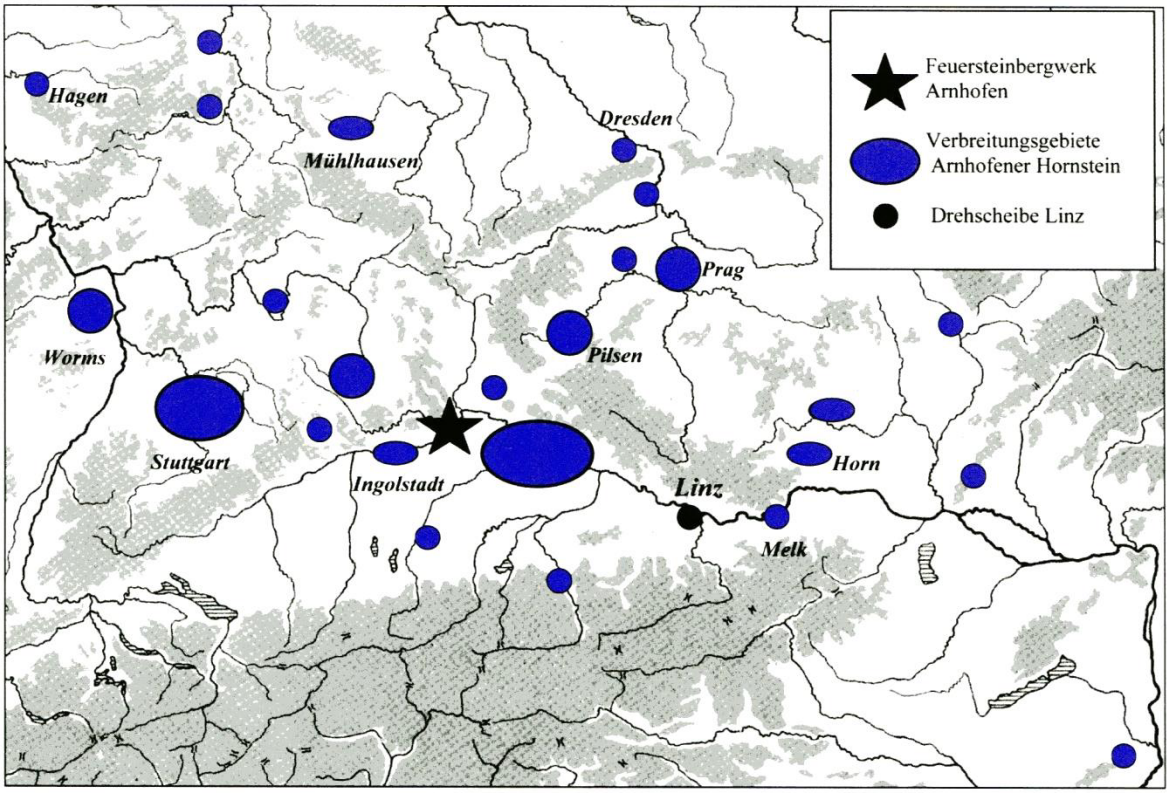


Abb. 6: Verbreitung des Arnhofener Hornsteins im Alt- und Mittelneolithikum (Binsteiner 2006 Abb. 27).

Aufgrund von Freiland- und Siedlungsfunden von Arnhofener Hornstein rekonstruierte A. Binsteiner mögliche Handelswege der Jungsteinzeit. Eine Hauptroute soll danach von Arnhofen entlang von Donau- und Regental in die Cham-Further Senke verlaufen sein (Binsteiner 2001; Binsteiner 2005, 131-139; Binsteiner 2006, 56-61).

Die untersuchten Hornsteine (Katalog: Arnh. 1 bis Arnh. 15) sind Lesefunde von der Sand- und Kiesgrube „Brandl“ in Abensberg-Arnhofen.

2.2 Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis



Abb. 7: Eintiefungen im Waldboden des Waldgebietes Asch „Borgerhau“, die Reste des jungsteinzeitlichen Gruben- und Pingenfelds (Foto L. Fisher).

Die Fundstelle „Borgerhau“ liegt etwa 2 km Luftlinie im Westen von Wippingen und ca. 1,5 km Luftlinie südwestlich der Fundstelle „Wippingen, Höfermahd“ (Abb. 1).
Es handelt sich um ein neolithisches Kuhlen- und Pingenfeld, das die Arbeitsgruppe um L. Fisher, S. Harris, C. Knipper und R. Schreg 2007 wieder entdeckte. Das Projekt zu seiner Untersuchung wurde von der U.S. National Science Foundation (Award BCS-0316125) gefördert (Fisher et al. 2008a).
Ein am Ostrand des Waldes „Borgerhau“ von J. von Föhr (1892, 32 f.) gefundener geschlagener „Feuerstein“ kann nicht als erste Erwähnung des „Borgerhau“-Waldgebietes als Abbaustelle für Jurahornstein gelten. Dagegen könnten die von ihm beobachteten, damals anders interpretierten, 25‘-60‘ tiefen Trichter[2] durch die neolithische Hornsteingewinnung entstanden sein. Die Beschreibungen dieser trichterförmigen Eintiefungen, von P. Goessler (1911, 37) bestätigt, sind jedoch keineswegs eindeutig einer Hornsteingewinnung zuzuordnen (vgl. Gayck 2000, 295).
1934 kamen bei der Anlage einer heute nicht mehr existierenden Baumschule im Südwestteil des Waldes riesige Mengen an Hornstein, darunter Artefakte, zum Vorschein. Zwischen 1956 und 1959 legte A. H. Nuber außerhalb der Baumschule im Osten drei Schnitte zur Klärung der Schichtverhältnisse an. In 20-25 cm Tiefe fand er Reibstein und Hammer aus der Jung-

[2] In der Annahme einer vereinfachten Schreibweise: 1‘ bedeutet hier 1 Zoll, wären das 0,65-1,56 m tiefe Gruben gewesen.

steinzeit, zwischen 20 und 45 cm Tiefe Makrolithen und Kern- und Scheibenbeile, zwischen 40 und 50 cm Tiefe Pickel und unter anderem einen „großen Mikrostichel“ und zwischen 50 und 65 cm Tiefe vorwiegend Mikrolithen, unterhalb von 75/80 cm nur noch natürliche Trümmer (Nuber 1962). Irrtümlicherweise wies A. H. Nuber (1962) die Artefakte einem „grobgerätigen Mesolitikum“ zu. L. Reisch erkannte 1974 dann aufgrund der meist derben Silexformen eine neolithische Schlagstätte und in den zahlreichen Gruben die Überreste eines intensiv durchgeführten Kuhlenbaus zur Gewinnung von Hornstein (Reisch 1974, 28; 74 f.; Seewald 1972a, 197; 1972b, 21; Weisgerber 1980, 450; Burkert 1996; Gayck 2000, 295; Fisher et al. 2008a; Fisher et al. 2013).

Im Winter 2006/07 fanden dann Corina Knipper und Rainer Schreg bei Begehungen im Wald „Borgerhau“ zwischen Asch und Wippingen obertägig sichtbare Abbauspuren von Hornstein und kartierten sie mittels Hand-GPS. Es handelt sich um rund 200 Gruben und Mulden verschiedener Größe sowie Halden, in deren Umfeld Bruchstücke qualitativ guten Jurahornsteins und Artefakte gefunden wurden (Abb. 7) (Fisher et al. 2008a).
Das Kuhlen- und Pingenfeld ist in den Verwitterungslehm eingetieft, der den Oberen Massenkalk des Oberjura überlagert. Der Obere Massenkalk besteht aus hellgrauem, ungeschichtetem Kalkstein und ist zum Teil als Schwammkalk mit eingeschalteten Korallen- und Riffschuttbänken ausgebildet (Geyer 1997a).
Im Sommer 2007 wurden dann auf fünf Flächen im Bereich kleiner Gruben und größerer Geländeunebenheiten geomagnetische Prospektionen durchgeführt. Zur näheren Beurteilung von Oberflächenstrukturen und geomagnetischen Störungen wurden in drei Arealen insgesamt sechs 1 m x 2 m große Sondageschnitte angelegt (Abb. 8) (Fisher et al. 2008a; Fisher et al. 2008b; Fisher et al. 2013).

Unter den durch Bodenbildung beeinflussten Sedimenten lagen jeweils tiefe, teilweise über 2 m unter die heutige Geländeoberfläche reichende Gruben, die zum Teil bis zu den hornsteinführenden Kalkverwitterungslehmen verfolgt werden konnten (Abb. 9). In jedem der drei Areale konnte eine Kombination von Hornsteinabbau (Eingrabung in hornsteinführenden Lehm) und Ablagerung von Produktionsabfall der Steingeräteherstellung nachgewiesen werden. Besonders Schnitt 2 zeigte eine flache Grube, die vollständig mit Steinartefakten wie Kernen, Abschlägen, Klingen, Trümmern sowie Hornsteinknollen und -bruchstücken verfüllt war (Abb. 10). Alle Stadien der Steingeräteherstellung, darunter auch sehr kleine Abschläge und Absplisse, waren vorhanden. Andere Schnitte hatten eine geringere Funddichte. Die Schnitte 3, 4 und 7 bildeten ein 6 m langes Profil (Abb. 8), sodass eine komplexe Abfolge verschiedener Gruben, die in den anstehenden Lehm eingetieft waren, dokumentiert werden konnte. Diese Störungen reichten bis 2,30 m unter die heutige Geländeoberfläche. Die obertägig sichtbaren Mulden sind demnach keine einzelnen Abbaugruben, sondern das Ergebnis einer komplexen Gruben- und Haldenlandschaft (Fisher et al. 2008a; Fisher et al. 2008b; Fisher et al. 2013).

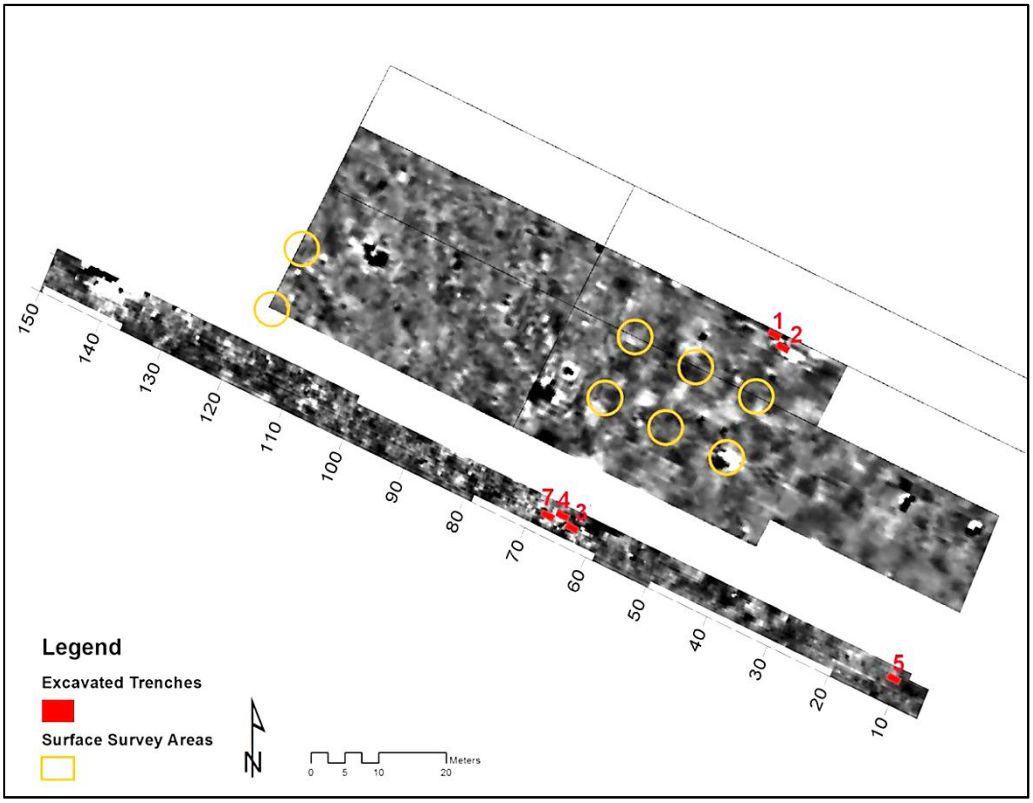


Abb. 8: Waldgebiet Asch „Borgerhau“. Grundlage:geomagnetischer Survey (Grautöne), eingetragen sind die Areale mit Oberflächenbegehung (gelb umrahmt) und die Grabungsschnitte (rot, mit Nummern versehen) (Grafik S. Harris).



Abb. 9: Blaubeuren-Asch „Borgerhau“, Schnitt 3. Profil durch die komplex verfüllten Grubenreste der Hornsteingewinnung (Fisher et al. 2008a, Abb. 19).



Abb. 10: Blaubeuren-Asch „Borgerhau“, Schnitt 2. Profil einer vollständig mit Abfällen der Steingeräteherstellung verfüllten Grube (Fisher et al. 2008a, Abb. 18).

Unter den ca. 106.000 Grundformen und modifizierten Stücken befinden sich 78,2 % nicht-modifizierte Abschläge, 13,1 % Trümmer und 5,2 % Klingen. Kerne sind mit 2,3 % vertreten. Die geringe Anzahl an Klingen und Werkzeugen (ca. 0,7 %) lassen vermuten, dass Kerne und Grundformen möglicherweise zum Gebrauch und zur weiteren Bearbeitung vom Ort der Rohmaterialgewinnung abtransportiert wurden. Die Tätigkeiten in Asch „Borgerhau“ waren also auf Rohmaterialgewinnung und Verarbeitung konzentriert (Fisher et al. 2008a; Fisher et al. 2008b; Fisher et al. 2013).
Mehrere Bruchstücke einer Michelsberger Tasse, zwischen den Schlagabfällen gefunden, datierten den Hornsteinabbau im „Borgerhau“ in das Jüngere Neolithikum (ca. 4000 – 3500 v. Chr.) (Fisher et al. 2008a; Fisher et al 2008b). ^{14}C-Datierungen von Holzkohle aus dem Kuhlen- und Pingenfeld im „Borgerhau“ zeigten, dass dort über einen sehr viel längeren Zeitraum Hornstein gewonnen wurde: ca. 5100-4800 v. Chr. (Alt-/Mittelneolithikum), 4000-3700 v. Chr. (Jungneolithikum), 3100-2700 v. Chr. (Jung-/Endneolithikum) und 2900-2350 v. Chr. (Endneolithikum) (Fisher et al. 2013 Abb. 5; Fisher et al. unveröffentlichte Daten). Hornsteinabbau ist im „Borgerhau“ demnach schon in der Zeit der Bandkeramik (Altneolithikum) und des frühen Mittelneolithikum, während der Michelsberger Kultur (Jungneolithikum) und bis in die Glockenbecher Kultur (Endneolithikum) hinein nachgewiesen (Knipper et al. 2005 Abb. 3).

Die untersuchten Hornsteine (Katalog: Borg. 1 bis Borg. 20) stammen aus allen drei Grabungsarealen und aus vier der Sondageschnitte.

2.3 Wippingen „Höfermahd“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis

Ch. Seewald berichtete 1972 von einem Platz nordnordwestlich von Wippingen, an dem „die einen längeren menschlichen Aufenthalt anzeigenden Feuersteinwerkzeuge“ der Jungsteinzeit gefunden wurden. Außerdem seien von verschiedenen Stellen in Wippingen Silexartefakte bekannt (Seewald 1972a, 197). 1989 nannte K. Wehrberger Blaustein-Wippingen als Fundplatz von großen Mengen oberflächlich zu Tage liegendem Hornsteinmaterial, vor allem Abfall der Artefaktherstellung (Wehrberger 1989, 89). Die Fundstelle „Höfermahd“ liegt etwa 1,5 km nordnordwestlich von Wippingen und etwa 1,5 km östlich vom „Borgerhau“ und könnte deshalb mit dem von Seewald berichteten Fundplatz identisch sein (Abb. 1). Sie liegt ebenso wie der „Borgerhau“ in den oberen Massenkalken des Malm (Oberjura). Der Kalkstein ist gleichfalls hellgrau und ungeschichtet, zum Teil ist er als Schwammkalk mit eingeschalteten Korallen- und Riffschuttbänken ausgebildet (Geyer 1997a).
Während der Oberflächenbegehungen durch die Arbeitsgruppe um L. Fisher, S. Harris, C. Knipper und R. Schreg in den Jahren 2002-2004 wurde ein hoher Prozentsatz retuschierter Werkzeuge und Abfall aus den Endstadien der Hornsteinverarbeitung in Wippingen „Höfermahd“ beobachtet (Knipper et al. 2005).

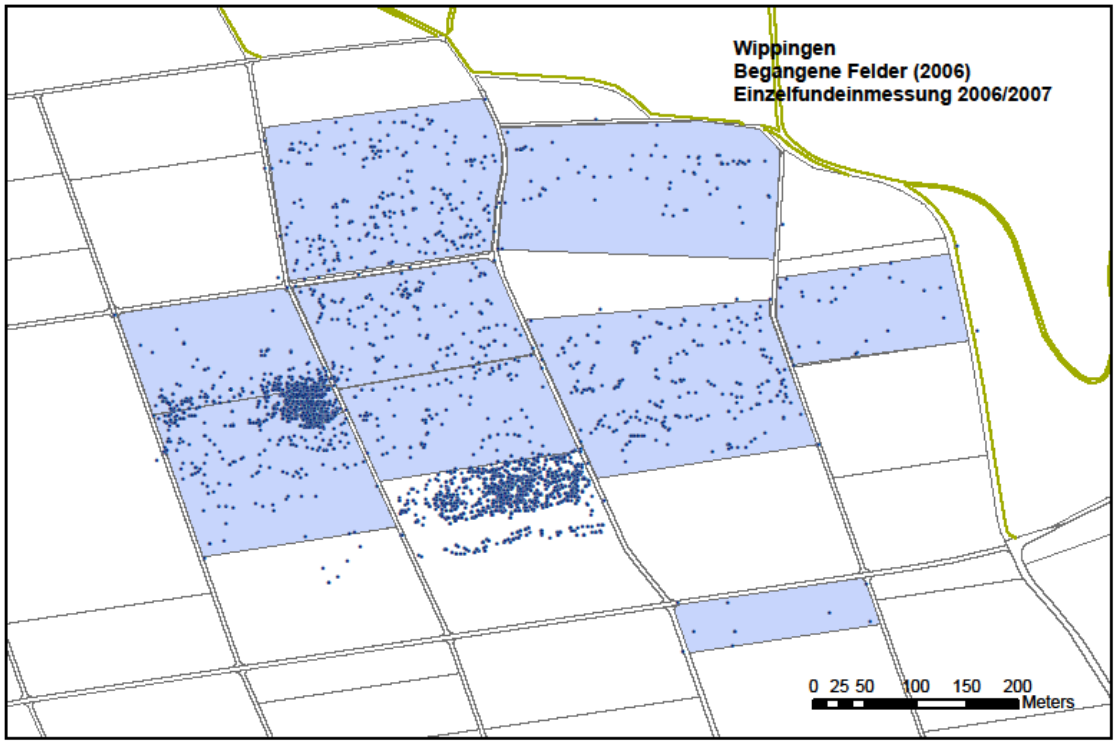


Abb. 11: Wippingen „Höfermahd“ . Begangene Felder (blau), Funddichte der Hornsteinartefakte als Punkte (Grafik C. Knipper).

Bei den Oberflächenbegehungen 2006 fand diese Gruppe auf anderen Äckern in Wippingen „Höfermahd“ eine hohe Funddichte von ca. 1200 Steinartefakten, zumeist aus der Grundproduktion, und dokumentierte über 200 Rohmaterialstücke (Abb. 11). Es war die Frage, ob es sich hier um eine Siedlung oder Rohmaterialstelle handelte. Geomagnetische Prospektionen zeigten im Bereich der Fundstellen jedoch nur wenige deutliche und einige eher unspezifische Anomalien. Im Bereich zweier kleiner Anomalien wurden jeweils kleine 1 m x 1 m große Testschnitte angelegt (Harris et al. 2009).
In einem der Schnitte wurden die erwarteten rohmaterialführenden Sedimente angetroffen (Abb 12). Das Sediment hat starke Ähnlichkeit mit den ebenfalls rohmaterialreichen Verwitterungslehmen in Asch „Borgerhau“. In den Wippinger Testschnitten ließ sich jedoch der Abbau von Hornstein bisher nicht belegen (Harris et al. 2009).



Abb. 12: Wippingen „Höfermahd“. Schnitt 2 mit Hornstein führenden Sedimenten (Foto C. Knipper).

Die untersuchten Hornsteine (Katalog: Wipp. 1 bis Wipp. 15) waren teils Lesefunde, teils stammten sie aus einem der Sondageschnitte.

2.4 Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis



Abb. 13: Sonderbuch „Grund“. Blick auf die Fundstelle (Fotomitte) mit leichtem Gefälle in Richtung eines Erdfalls (Foto C. Knipper).

Die Grabung liegt in einem Ackergelände, das in östlicher Richtung zu einer Doline einfällt (Abb. 13).
Kalksteine des oberen Massenkalks sind von kolluvialen Sedimenten und Verwitterungslehmen unterschiedlich hoch bedeckt (Gwinner 1980a).
W. Burkert benannte 1996 Sonderbuch als Fundort für Jurahornstein (Burkert 1996). Nach der Aufarbeitung umfangreicher Sammlungsbestände und nach Geländebegehungen über

mehrere Jahre ab 2002 durch die Arbeitsgruppe um C. Knipper, L. Fisher, S. Harris und R. Schreg (Knipper et al. 2005) und einer geomagnetischen Prospektion 2005 war es im Sommer 2006 soweit. Gefördert durch die National Science Foundation der USA (Award BCS-0316125) wurden an positiven Anomalien des Magnetogramms sieben kleine Sondagegrabungen (1 m x 1 m und 1 m x 2 m) ausgeführt (Abb. 14 und 15) (Knipper et al. 2007).





Abb. 14: Luftaufnahme der Sondagegrabungen in Sonderbuch „Grund“ (Foto R. Schreg).

Abb. 15: Grabungsfoto : Sondagegruben 2, 5, 6 (1 x 1 m und 1 x 2 m) (Foto C. Knipper).

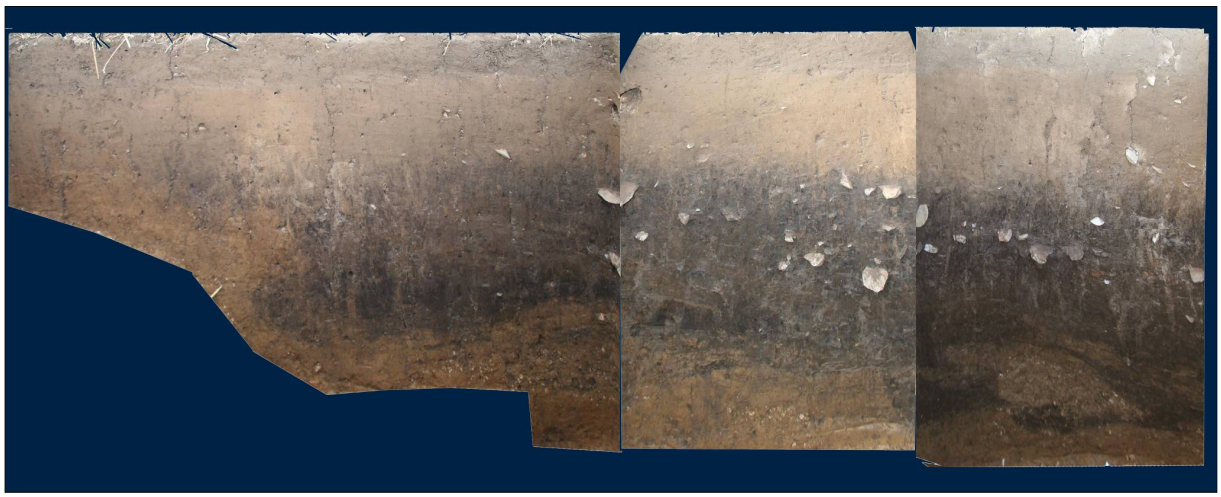


Abb. 16: Hausbegleitende Siedlungsgrube (dunkel), darüber Kolluvium. Fotomontage der Grabungsschnitte 2, 5 und 6 (Fotos und Fotomontage C. Knipper).

Dabei wurde in den Schnitten 2, 5 und 6 eine große Siedlungsgrube mit reichlich Fundmaterial erfasst (Abb. 16), ebenso in geringerem Umfang in der kolluvialen Überdeckung. Scherben der Stichbandkeramik und Oberlauterbacher Gruppe zeigen eine mittelneolithische Datierung an (^{14}C-Daten ca. 5050 – 4650 v. Chr.) (C. Knipper persönliche Kommunikation; Fisher et al. druckfertig). Ferner wiesen Keramik, Mahlstein und Schleifstein, sowie Geräte mit Sichelglanz auf Ackerbau und eine dauerhafte Anwesenheit des Menschen hin. Von den 7300 Artefakten des Steingeräteinventars gehörten 68,3 % zu den unmodifizierten Abschlägen, 15,6 % waren Klingen. Eine Erstverarbeitung von Jurahornstein nach dessen Gewinnung zeigten zahlreiche, sehr große Kortexabschläge und Trümmer an. 60 teilweise recht große Kerne, größtenteils aus den Grubenverfüllungen, spiegelten den Rohmaterialreichtum. Unter den 107 (1,5 %) modifizierten Artefakten überwogen die Bohrer mit 62 Stück, gefolgt von 19 lateral

retuschierten Stücken und 5 Kratzern. Knipper et al. schlossen daraus, dass die Steingeräteherstellung hier zwar eine entscheidende Rolle spielte, trotzdem aber die modifizierten Geräte, vor allem Bohrer, auch auf die Ausübung anderer Tätigkeiten hinweisen (Knipper et al. 2007).

Von Interesse ist jedenfalls auch die Frage, ob das Rohmaterial für die Steingeräte aus unmittelbarer Entfernung der Grabungsstelle (wenige hundert Meter), aus dem „Borgerhau“, aus Wittlingen oder ganz woanders herkam.

Die untersuchten Hornsteine (Katalog: Grund 1 bis Grund 5) waren Oberflächenfunde.

2.5 Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Urach, Kreis Reutlingen



Abb. 17: Fundstellen von Jurahornstein in der Gegend von Wittlingen. Die Gemarkung „Stuttgarter Teil“ ist grün markiert (Schreg 2008 nach Burkert et al. 1992, aktualisiert 2013. Kartengrundlage Google Maps digital).

Eine erste Nennung des Fundplatzes für bearbeiteten Jurahornstein in Wittlingen, oberhalb von Bad Urach, findet sich in den Fundberichten aus Baden-Württemberg 1975 (Keuerleber & Schiek 1975, 2). Bei dem Wittlinger Gewann „Stuttgarter Teil“ handelt es sich um einen schon seit längerem bekannten Fundort von Jurahornsteinen mit einer Größe von mehr als einem km^2. Artefakte aus dem Spätmittelpaläolithikum und vor allem aus dem Neolithikum wurden dort von Kind (1991), Burkert et al. (1992, 2; 19; 109 f.), Zimmermann (1995, 41) und Strien (2000, 14) gefunden. Der Fundplatz liegt in den Hangenden Bankkalken im Malm, der hier noch erhaltenen obersten Schicht des Jura. Die Hangenden Bankkalke sind in etwa

750 m Entfernung (Luftlinie) auch als Schwammkalke ausgebildet (Gwinner 1974). W. Burkert suchte 1990 die nähere Umgebung dieses Fundplatzes in einem Radius von 4 bis 5 km nach weiteren Rohmaterialvorkommen ab. Dabei entdeckte er sieben weitere Fundstellen in den liegenden Bankkalken und Zementmergeln (Abb. 17, blau mit Punkt markiert); davon waren drei Gewanne: „Ramschel“, „Mönchberg“ und ein Fundplatz 3,3 km östlich von Sirchingen besonders fundreich (Burkert et al. 1992, 6-8).



Abb. 18: Fossiler Kieselschwamm aus Wittlingen „Stuttgarter Teil“ (Fund S. Harris).

Die Fundstelle „Stuttgarter Teil“ wurde von Burkert et al. (1992, 2; 109) aufgrund von häufigen Artefaktfunden, meist in Form von Kernen und Abschlägen, als neolithischer Schlag- und Abbauplatz betrachtet. Auch heute noch findet man dort auf einigen Äckern große Mengen an Abfällen der Hornsteinverarbeitung und nur wenige Werkzeuge, was bei Oberflächenbegehungen 2009 und 2010 durch die Arbeitsgruppen um L. Fisher, S. Harris und C. Knipper bzw. um S. Harris bestätigt wurde. In den dort gefundenen Hornsteinen sind reichlich mit Chalcedon verfüllte Schwammnadeln enthalten, und man kann auf den dortigen Äckern fossile Kieselschwämme auflesen (Abb. 18).
Nach E. Keefer (1993, 99-101) stammen die in den steinzeitlichen Siedlungen des Albvorlandes gefundenen Feuersteine überwiegend aus der Gegend um Bad Urach. Dort soll anstehender Jurahornstein bergmännisch abgebaut worden sein. Der Beweis dafür steht allerdings noch aus. E. Keefer (1993) konstruierte eine Silexstraße („Feuersteinstraße“) (Abb. 19) von Wittlingen zu den steinzeitlichen Siedlungen der Filder und zu Siedlungen nördlich von Stuttgart. Nach Strien (2000, 124 Tab 4.2-4.3) betrug der Rohmaterialanteil an „Wittlinger“ Hornstein in den Siedlungen der Bandkeramik im Neckarknie zwischen 74,2 % und 98,6 % (vgl. Gayck 2000, 299).

Nachdem mit „Borgerhau“ bei Asch ein sicherer weiterer großer Abbauplatz für Hornstein gefunden wurde, wäre es interessant zu klären, ob die Versorgung der Filder und der Gegend nördlich von Stuttgart außer mit Hornstein aus Wittlingen auch mit dem aus rund 20 km Luftlinie weiter entfernten „Borgerhau“ oder aus noch anderen Fundstellen erfolgte.

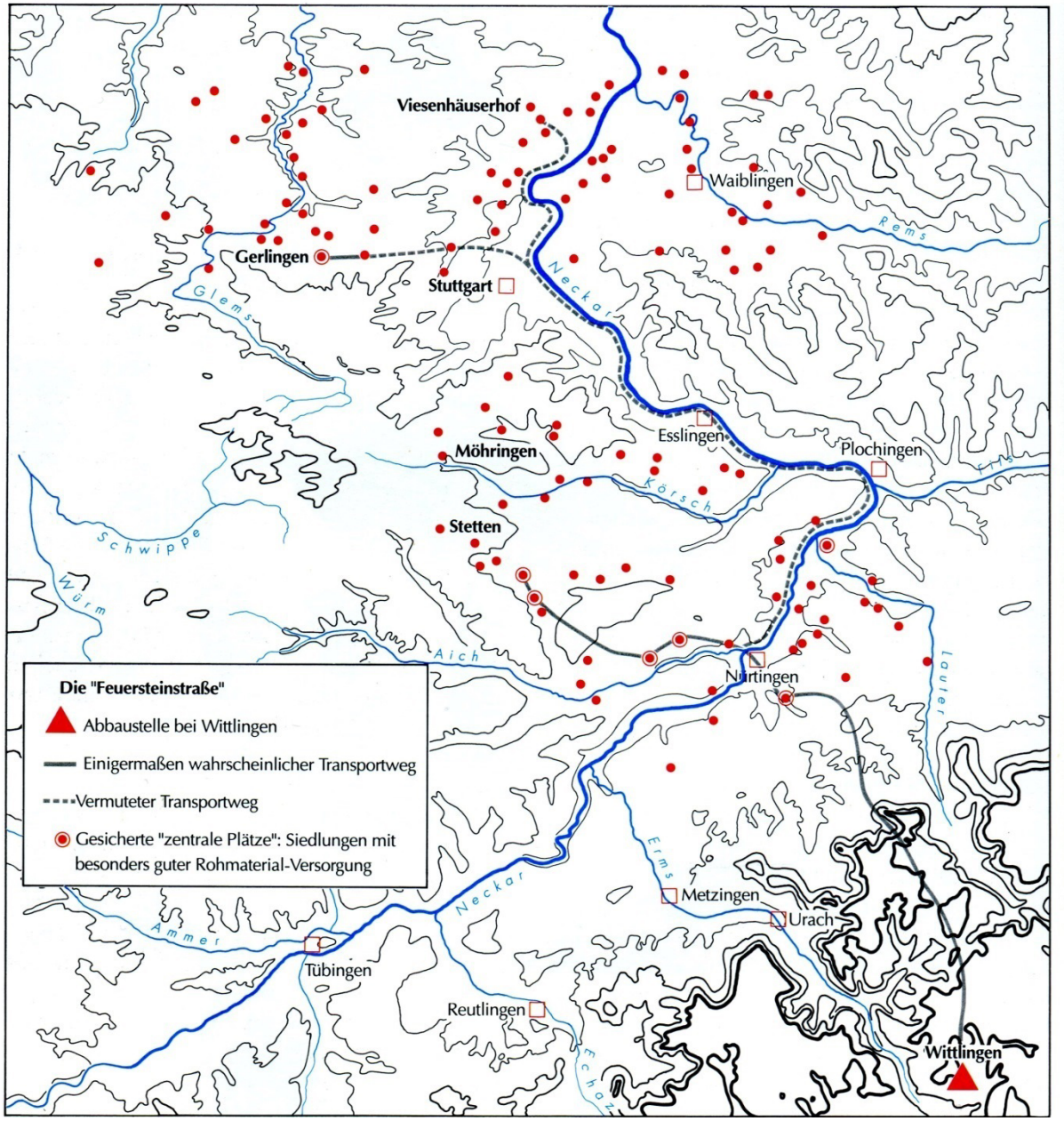


Abb. 19: Vermutete Transportwege für „Wittlinger“ Hornstein im Altneolithikum (Keefer1993, 100).

2.6 Ungarische Cherts

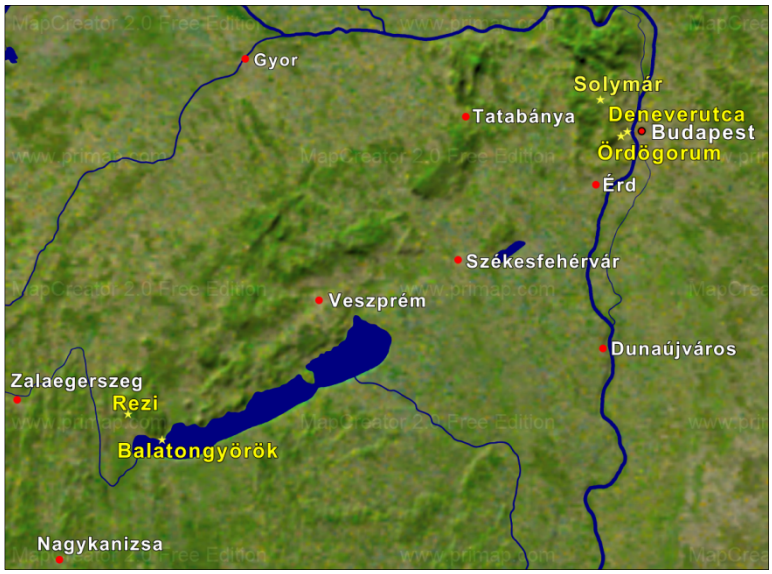


Abb. 20: Fundorte der untersuchten ungarischen Trias-Cherts (gelbe Sterne): Solymár, Deneverutca und Ördögorum in den Budabergen; Balatongyörök und Rezi im Balatonhochland (Digitale Kartengrundlage: Map Creator 2.0).

Die ungarischen Cherts kommen aus dem Austauschbestand der Steinsammlung des Ungarischen Nationalmuseums in Budapest. Es sind Trias-Cherts (T3 Hornstone), die von verschiedenen Fundstellen, aus verschiedenen Gegenden (Abb. 20) und aus unterschiedlichem Fundkontext stammen. Drei davon kommen aus den Buda-Bergen (Hung. 2; Hung. 4; Hung. 5), zwei aus dem Plattensee-Hochland (Hung. 1 und Hung. 3). Hung. 4 kommt aus einem paläolithischen Steinbruch, die übrigen untersuchten Cherts sind vermutlich Oberflächenfunde[3].
Sie sind im Katalog (Hung. 1 bis Hung. 5) beschrieben.

2.7 Zusammenfassung

Von den 75 untersuchten Hornsteinen stammen 70 aus vier Fundorten im Schwäbischen und Bayerischen Oberjura. Zwei der Fundorte, Arnhofen und Wittlingen, sind schon länger als Rohmaterialquellen bekannt; zwei weitere Fundstellen, „Borgerhau“ und Wippingen, werden erst seit wenigen Jahren durch die Gruppe um L. Fisher genauer erforscht. 20 der untersuchten Hornsteine wurden im schwäbischen „Borgerhau“, Gemeinde Asch, oberhalb von Blaubeuren, ausgegraben; 15 weitere sind Grabungs- und Lesefunde aus dem ca. 1,5 km Luftlinie davon entfernten Wippingen „Höfermahd“, Gemeinde Blaustein; 15 Lesefunde wurden aus Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, ca. 30 km Luftlinie vom „Borgerhau“ entfernt, untersucht. Weitere 15 Hornsteine kamen als Lesefunde aus dem Sand- und Kieswerk „Brandl“ in Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim, ca. 160 km Luftlinie vom „Borgerhau“ entfernt. Alle Hornsteine kommen aus dem Oberjura, den Oberen Massenkalken, den liegenden Bankkalken, dem Zementmergel und den hangenden Bankkalken. Es handelt sich in allen Fällen um Rohmaterialquellen zur Herstellung vor allem von neolithischen Artefakten. Die Hornsteinknollen oder -platten wurden in der Jungsteinzeit aufgelesen oder aber auch schon bergmännisch abgebaut, wie im „Borgerhau“ und in Arnhofen.

[3] Als „hornstone“ wird von K. T. Biro u. a. grauer Silex aus der Trias bezeichnet, der in den Bergen von Buda, Bück und Cserhat (Csovar) gefunden wurde (Kasztovsky et al. 2008, 19).

Ausschließlich für einen Herkunftstest mittels Diskriminanzanalyse wurden fünf Hornsteine der jungsteinzeitlichen Siedlung Sonderbuch „Grund“, oberhalb von Blaubeuren, verwendet. Sie wurden bei den weiteren Untersuchungen außer Acht gelassen.

Zum internationalen Vergleich wurden fünf Trias-Cherts verschiedener Fundorte und Gegenden in Ungarn herangezogen. Es handelt sich dabei um Proben aus der Gesteinssammlung des Ungarischen Nationalmuseums in Budapest.

Die untersuchten Hornsteine sind im Katalog einzeln beschrieben.

3 Zusammenfassende Beschreibung der untersuchten Hornsteine

Die schwäbischen und bayerischen Jurahornsteine waren sowohl Lese- als auch Grabungsfunde, wie Tabelle 1 und die dazu gehörende Abb. 21 zeigen; 38 davon (58,5 %) sind Lesefunde, 27 (41,5 %) Grabungsfunde. Ob es sich bei allen ungarischen Cherts um Lesefunde handelt oder ob Grabungsfunde dabei sind, ist unbekannt.

Funde / **Fundorte**	Lesefunde	Grabungsfunde	Summe
Arnhofen	15	0	15
Borgerhau	0	20	20
Wippingen	8	7	15
Wittlingen	15	0	15
Summe (n)	38	27	65
Summe (%)	58,5	41,5	100

Tab. 1: Anzahl der untersuchten Lese- und Grabungsfunde an verschiedenen Fundorten.

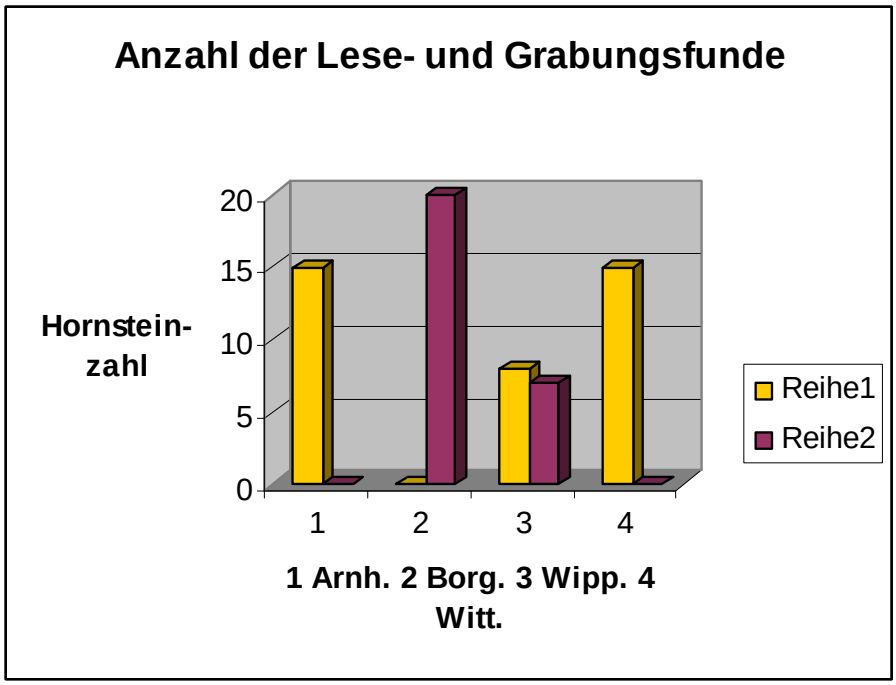


Abb. 21: Anzahl der untersuchten Lese- und Grabungsfunde an verschiedenen Fundorten. Reihe 1 (gelb) Lesefunde, Reihe 2 (weinrot) Grabungsfunde.

Die Lesefunde aus Arnhofen stammen alle aus dem Sand- und Kieswerk „Brandl“, wobei die Funde aus verschiedenen Hornsteinflözen kommen können (vgl. Binsteiner 2005, 65 Tab. 23). Die Lesefunde aus Wittlingen kommen aus dem Gewann „Stuttgarter Teil“. In Wippingen wurden die Hornsteine im Gewann „Höfermahd“ aufgelesen oder dort in dem 1 x 1 m großen Schnitt 2 ausgegraben. Aus vier der sechs 2 x 1 m großen Grabungsschnitte (Schnitte 1, 3, 4, 5) im „Borgerhau“ wurden 20 Hornsteinproben untersucht.

3.1 Grundformen

Bei den untersuchten Hornsteinen kamen drei erkennbare Formen vor: Hornsteinknollen (ND), Plattenhornstein (TB) und Hornsteinfladen (FN) (Tabelle 2 und dazu gehörende Abb. 22).

Hornsteinformen / **Fundorte**	Platten TB	Knollen ND	Fladen FN	Form unbestimmbar	Summe
Arnhofen	14	0	0	1	15
Borgerhau	0	17	3	0	20
Wippingen	0	15	0	0	15
Wittlingen	0	15	0	0	15
Ungarn	0	1	0	4	5
Summe (n)	14	48	3	5	70
Summe (%)	20	68,6	4,3	7,1	100

Tab. 2: Anzahl der untersuchten Hornsteinformen von verschiedenen Fundorten.

Aus Arnhofen wurde fast ausschließlich Plattenhornstein (TB) untersucht. Typisch hierfür sind feine millimeterdünne Farbbänder planparallel zur Rinde (Binsteiner 2005, 66). Das Bruchstück Arnh. 10 scheint aufgrund der Abschrägung des Cortex und der nach einer Seite zulaufenden Bänderung wohl eher aus einem Fladenhornstein oder einem Mischtyp zu stammen (Binsteiner 2005, 67); er gilt hier als unbestimmbar (IN) (Abb. 22). Aus „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen kamen fast ausschließlich Knollen (ND). Knollenhornsteine sind meist, mehr oder weniger, kugelig bis ellipsoid ausgebildet und haben häufig, mehr oder weniger, deutlich ausgebildete konzentrische Bänderungen oder sind schlierig marmoriert. Drei Hornsteintrümmer (Borg. 9, Borg. 15, Borg. 20) sind relativ flach, zwei davon haben eine stark plastisch geformte Oberfläche; sie wurden hier als Fladen (FN) bezeichnet. Unbestimmbar (IN) ist der größte Teil der ungarischen Chertproben, die so klein waren, dass über die Form des Hornsteins keine Aussage gemacht werden kann.

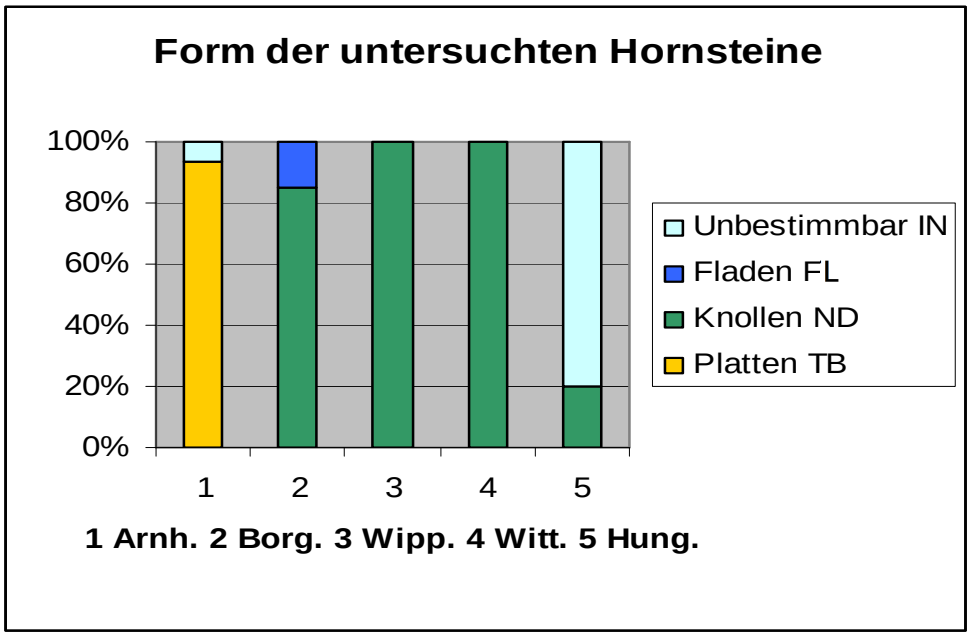


Abb. 22: Form der untersuchten Hornsteine in Prozent zum Fundort.

Nichtartefakte/ Artefakte **Fundorte**	Artefakte SH, TSH, FL, CO	Nichtartefakte NSH	Summe
Arnhofen	11	4	15
Borgerhau	6	14	20
Wippingen	7	8	15
Wittlingen	11	4	15
Ungarn	2	3	5
Summe (n)	37	33	70
Summe (%)	52,9	47,1	100

Tab. 3: Anzahl der untersuchten Artefakte und natürlichen Trümmer von verschiedenen Fundorten. (SH = bearbeitete Trümmer, TSH = getestete Knollen, FL = Abschlag, CO = Kern, NSH = natürlicher Trümmer).

Knapp die Hälfte des Untersuchungsmaterials (47,1 %) waren natürliche Hornsteintrümmer (NSH). Gut die Hälfte (52,9 %) aber waren bearbeitet, also Artefakte (Tab. 3). Sie zeigen letztlich das Interesse der zumeist (jung)steinzeitlichen Bevölkerung an gerade diesen Hornsteinen an. Unter den Artefakten befanden sich sieben Kerne (CO) (Arnh. 5; 6; 7; 15; Wipp. 12; Witt. 6 und 11) und zwei Abschläge (FL) (Borg. 3, Hung. 4). Die bearbeiteten Hornsteintrümmer (SH) und getesteten Knollen (TSH) hatten meist wohl steinzeitliche, das Material aus Arnhofen dagegen wohl eher zeitnahe Abschlagsnegative. Nicht bei allen Hornsteinproben war aber ganz sicher festzustellen, ob die Abschlagsnegative und Retuschen intentional oder durch Zufall (z. B. Pflug, Stoß) entstanden sind.

3.2 Qualität

Typisch für Hornstein ist der muschelige Bruch, der für die Ausbildung harter, scharfer Kanten, Spitzen und Sägezähne steinzeitlicher Werkzeuge verantwortlich ist.

Damit die Hornsteinqualität aller Hornsteine der Grabungen und Surveys der Arbeitsgruppe L. Fisher, S. Harris, C. Knipper, R. Schreg im schwäbischen Jura einheitlich bestimmt wird, wurde von L. Fisher die folgende Wertetabelle entwickelt (Tab. 4), die auch dieser Untersuchung zugrunde liegt:

Deutsch	***Englisch***
1 sehr feinkörnig, glänzend	*very fine grained / shiny, lustrous*
2 feinkörnig, glatt	*fine-grained, smooth break surface*
3 mittelkörnig, matt bis leicht körnig	*medium-grained, matte to slightly grainy*
4 grobkörnig, Bruchfläche rau	*coarse grained, fracture surface rough to touch*
5 heterogen	*inhomogen, > 20 % fall into two or more groups*
6 kein muscheliger Bruch	*flawed, blocky fracture, no conchoidal break*
9 unbestimmbar	*unable to determine*

Tab. 4: Tabelle zur Bewertung der Hornsteinqualität (Tabelle L. Fisher).

Die Qualität des Hornsteins wurde nach Möglichkeit an möglichst frisch angeschlagenen, nicht oder kaum patinierten Stellen bestimmt. Recht deutlich kann die Körnigkeit des Gesteins aber auch am Sägeschnitt beobachtet werden. Daher wurden zudem die Sägeschnitte zur Bestimmung der Qualität herangezogen.

Qualitätsstufen / **Fundorte**	1	2	3	4	5	6	9	**Summe**
Arnhofen	13		2					15
Borgerhau	2	12	5	1				20
Wippingen	1	10	2	2				15
Wittlingen		4	8	1	2			15
Ungarn	3	1					1	5
Summe (n)	19	27	17	4	2		1	70
Summe (%)	27,1	38,6	24,3	5,7	2,9		1,4	100

Tab. 5: Anzahl der Hornsteine und Cherts der Qualitätsstufen 1 bis 6 und 9 an den einzelnen Fundorten (gerundet).

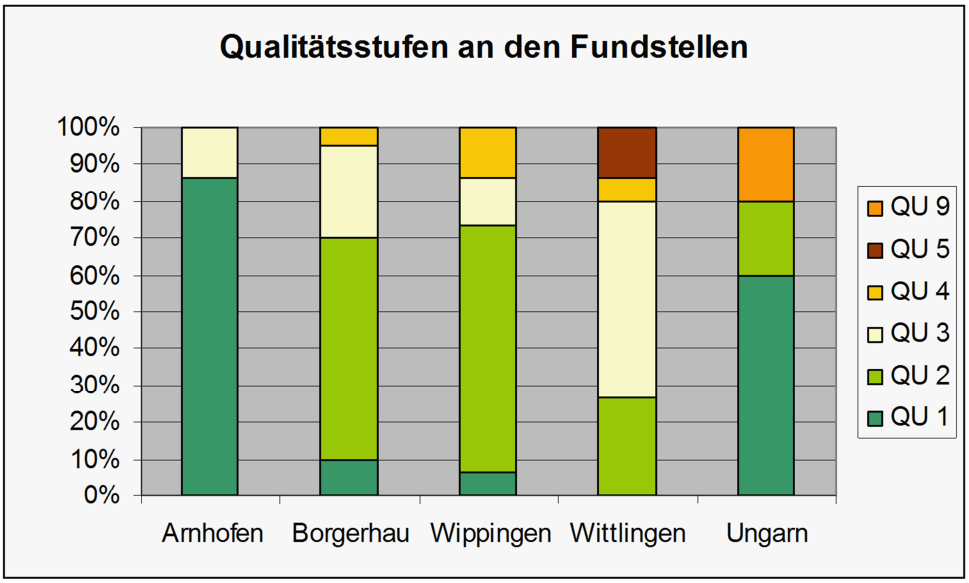


Abb. 23: Prozentualer Anteil von Hornsteinen und Cherts der Qualitätsstufen (QU) 1 bis 5 und 9 an den einzelnen Fundorten.

Aus Tab. 5 und der dazu gehörenden Abb. 23 geht hervor, dass die untersuchten Hornsteine aus Arnhofen die beste Qualität haben: 86,7 % sind sehr feinkörnig und glänzend (Qualität 1), nur 13,3 % haben Qualität 3. Die Qualitäten der untersuchten Hornsteine aus dem „Borgerhau“, aus Wippingen und Wittlingen sind überwiegend gut oder befriedigend. Im „Borgerhau“ und in Wippingen finden sich fast gleich gute Hornsteinqualitäten; 60 beziehungsweise 66,7 % waren feinkörnig und glatt (Qualität 2). Dagegen hatten die Hornsteine aus Wittlingen nur zu 26,7 % Qualität 2.
Vier aller untersuchten Hornsteine hatten Qualitätsstufe 4, wobei neben der Grobkörnigkeit und der rauen Oberfläche auch noch viele kleine Poren (Witt. 4), zum Teil relativ große Poren (Borg. 17 und Wipp. 7) und Drusen (Wipp. 7) besonders auffielen. Zwei Steine der Qualitätsstufe 5 aus Wittlingen (Witt. 8 und Witt. 11) bestanden zu erheblichen Teilen aus stark heterogenem Gestein (Qualität 4 und Qualität 2).
Die ungarischen Cherts waren allgemein von hoher Qualität, 60 % hatten die Qualitätsstufen 1 und 20 % Stufe 2. Nur Hung. 4 zeigte keinen muscheligen Bruch, seine Qualität war nicht bestimmbar (Qualität 9).

3.3 Farbe und Musterung

Färbung ist keine konstante Größe. Farben verändern sich stark, unter anderem auch durch den Luftsauerstoff. Zusätzlich ist die Benennung der beobachtbaren Farben individuell unterschiedlich. Um diese zu objektivieren, wurden Hornsteinfarben mit den Munsell Soil Color Charts (2000) verglichen und danach benannt.

3.3.1 Sägeschnittfärbung

Bei einem frisch angeschlagenen Hornstein oder bei einem frischen Sägeschnitt sind die Farben noch nicht oxidiert, sie geben folglich die ursprüngliche Färbung der Hornsteine wieder.

Der farblichen Zuordnung einer Hornsteinprobe zu weiß bis sehr hellgrau (WH), hell- bis dunkelgrau (GR), beige-grau (YG) und ocker bis braun (YB) wurde der Gesamteindruck des jeweiligen Sägeschnittes zugrunde gelegt.

Sägeschnittfärbung / **Fundort**	weiß bis sehr hellgrau WH	hell- bis dunkelgrau GR	beige-grau YG	ocker bis braun YB	**Summe**
Arnhofen	0	15	0	0	15
Borgerhau	3	15	2	0	20
Wippingen	8	3	3	1	15
Wittlingen	0	3	11	1	15
Ungarn	1	3	0	1	5
Summe (n)	12	39	16	3	70
Summe (%)	17,1	55,7	22,9	4,3	100

Tab. 6: Anzahl der gemittelten Sägeschnittfärbung von Hornsteinen und Cherts an einzelnen Fundorten.

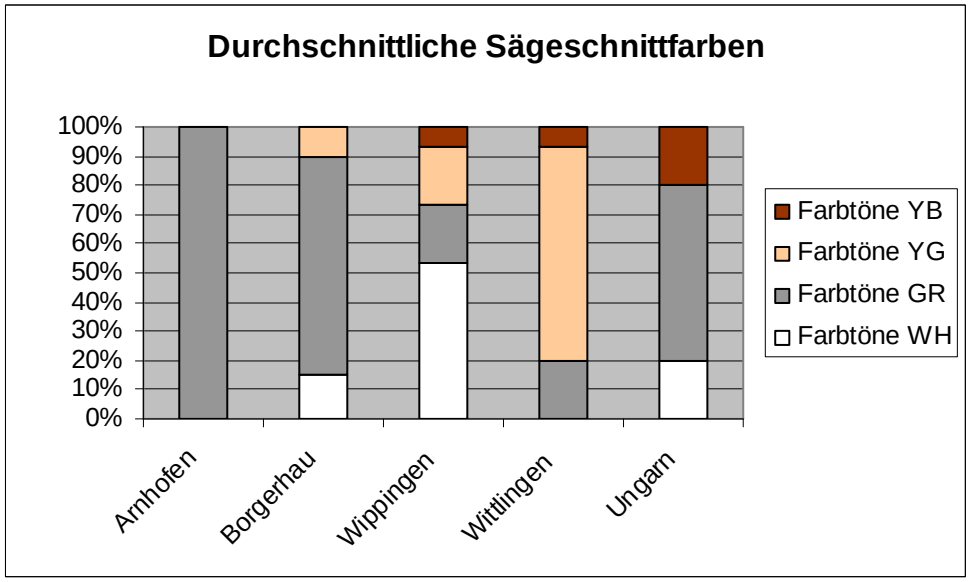


Abb. 24: Gemittelte Sägeschnittfärbung an einzelnen Fundorten in Prozent.

Schon dieser Überblick (Tab. 6 und Abb. 24) zeigt, dass bestimmte Hornsteinfarben für ihre Fundorte relativ typisch sind. Aus Arnhofen kommen mittelgraue bis dunkelgraue Hornsteine mit bläulichem Schimmer. Im „Borgerhau“ findet man weit überwiegend (75 %) hell- bis mittelgraue Hornsteine (GR). In Wippingen sind mehr als 50 % der Hornsteine relativ hell (WH), oft mit rosa-violettem Fleck. In Wittlingen erscheinen Hornsteine überwiegend (73,3 %) in beige-grau. Es gibt aber durchaus auch Farbüberschneidungen zwischen den Fundorten.
Die ungarischen Cherts kommen aus verschiedenen Gegenden und von unterschiedlichen Fundplätzen. Sie geben deshalb eher die Farbvielfalt ungarischer Cherts wieder.

Neben den Grundfarben der Hornsteine treten vor allem an Brüchen und Sägeschnitten zusätzliche Farben auf, besonders gelblich, orange- bis rostfarben, braun, graublau, schwarz und rosa-violett.
Am wichtigsten für die Farbe eines Minerals ist seine chemische Zusammensetzung. Die typische Eigenfarbe (idiomatische Färbung) des Minerals wird durch die in der Formel angegebenen Elemente und deren Elektronenkonfiguration bestimmt (Markl 2008, 163). Quarz SiO_2 enthält keine farbgebenden Elemente, er ist deshalb farblos, weiß oder in Gesteinen grau (Markl 2008, 34). Die Verwachsung mit kleinen Aggregaten anderer Minerale kann die Eigenfarbe verändern (allochromatische oder Fremdfärbung) (Markl 2008, 164). In der Tabelle sind einige mögliche farbgebende Elemente und deren Oxidationsstufen angegeben (Hollemann & Wiberg 2007, 693-1655):

Elementfarben in Gestein **Oxidationsstufen**	Element	Farben in Gesteinen
Ti (IV)	Titan	rötlich als Rutil (TiO_2), schwarz als Ilmenit ($FeTiO_3$)
V (III)	Vanadium	dunkelgrün als Goldmanit ($Ca_3V_2Si_3O_{12}$)
Cr (III)	Chrom	graugrün als Chromocker (Cr_2O_3) braun, schwarz als Chromeisenstein ($FeCr_2O_4$) smaragdgrün als Uwarovit ($Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$)
Mn (II)	Mangan	rosa als Rhodonit ($MnSiO_3$) rosa als Rhodochrosit ($MnCO_3$) gelb als Spessartin ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$)
Mn (III)		braun als Braunit (Mn_2O_3)
Mn (IV)		grau-schwarz als Braunstein (MnO_2)
Fe (II)	Eisen	gelb, grün, braun bis braun-schwarz als Fayalit (Fe_2SiO_4) rubinrot als Almandin ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$)
Fe (II/III)		schwarz als Magnetit (Fe_3O_4)
Fe (III)		rot, braun, gelb als Roteisenstein (Fe_2O_3) farblos, grün oder schwarz als Andradit ($Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$)
Cu (I)	Kupfer	rot als Cuprit (Cu_2O)
Cu (II)		schwarz als Tenorit (CuO) smaragdgrün als Diopas ($Cu_6Si_6O_{18} * 6H_2O$) grün als Malachit ($Cu_2(OH)_2CO_3$) blau als Azurit($Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$)

Tab. 7: Farben unterschiedlicher Oxidationsstufen farbgebender Elemente in Gesteinen (Hollemann & Wiberg 2007, Ti 1521; V 963; Cr 1562 f., 963; Mn 1607 f., 1574, 963; Fe 1636, 1655, 963; Cu 1433 f., 693).

Die farbgebenden Metalle sind vor allem Elemente der 4. Nebengruppe; sie kommen im Gestein überwiegend als Kationen vor. Vom Gestein reflektierte Farben sind von der Art des Elementes, seiner Oxidationsstufe, aber auch vom Anion abhängig; unter den Beispielen oben

befinden sich vor allem Oxide, Silikate und Carbonate. Nach Markl (2008, 164) ist Eisen das bedeutendste der farbgebenden Elemente. Das dürfte auch bei den Hornsteinen der Fall sein, schon deshalb, da Eisen gegenüber anderen farbgebenden Elementen die weitaus höchsten Konzentrationen aufweist. Eisen ruft als Fe^{2+} grünliche und rötliche, als Fe^{3+} gelbliche, braune, rotbraune oder zusammen mit Fe^{2+} dunkelgraue bis schwarze Farbtöne hervor.
Eine weitere Möglichkeit einer Farbgebung wird durch natürliche radioaktive Strahlung hervorgerufen; es entstehen Lücken in SiO_2-Gitter, die als Farbzentren wirken, z. B. beim Amethyst und Rauchquarz (Markl 2008, 34; 165).

3.3.2 Musterungen

An farbigen Musterungen kommen bei den untersuchten Hornsteinen und Cherts vor allem parallele und konzentrische Bänder vor, oder die Hornsteine sind schlierig-marmoriert (Tab. 8, Abb. 25).

Hornstein-Musterungen **Fundorte**	parallel gebändert PB	konzentrisch gebändert CB	schlierig/marmoriert (evtl. am Rand gebändert) SM	unklare Musterung IN	**Summe**
Arnhofen	14	0	0	1	15
Borgerhau	0	15	4	1	20
Wippingen	0	11	3	1	15
Wittlingen	0	1	12	2	15
Ungarn	0	2	0	3	5
Summe (n)	14	29	19	8	70
Summe (%)	20	41,4	27,1	11,4	99,9

Tab. 8: Anzahl bestimmter Hornstein- und Chertmusterungen an den Fundorten.

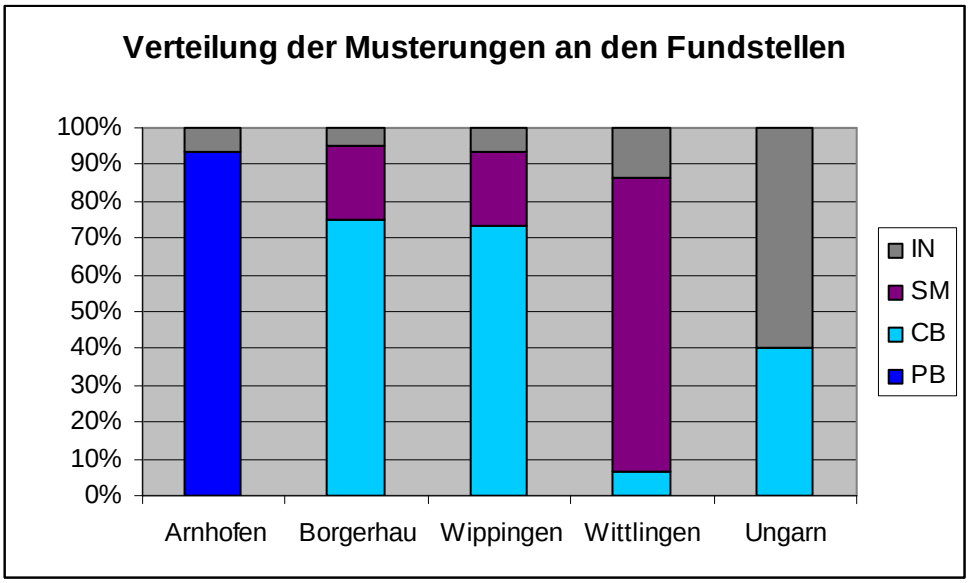


Abb. 25: Prozentualer Anteil der Musterungen an verschiedenen Fundorten (PB = parallel gebändert; CB = konzentrisch gebändert; SM = schlierig/marmoriert; IN = unklare Musterung).



Abb. 26: Platten- oder Fladenhornstein Arnh. 10.

Die Plattenhornsteine aus Arnhofen waren fein, < 1 bis 5 mm breit, parallel gebändert (PB). Der Hornstein Arnh. 10 bildet eine Ausnahme. Er hat mittig eine Partie mit Schlieren von 10-15 mm Breite, die von Bändern eingefasst ist und die an einer Seite oben und unten leicht aufeinander zulaufen; dieser Hornstein aus Arnhofen fällt auch dadurch auf, dass er nicht sicher ein Plattenhornstein, sondern eventuell ein Fladenhornstein oder eine Mischform ist.

Konzentrisch gebändert (CB) waren vor allem die Hornsteine aus dem „Borgerhau“ (75 %) und aus Wippingen (73,3 %). Dabei sind besonders viele der Knollenhornsteine aus dem „Borgerhau“ lebhaft konzentrisch gebändert, wobei das einzelne Band im Allgemeinen in etwas dunklerem Ton abgegrenzt ist, besonders deutlich zum Beispiel bei Borg. 10, Borg. 14 und Borg. 20. Dagegen sind viele der helleren Hornsteine, besonders aus Wippingen, weniger kontrastreich konzentrisch gebändert, zum Beispiel Wipp. 4 und Wipp. 15. Häufig sind aber auch die Bänder nicht durch einen dunkleren Ton, sondern nur durch eine Farbänderung weniger klar abgegrenzt, zum Beispiel Borg. 2, Wipp. 4 oder Wipp. 13. Manche gebänderten Hornsteine haben mehrere konzentrisch gebänderte Zentren (zum Beispiel Borg. 7).

Von allen hier untersuchten süddeutschen Jurafundstellen gibt es Hornsteine, die im Sägeschnitt vor allem schlierig/marmoriert erscheinen und keine oder nur wenige Bänder am Rand haben. Das ist überdurchschnittlich häufig (80 %) bei den Wittlinger Hornsteinen der Fall, zum Beispiel besonders deutlich bei Witt. 7 und Witt. 13. Dazu gehören auch die Fladenhornsteine aus dem „Borgerhau“ (Borg. 9, Borg. 15, Borg. 20). Borg. 12 passt in keine der Kategorien. Die Proben Hung. 2, Hung. 4 und Hung. 5 sind für eine Zuordnung zu klein (IN).

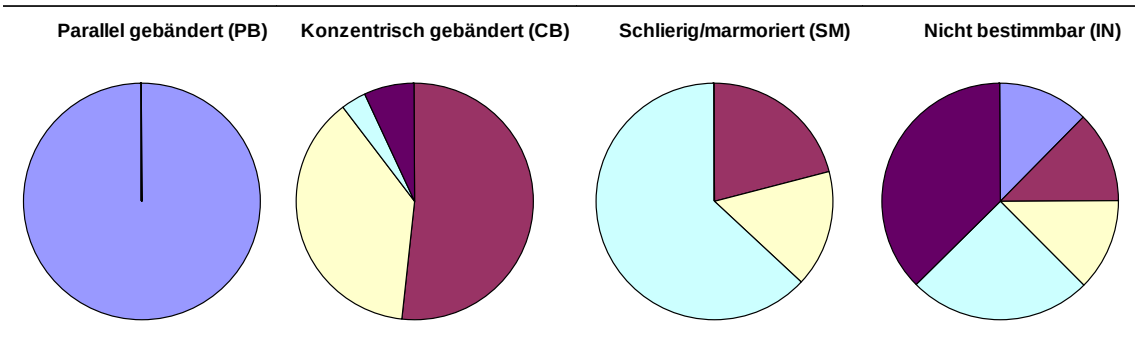


Abb. 27: Prozentuale Verteilung der Fundorte auf verschiedene Musterungen: blau: Arnhofen; weinrot: Borgerhau; gelb: Wippingen; türkis: Wittlingen; violett: Ungarn.

Versucht man umgekehrt als in Abb. 25, von der Musterung auf den Fundort der 70 Hornsteine zu schließen (Abb. 27), so zeigt sich, dass alle parallel gebänderten (PB) aus Arnhofen

kommen, die konzentrisch gebänderten überwiegend aus dem „Borgerhau“ und dem ca. 1,5 km Luftlinie entfernten Wippingen, schlierig/marmoriert ist dagegen für Wittlingen typisch, kommt aber auch im „Borgerhau“ und in Wippingen vor.

Bei vielen Hornsteinen (45,7 %) gab es einen Helligkeitswechsel: Richtung Rinde dunkler werdend (od) oder Richtung Zentrum dunkler werdend (md), oft war die Wirklichkeit allerdings komplizierter oder ein typischer Farbwechsel nicht bestimmbar (vgl. Hornsteinentstehung, Kapitel 4.4).

Farbverteilung	Richtung Rinde dunkler	Richtung Zentrum dunkler	anders	
Fundorte	(od)	(md)	(IN)	**Summe**
Arnhofen	2	5	8	15
Borgerhau	4	9	7	20
Wippingen	0	8	7	15
Wittlingen	3	1	11	15
Ungarn	0	0	5	5
Summe (n)	9	23	38	70
Summe (%)	12,9	32,9	54,3	101

Tab. 9: Hell-Dunkel-Verteilung der untersuchten Hornsteine und Cherts verschiedener Fundorte.

Die ungarischen Cherts sind zu klein, als dass eine Verteilung von Hell und Dunkel bestimmt werden konnte. Auch beim weit überwiegenden Teil der schlierig/marmorierten Hornsteine (89 %) war weder das Zentrum des Steines noch der Bereich Richtung Cortex dunkler (IN). In Arnhofen, im „Borgerhau“ und in Wippingen ist durchschnittlich das Hornsteinzentrum dunkler als der Bereich Richtung Cortex (md) (Tab. 9; Abb. 28), wobei kein einziger der untersuchten Hornsteine aus Wippingen Richtung Cortex dunkler ist. Mögliche Erklärung dafür wären, dass die ersten Schichten des werdenden Hornsteins relativ gesehen, mehr durch Tone verunreinigt waren als spätere oder dass die Hornsteinumgebung anfangs stärker oxidativ war. Insgesamt ist der Verteilung hellerer und dunklerer Farbtöne keine besondere Bedeutung zuzuweisen, lassen sich doch mehr als 50 % nicht eindeutig einer der Gruppen (od, md) zuordnen (IN).

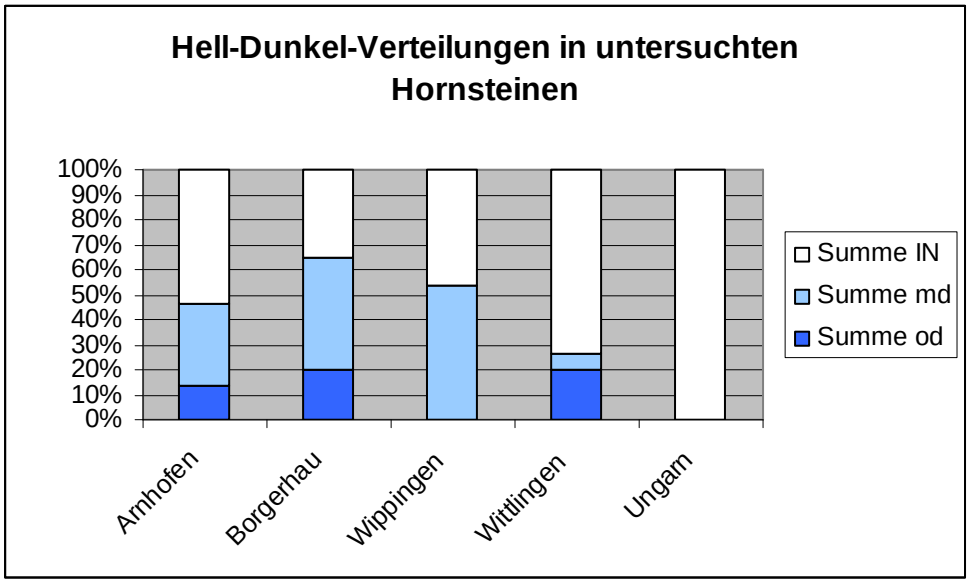


Abb. 28: Prozentuale Hell-Dunkel-Verteilung in Hornsteinen an einzelnen Fundstellen (md = Mitte dunkler; od = Richtung Cortex dunkler; IN = anders).

Interessant ist auch die Beobachtung, dass die konzentrischen Bänder meist mit einem dunkleren Farbton abgegrenzt sind. Es entsteht das Bild einer Wanderung von in Wasser gelösten, farbgebenden Ionen, wie in der Chromatographie, für jedes Band neu. Eine Abgabe von hydratisierten Ionen geschieht aber in Zusammenhang mit der weiteren „Reifung“, der fortschreitenden Kristallisation, des Opal-CT (Opal-Cristobalit-Tridymit) und des Quarzes, die auch nach diesem Befund von innen nach außen stattfindet.



Abb. 29: Borg. 12. Bruchkante (Ausschnitt). Wanderung von farbigen Ionen mit der Lösungsfront ins Hornsteininnere.



Abb. 30: Witt. 9. Sägeschnitt (Ausschnitt). Wanderung farbiger Ionen von der Bruchseite ins Hornsteininnere.

Entgegengesetzte Beobachtungen wurden an den drei Hornsteinen Borg. 12, Witt. 4 und Witt. 9 gemacht. Bei Borg. 12 (Abb. 29) sieht man deutlich die Lösungsfront, die vom inneren dunklen Band unterhalb der Cortex aus mit weißlichem Material Richtung Hornsteininneres gewandert ist und dort einen dunklen grauen Rand bildet. In den beiden anderen Fällen (Witt. 4 und 9) ist die Lösungsmittelfront vom Cortex und bei Witt. 9 zusätzlich von einer Bruchseite aus (Abb. 30) ins Hornsteininnere gewandert, ebenfalls mit einem dunkleren bei-

ge-bräunlichen Rand. Das weißliche Material kann eigentlich nur feinster Opal-CT-Zement sein, der von außen her die Poren der jüngeren Schicht(en) verfüllt (Migaszewski et al. 2006; Behl 2011). Dabei werden hydratisierte, farbgebende Ionen abgelöst und an der Grenzfläche nach innen angelagert.

Offensichtlich kommt es in verschiedenen Stadien der Hornsteinbildung zur Wanderung hydratisierter, farbgebender Ionen innerhalb des Hornsteins, wobei diese bevorzugt die freien, negativ geladenen Plätze an der Gitteroberfläche besetzen. Die Hauptrichtung verläuft dabei von innen nach außen, mehr oder weniger schichtweise (vgl. Hornsteinentstehung 4.4). Die Gegenrichtung konnte nur bei drei Hornsteinen im Randbereich mit einer Breite bis zu 3 cm beobachtet werden, obwohl eine Verdichtung des Materials durch feinsten Opal-CT-Zement nach Behl (2011) und Migaszewski et al. (2006) in jeder abgelagerten Schicht erfolgen müsste. Deshalb ist davon auszugehen, dass im Normalfall die Verfüllung der Poren erfolgt, ehe die Kristallisation des Opal-CT und des Quarzes weiter fortschreitet. Bei Borg. 12, Witt. 4 und Witt. 9 dagegen scheint erst nach weitestgehender „Reifung“ der äußeren Schicht(en) ausreichend Opal-CT-Zement zur Verfüllung der Poren bereit gestanden zu haben.

3.3.3 Patina

Seit längerer Zeit angeschlagene Stellen der Hornsteinproben sind gegenüber dem Sägeschnitt deutlich farblich verändert, zeitnahe dagegen kaum, was die Unterscheidung von rezenten und alten Bruchflächen ermöglicht. Diese chemischen Veränderungen nennt man Patina (Lambert 1998, 26; Affolter 2002, 19). So sind die Bruchflächen vor langer Zeit angeschlagener oder abgeschlagener Plattenhornsteine aus Arnhofen überwiegend weniger bläulich und deutlich dunkler und bräunlicher. Bei den Steinen aus dem „Borgerhau“, aus Wittlingen und den helleren aus Wippingen ist das Grau etwas mehr beigefarben. Die dunkleren Hornsteine aus Wippingen haben ebenfalls außen einen stärkeren Beigeton. Diese Beige-Ocker-Patina auf Artefakten verschleiert deren originale Farbgebung und erschwert so ihre Unterscheidung und eine richtige Zuordnung von Hornsteinen zu Hornsteinfundstellen.

Eine Patina bildet sich besonders leicht, wenn der Stein feucht ist. Sie kann durch Oxidation von Ionen an der Bruchfläche des Hornsteins erfolgen oder durch Anlagerung von Ionen aus dem Boden auf der Hornsteinoberfläche und auf Bruchflächen. So dürften die gelblichere Farbe und auch gelbe bis orangerote Verfärbungen und Flecken der alten Bruchflächen, z. B. aus dem „Borgerhau“, überwiegend der Oxidation der hellgrünen Fe^{2+}- Ionen zu rostroten Fe^{3+}- Ionen in der obersten Hornsteinschicht zuzuschreiben sein (vgl. Tab. 7). Fe^{3+}- Ionen aus dem Boden können sich außerdem nicht nur auf dem Cortex, sondern auch auf Hornsteinbruchflächen ablagern und rote (Hämatit α-Fe_2O_3) bis braune (γ-Fe_2O_3), sowie graue bis schwarze Flecken (Fe_3O_4) bilden (Hollemann & Wiberg 2007, 1653).
Weitere sehr dunkle Stellen der Patina der Hornsteine dürften überwiegend auf der Oxidation zum dunkel braungrau bis schwarzen Braunstein MnO_2 beruhen (Dorn 1991). Man vermutet hierfür zusätzlich eine biologische Quelle als Ursache, nämlich mixotrophe Bakterien, wie Metallogenium und Arthrobacter, die auf Gesteinsoberflächen gefunden wurden. Mixotrophe Bakterien haben einen Mischenergiestoffwechsel. Sie können sowohl aus organischen Kohlenstoffquellen Energie gewinnen als auch aus der Oxidation zum Beispiel des Mangans und

verändern dadurch die Oberflächenfarbe (Lambert 1998, 26). Ganz besonders scheinen mir diese für die aufgelagerten, ungefähr runden, dunkel braungrau bis schwarzen, meist bis 6 mm großen Punkte im Durchmesser (in Arnhofen bis 10 mm Durchmesser) und Punktserien auf Bruchflächen und Cortex zuständig zu sein, zeigen diese doch das typische Wachstumsverhalten von Bakterien auf. Nach Dorn (1991) wird hier Mangan gegenüber der Umgebung konzentriert.
Eine Analyse der Patina durch R. I. Dorn (1991) ergab, dass die Patina zu 60 % aus Ton (Aluminiumsilikat), zu 20-30 % aus Eisen und Mangan und der Rest aus verschiedenen anderen Metalloxiden besteht. Für die Ausbildung der Patina dürfte deshalb überwiegend die chemische Zusammensetzung der geologischen Umgebung der Hornsteine, also die hornsteinführenden Kalkverwitterungslehme, zuständig sein. Hier erwartet man zunächst klare Unterschiede zwischen Arnhofen und den drei schwäbischen Fundstellen. Das ist aber nicht so deutlich zu sehen.

3.4 Cortex

Der Cortex ist die letzte auf den entstehenden Hornstein aufgelagerte und damit die jüngste Schicht der Hornsteine. Ebenso wie Hornstein besteht sie, wie auch die RFA-Analyse des Cortex von Borg. 5 (Borg. 5.2) zeigt, zu ungefähr 98 % aus SiO_2.

3.4.1 Cortexdicke

Die Dicke der Cortices (Tabelle im Anhang A2) zeigt deutliche Unterschiede am einzelnen Hornstein, zwischen Hornsteinen derselben Fundstelle und dem Durchschnitt der einzelnen Fundstellen.

Cortex-dicke / **Fundort**	Dünner Cortex < 1-2 mm	Stark variabler Cortex < 1-28 mm	Variabler dickerer Cortex 3-13 mm	**Summe**
Arnhofen	15	0	0	15
Borgerhau	7	9	4	20
Wippingen	11	4	0	15
Wittlingen	5	10	0	15
Ungarn	3	2	0	5
Summe (n)	41	25	4	70
Summe (%)	58,6	35,7	5,7	100

Tab. 10: Verteilung der Cortexdicke auf verschiedene Fundorte nach Anzahl und Prozentsatz.

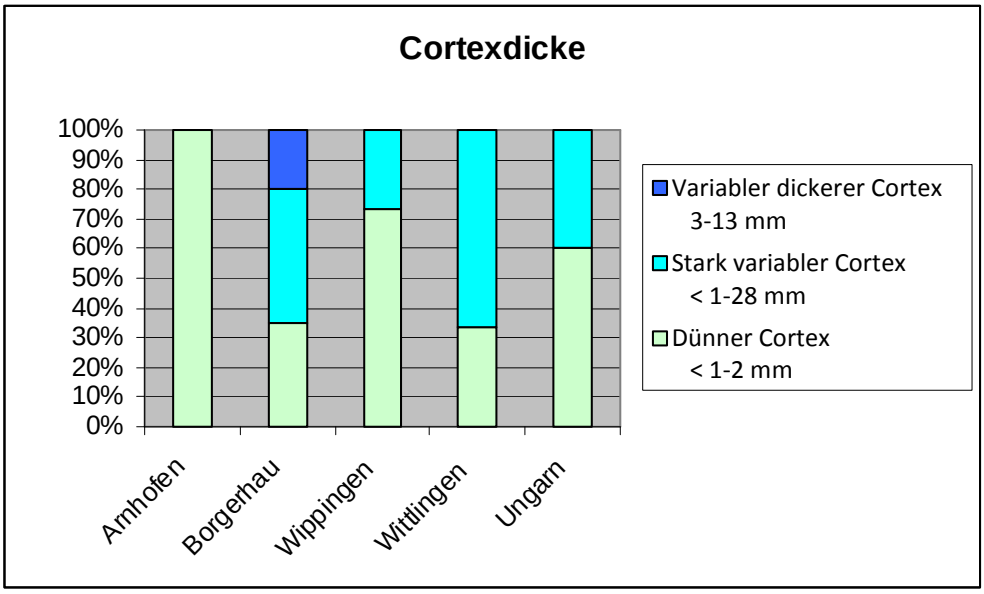


Abb. 31: Prozentuales Vorkommen verschiedener Cortexdicken an den Fundstellen.

An allen untersuchten Fundstellen kommen Hornsteine mit dünnem Cortex vor. Dagegen ist der variable dickere Cortex auf den Fundort „Borgerhau“ beschränkt (Tab. 10; Abb. 31).
Betrachtet man die Cortexdicke aus der Sicht der Fundstellen, so findet man durchgängig einen dünnen bis maximal 2 mm dicken Cortex auf den Plattenhornsteinen von Arnhofen.
Die Dicke des Cortex der Hornsteine im „Borgerhau“ variiert zwischen < 1 mm und 16 mm. Die sieben Hornsteine mit durchgehend < 1 mm dickem Cortex dort stammen alle aus Schnitt 5. Ein weiterer Hornstein aus Schnitt 5 ist zu mehr als der Hälfte von einem ebenfalls dünnen Cortex umgeben, der Rest des Steines von einem bis 16 mm dicken Cortex, der aber schon relativ hart ist. Der Hornstein, Borg. 20, ebenfalls aus Schnitt 5, variiert wie die übrigen Hornsteine aus dem „Borgerhau“ in der Cortexdicke. Die Hornsteine aus Wippingen haben einen relativ dünnen Cortex von < 1 bis maximal 7 mm Breite. Die Cortexdicke in Wittlingen ist sehr variabel, zwischen < 1 und 28 mm; ähnliches gilt für die ungarischen Hornsteine (< 1-15 mm).

Vor allem der dicke Cortex aus dem „Borgerhau“ ist weicher als Hornstein und lässt sich deshalb durch Hornstein leicht ritzen. Diese Beobachtung kann man auch als Hinweis dafür verwenden, dass es sich hier um die jüngste Schicht des Hornsteins handeln muss, die noch nicht so stark kristallisiert ist wie weiter im Hornsteininneren liegende Bereiche. Vor allem der dicke Cortex ist auch poriger als Hornstein der Qualitäten 1 bis 3. Seine Poren sind demnach auch noch nicht mit feinstem Opal-CT-Zement verfüllt. Einen weiteren Hinweis dafür, dass der dicke Cortex im „Borgerhau“ evtl. noch aus Opal-CT besteht, könnte ein Röntgendiffraktogramm liefern.
Dünner Cortex dagegen ist stets relativ hart, er hat offensichtlich einen höheren Kristallinitätsgrad, der bei der geringeren Dicke auch in kürzerer Zeit zu erreichen ist. Ob evtl. höhere Temperaturen, wie sie für die Kristallisation der Hornsteine in Wittlingen diskutiert werden, beteiligt sind, ist nicht gesichert aber denkbar, zumal auch die dickeren Cortices der Hornsteine aus Wittlingen weniger porig und härter sind als die aus dem „Borgerhau“, aus Wippingen und Ungarn.

3.4.2 Cortexfarbe

Der Cortex als solcher ist im Querschnitt fast überall weiß. Um einen Hinweis zu bekommen, woran das liegen könnte, wurde der dicke Cortex von Borg. 5, Borg. 5.2, von dem zuvor die Cortexpatina entfernt wurde, ebenfalls in der Röntgenfluoreszenz-Analyse untersucht. Wie zu erwarten war, besteht der Cortex, ebenso wie der gesamte Hornstein, fast ausschließlich aus SiO_2. Calcium und Magnesium sind im Cortex nicht vermehrt enthalten (Anhang D1). In Tab. 11 und Abb. 32 sind einige Elemente aufgeführt, deren prozentuale Zusammensetzungen in dem Cortex von Borg. 5 (Borg. 5.2) von denen des dazu gehörenden Hornsteins Borg. 5 stärker abweichen. Es fällt auf, dass der Cortex mehr Tonmineralien (Aluminiumsilikate) enthält, die als Aluminiumoxid (Al_2O_3) in der Analyse erscheinen (vgl. Hollemann & Wiberg 2007, 970; Markl 2008, 66).
Relativ stark gemindert sind im Cortex farbgebende Ionen, wie Eisen, Mangan, (Cobalt[4]), Chrom und Nickel. Die Konzentrationen von Mangan waren an der Messgrenze der RFA und konnten deshalb nicht genauer bestimmt werden. Sie wurden deshalb auch von der Grafik ausgeschlossen. Eine Ausnahme bildet das ebenfalls farbgebende Titan, das im Cortex gegenüber dem Durchschnitt des Hornsteins erhöht ist. Das höher konzentrierte, farbgebende Eisen, der Hauptfarbgeber, ist im Cortex um 21,4 % gemindert. Wenn Eisen dann noch als Fe^{2+} an wenige Silikatreste gebunden ist, färbt es nur sehr schwach (gelblich-grünlich), was durch das weißliche Aussehen der Cortex bestätigt wird (Markl 2008, 164).

	TiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MnO (%)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)
Borg. 5.2 Cortex	0,018	0,14	0,14	0,001	85	18	11
Borg. 5 Hornstein	0,013	0,09	0,17	0,002	147	124	30

Tab. 11: Vergleich der Zusammensetzung an ausgewählten Verbindungen und Elementen eines Hornsteins (Borg. 5) und seines Cortex (Borg. 5.2). Im Cortex gegenüber dem Hornstein deutlich vermindert sind die meisten farbgebenden Ionen (rot) mit Ausnahme der Titanionen (blau); erhöht ist auch die Konzentration an Aluminiumionen.

[4] Die Analysewerte von Cobalt sind nur sehr eingeschränkt verwertbar, da sich durch das Mahlen, besonders bei hartem Material wie Hornstein, in der Gesteinsmühle *Co* aus dem Wolframcarbid lösen kann und dadurch die *Co*-Konzentration im Hornsteinpulver erhöht. Die niedrigere *Co*-Konzentration im Cortexpulver könnte also auch (zumindest teilweise) wegen der geringeren Härte des Cortex eine geringere oder keine Co-Beimengung aus der Gesteinsmühle erhalten haben (vgl. FN 15).

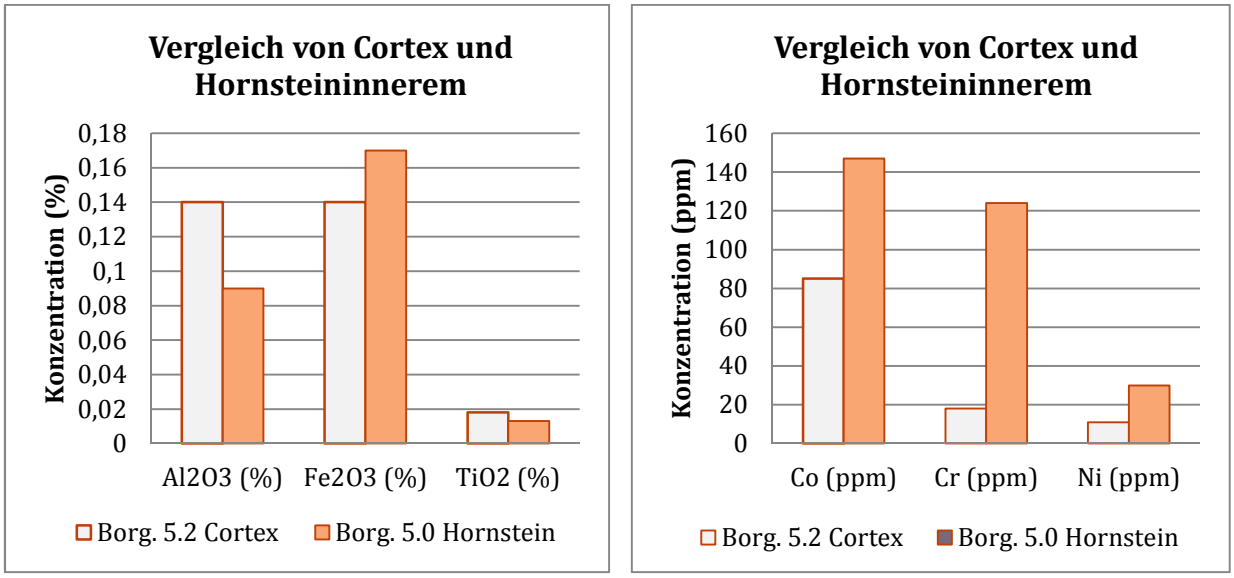


Abb. 32 a & b: Vergleich der Zusammensetzung ausgewählter Verbindungen und Elemente eines Hornsteins (Borg. 5) und seines Cortex (Borg. 5.2).

Nicht nur in Bezug auf Hornstein Borg. 5, sondern auch gegenüber allen anderen Hornsteinen, liegen die Konzentrationen vor allem an Eisen, aber auch an Chrom, im Cortex von Borg. 5 an der unteren Grenze aller untersuchten Hornsteine. Außerdem enthält der Cortex von Borg. 5 deutlich mehr Aluminiumionen als alle untersuchten Hornsteine aus dem „Borgerhau“, außer Borg. 11. Obwohl das Ergebnis statistisch nicht relevant ist, bietet sich der Schluss an, dass der Cortex wohl allgemein mit Aluminiumionen, häufigen Ionen in Tonen, angereichert ist, ihm aber farbgebende Metallionen, allen voran Eisenionen, fehlen.

Ausschließlich bei den Hornsteinen aus Wittlingen konnte eine Besonderheit beobachtet werden: Der Cortex ist nur bei ca. einem Drittel der untersuchten Hornsteine im Querschnitt weiß. Die Farbpalette reicht von deutlich gräulicherem Weiß als gewöhnlich (10YR 8/1 white) (Witt. 3) über beige (10YR 8/2 bis 8/3 very pale brown) (z. B. Witt. 5; Witt. 4 und Witt. 11) bis ockerfarben (7.5YR 8/4 bis 7/4 und 7/3 pink) (z. B. Witt. 13 und Witt. 2). Teilweise ist er auch im Querschnitt deutlich fleckig braun- und dunkelgrau. Der ursprünglich weiße Cortex wird in Wittlingen demnach teilweise durch Oxidation von enthaltenen Ionen und Aufnahme weiterer Ionen aus der Umgebung nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Cortexinneren verändert.
Unter Löslichkeitsbedingungen können Ionen auch ins Innere des Hornsteins wandern und diesen farblich verändern. Das ist sicher bei den Sägeschnitten von Witt. 4 (Abb. 33) und Witt. 9 (Abb. 29) zu beobachten.



Abb. 33: Sägeschnitt von Witt. 4 (Ausschnitt). Wanderung farbgebender Substanzen von alten Bruchflächen ins Innere.

3.4.3 Cortexpatina

Die Farben der Cortexpatina sind für einzelne Fundorte durchaus typisch. Überwiegend ist sie im „Borgerhau“ gelblich bis ocker-orange (Y), in Wippingen beige bis braun (B) und in Wittlingen beige bis grau (G) (Tab. 12; Abb. 34).
Oft sind es aber eher graduelle Unterschiede, so zwischen „Borgerhau“ und Wippingen mit gelblich bis ocker-orange (Y) und beigefarben bis braun (B), wobei der Cortex der Hornsteine aus Wippingen durchschnittlich dunkler ist. Die dunkelsten Cortexpatina aller 35 Steine aus dem „Borgerhau“ und aus Wippingen fanden sich bei Borg. 17, Wipp. 15, Wipp. 6 und Wipp. 5. Die drei Wippinger Hornsteine kommen aus anstehendem Sediment und sind damit typisch für Wippingen, ebenso die braunen Cortexpatina.

Farben der Cortexpatina / **Fundorte**	weiß bis sehr hellgrau (W)	gelblich bis ocker-orange (Y)	beige bis braun (B)	beige bis grau (G)	**Summe**
Arnhofen	6	8	1	0	15
Borgerhau	0	19	1	0	20
Wippingen	0	2	13	0	15
Wittlingen	0	0	2	13	15
Ungarn	2	2	0	1	5
Summe (n)	8	31	17	14	70
Summe (%)	11,4	44,3	24,3	20	100

Tab. 12: Farben der Cortexpatina bei den Hornsteinen der untersuchten Fundorte nach Anzahl.

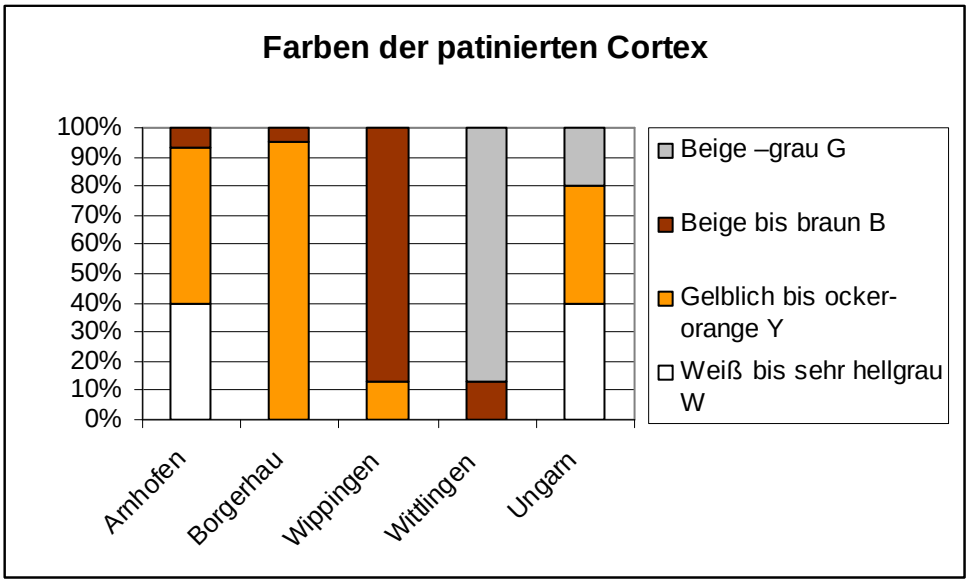


Abb. 34: Farben der Cortexpatina bei den Hornsteinen der einzelnen Fundorte in Prozent.

Im etwa 20 km entfernten Wittlingen ist der patinierte Cortex mehr beige-grau (G), und damit deutlich grauer als an den übrigen Fundorten. Nur Witt. 1 und 14 haben einen beigefarbenen bis braunen Cortex (B).
Die Hornsteine aus Arnhofen (Arnh. 1-6 und Arnh. 11-12) haben teilweise ähnliche Cortexfarben wie die Hornsteine aus dem „Borgerhau“ (Y). Teilweise (Arnh. 8-10 und Arnh. 13-15) scheint sich ein weißlicher Cortex nur hauchdünn entwickelt zu haben oder er ist, was wahrscheinlicher ist, verloren gegangen, sodass die Farbe der obersten und/oder untersten Hornsteinschicht durchschimmert; die patinierten Cortexreste erscheinen dann weißlich bis hellgrau (WH). Arnh. 7 hat einen beigen bis braunen Cortex (B).
Wie aufgrund der sehr unterschiedlichen Fundorte der ungarischen Cherts zu erwarten war, variiert der Cortex von weißlich bis grau.

3.4.4 Glanz

Mehrfach wurden stark glänzende Stellen auf Bruchflächen beobachtet, wie beispielsweise bei Borg. 7 (Abb. 36).

Fundort	Hornstein mit Glanz (n)	Hornstein gesamt (n)	Prozentsatz an Hornstein mit Glanz am Gesamthornstein (%)
Arnhofen	0	15	0
Borgerhau	2	20	10
Wippingen	8	15	53,3
Wittlingen	3	15	20
Ungarn	0	5	0

Tab. 13: Anteil von Hornsteinen mit Glanz am Gesamthornstein.

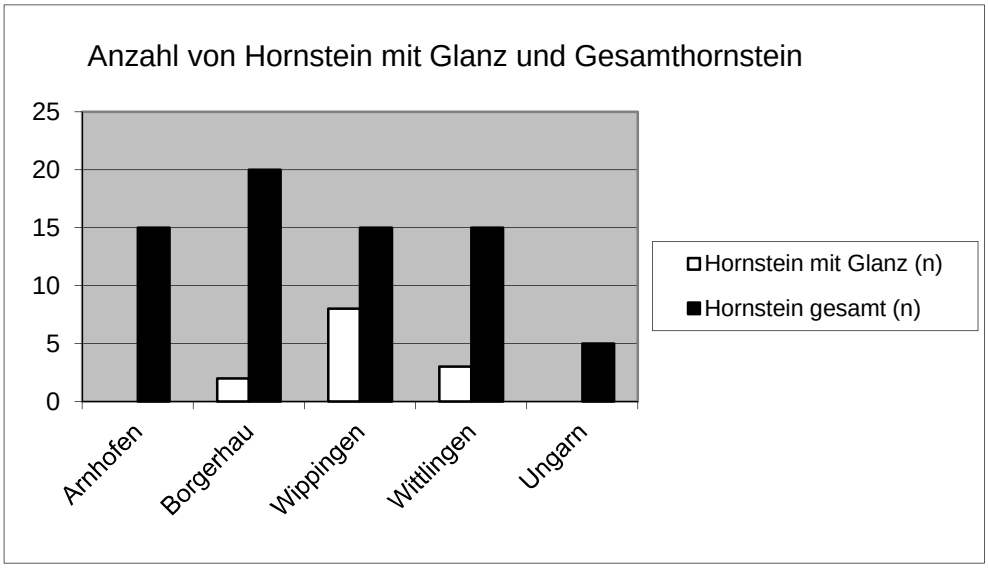


Abb. 35: Hornstein mit Glanz und Gesamthornstein der untersuchten Fundstellen.

Glanz wird häufig auf Sichelklingen gefunden, der „Sichelglanz“. Deshalb wird Glanz gewöhnlich mit kieselsäurehaltigen Gräsern in Verbindung gebracht, sodass Glanz auf Artefakten in der Archäologie ein deutlicher Hinweis auf die im Neolithikum eingeführte Bauernwirtschaft ist. Aber keiner der hier untersuchten Hornsteine ist eine Sichelklinge und auch die Stellen, an denen sich der Glanz befindet, sind keineswegs zum Schneiden von Gräsern geeignet (Abb. 36).



Abb. 36: Borg. 7. Bruchfläche mit zwei Glanzpunkten, ein weiterer dritter (mehr links unten) ist im Foto nicht sichtbar; ferner etwa in der Mitte verkieselte Kammmuschel.

Eigenschaften **Hornsteine**	Masse/ Durchmesser (g/mm)	Qualität	Grundform	Anzahl der Glanzstellen	Größter Durchmesser der Glanzstellen (mm)	Ort der Glanzstellen
Borg. 7	4,8	2	NSH	3	3, 5, 20	auf Bruchfläche, erhöhte Stellen
Borg. 12	5,8	2	TSH	4	2-9	Randbereich der Bruchfläche, erhöhte Stellen
Wipp. 1	7,0	3	NSH	2	7, 14	Randbereich der Bruchfläche, wenig erhöht
Wipp. 3	3,1	2	NSH	8	2-15	auf Bruchfläche ebene und leicht erhöhte Stellen
Wipp. 4	3,6	2	TSH	4	1-2, 22	auf Bruchfläche ebene und erhöhte Stellen
Wipp. 6	2,7	2	NSH	1	3	auf Bruchfläche an erhöhter Ecke
Wipp. 10	3,5	2	NSH	2	4, 11	auf Rand und Mitte einer Bruchfläche, nicht erhöht
Wipp. 13	2,4	2	SH	1	5	auf dem Cortex, erhöhte Stelle
Wipp. 14	2,6	1	SH	2	2-4	auf Bruchfläche, leicht erhöhte Stellen
Wipp. 15	2,9	2	NSH	9	< 1-5	auf Bruchfläche, erhöhte und nicht erhöhte Stellen
Witt. 6	2,2	2	CO	1	3	auf Abschlagsnegativ, erhöhte, aber nicht höchste Stelle
Witt. 9	3,6	3	SH	3	4-5	auf höheren und höchsten Stellen einer Bruchfläche, bilden Ecken eines Dreiecks
Witt. 12	3,3	5	TSH	1	4	auf erhöhter Stelle einer Bruchfläche

Tab. 14: Eigenschaften von untersuchten Hornsteinen mit Glanzstellen. (CO = Kern, SH = Trümmer, NSH = natürlicher Trümmer, TSH = getestete Knolle).

Bei einem Anteil von Hornstein mit Glanz von bis zu 53,3 % (Tab. 13; Abb. 35) in Wippingen sollte der Frage, woher der Glanz kommt, nachgegangen werden.

Die Hornsteine mit Glanz sind stets handliche Stücke, aber von sehr unterschiedlicher Form, Größe und Masse (zwischen 86 und 149 mm maximalem Durchmesser und einer Masse von 191 g bis 885 g) (Anhang A2) und Kompaktheit (Masse/Durchmesser) (Tab. 14). Sechs der 13 hier untersuchten Stücke mit Glanz sind natürliche Trümmer (NSH), zwei Trümmer (SH), vier getestete Knollen (TSH) und einer ein Kern (CO). Der Glanz befindet sich bei den untersuchten Hornsteinen, abgesehen von einer Ausnahme (Wipp. 13), stets auf Bruchflächen, an einer Bruchkante oder -ecke und überwiegend an den höchsten Stellen oder zumindest an erhöhten Stellen, niemals an tiefen Stellen (Tab. 14). Bei Wipp. 13 befindet sich ein < 2 mm breiter und 5 mm langer Glanzstreifen auf einer erhöhten Stelle des Cortex. Dagegen hat S. Harris bei der Bearbeitung von vielen Tausenden von Hornsteinen vom „Borgerhau“ und aus Wippingen auch Glanz in Vertiefungen gefunden[5]. Meist ist der Glanz eher punktförmig (ca. 1-5 mm Durchmesser), manchmal eher bandförmig (bis 11 mm Länge), oder er ist über eine größere Fläche (ca. 9-22 mm Durchmesser) aus überwiegend kleineren Punkten oder in anderen Mustern verteilt. Manchmal gibt es mehrere Stellen auf einem Stein, zweimal bilden sie die Ecken eines Dreiecks.

Die Frage der stark glänzenden Bereiche ist eine der weiterhin ungekärten Fragen. Da sich der Glanz überwiegend auf höheren bis höchsten Stellen etwas unebener Bruchflächen befindet, könnten die Hornsteingeräte mit der relativ flachen Abschlagseite auf kieselsäurehaltige Pflanzen, wie Gräser, Getreide oder Lein und Hanf gedrückt oder geschlagen worden sein.

L. Fisher et al. (2008a) werten stark glänzende Bereiche an den jeweils höchsten Stellen von „Grobgeräten“, grob einseitig oder beidseitig bearbeiteten Stücken, sowie Abschlägen oder Trümmern mit ausgesplitterten oder beschädigten Kanten als Gebrauchsspuren oder Hinweise auf eine ehemalige Schäftung. Wipp. 10 hat fast parallel zur Verbindungslinie der Glanzstellen eine Rille, was für eine Schäftung sprechen könnte. Weitere Nutzungsspuren fehlen.

Fünf der acht Hornsteine aus Wippingen mit Glanz stammen sicher aus anstehendem Sediment, Borg. 7 ebenfalls. Eine jungsteinzeitliche Verwendung als Werkzeug ist deshalb, zumindest bei diesen Steinen, auszuschließen. Somit könnte es sich hier um eine jüngere Lösung und Fällung von Silikaten im Umfeld der Verwitterungslehme handeln.

[5] Dr. S. Harris, mündlich am 12.07.2010.

3.5 Fossilien

Theoretisch könnte man die gesamte Fauna des Oberen Jura fossil auf oder im Hornstein finden, naturgemäß sind aber eher kleine Lebewesen, ihre Kolonien oder Teile größerer Tiere erhalten. Häufig sind diese jedoch so stark zerscherbt, dass es kaum mehr möglich ist, sie auch nur einer bestimmten Familie, Ordnung oder Klasse zuzuordnen (Affolter 2002, 24). Da die Silifikation Fossilien nicht zerstört, müssen sie schon im Kalk zerscherbt gewesen sein.
Relativ gut erhaltene, verkieselte Fossilien oder deren Abdrücke befinden sich vor allem auf dem Cortex. In geringerer Häufung wurden auch im Hornsteininneren mit bloßem Auge Fossilreste entdeckt. Mit der Lupe (10-fache Vergrößerung) sind dort zudem Nadeln von Kieselschwämmen zu erkennen.

3.5.1 Fossilien auf dem Cortex

Cortexfossilien sind sehr unterschiedlich auf die verschiedenen Fundorte (Tab. 15; Abb. 37), ja sogar auf verschiedene Schnitte desselben Fundortes im „Borgerhau“ verteilt (Tab. 16).

Fundorte / **Cortexfossilien**	Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	Ungarn
Anzahl Hornsteine mit Cortexfossilien (n)	0	5	0	2	0
Prozent der Hornsteine mit Cortexfossilien (%)	0	25	0	13,3	0

Tab. 15: Cortexfossilien an einzelnen Fundorten.

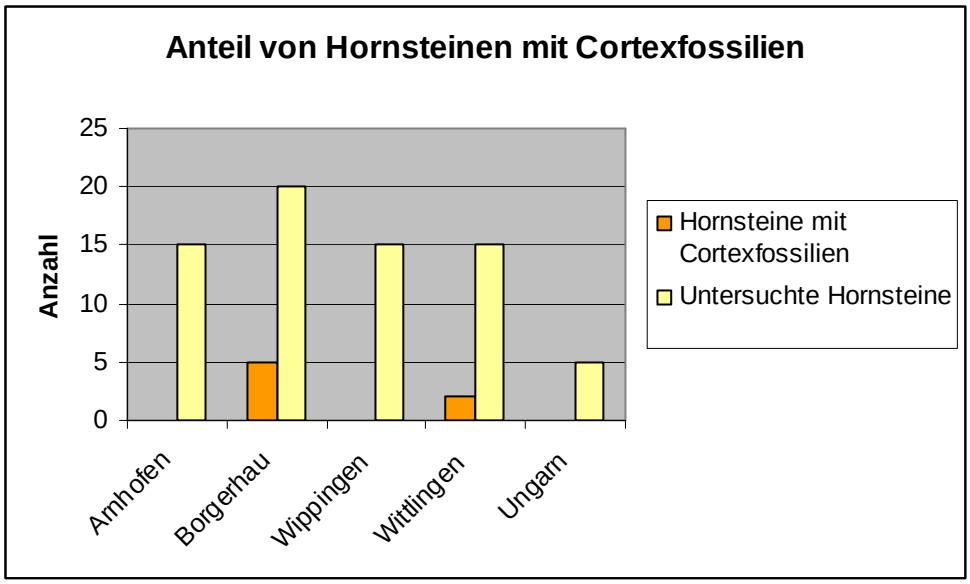


Abb. 37: Cortexfossilien an den Fundorten.

In Arnhofen und auf den ungarischen Cherts wurden auf den Cortices keine Fossilien entdeckt. Auch auf den Cortices der Hornsteine aus Wippingen sind keine bestimmbaren Fossilien erhalten (Abb. 37) (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor Stuttgart, mündlich).

Dagegen wurden im Cortex der Hornsteine aus Wittlingen Fossilien gefunden, z. B. auf Witt. 1 die Wurmröhre eines Borstenwurmes (Annelida, Klasse Polychaeta) (Abb. 38), auf Witt. 6 ein Schalenfragment einer Muschel (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata) oder eines Armfüßers (Tentaculata, Klasse Brachiopoda) (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor Stuttgart, mündlich).



Abb. 38: Witt. 1. Röhre eines Borstenwurmes (Vergrößerung ca. 10x).

Auch im „Borgerhau“ gab es häufiger Fossilien auf dem Cortex von Hornsteinen, diese waren allerdings nicht gleichmäßig auf alle Schnitte verteilt (Tab. 16; Abb. 39).

Grabungsschnitte im „Borgerhau“ **Cortexfossilien**	Schnitt I	Schnitt III	Schnitt IV	Schnitt V	**Summe**
Anzahl Hornsteine mit Cortexfossilien	0	0	1	4	5
Anzahl der untersuchten Hornsteine	1	4	6	9	20

Tab. 16: Verteilung der Cortexfossilien auf verschiedene Schnitte im „Borgerhau“.

Von den untersuchten Hornsteinen enthält in Schnitt IV nur Borg. 13 eine verkieselte Kammmuschel (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata) im Cortex.

Dagegen wurden in Schnitt V im „Borgerhau“, der nur etwa 55 m von Schnitt IV entfernt lag, nicht nur die meisten Hornsteine mit Fossilien auf dem Cortex, sondern auch die mit besonders vielen und den am besten erhaltenen Fossilien gefunden. Deutlich wird das an Borg. 20 mit fünf erhaltenen Querschnitten durch einen oder mehrere Seelilienstämme (Echinodermata, Klasse Crinoidea), einer davon besonders gut (Abb. 40). Seelilien zeigen im späteren Jurameer Flachwasser, evtl. Richtung Korallenriff, an. Borg. 15, ebenfalls aus Schnitt V hat auf seinem sehr dünnen Cortex stark zerscherbte Fossilien, unter denen besonders viele Seeigelstacheln (Echinodermata, Klasse Echinoidea) und andere Echinodermenreste, sowie Kammmu-

scheln (Abb. 41) hervorzuheben sind, außerdem ein halber Ammonitenkiefer (Mollusca, Klasse Cephalopoda) (Abb. 42) (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor Stuttgart, mündlich).

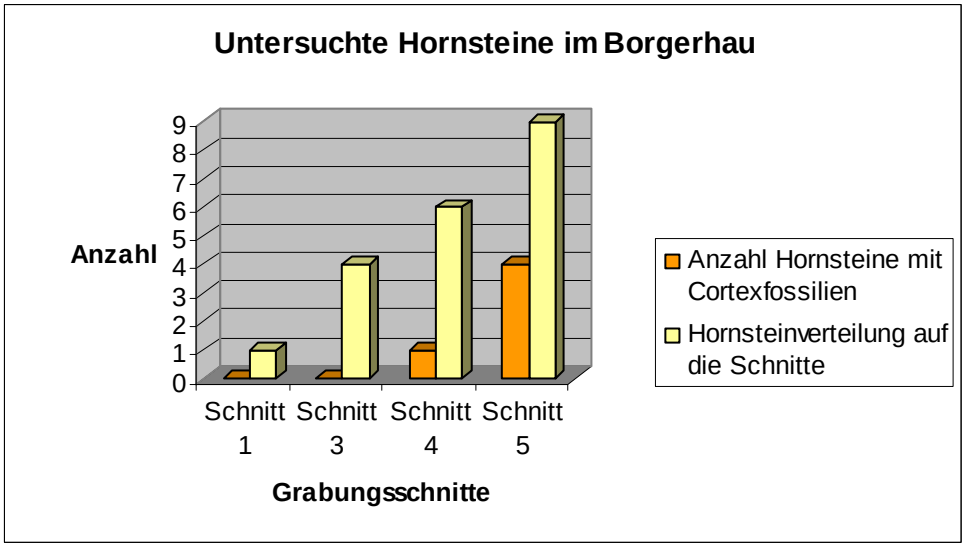


Abb. 39: Verteilung der untersuchten Hornsteine im „Borgerhau“ auf die Grabungsschnitte.



Abb. 40: Borg. 20. Querschnitt durch einen fossilen Seelilienstamm (Vergrößerung ca. 3,3x).



Abb. 41: Borg. 15. Kammmuschel (Vergrößerung ca. 6,5x).



Abb. 42: Borg. 15. Fossiler halber Ammonitenkiefer (Vergrößerung ca. 7x).



Abb. 43: Borg. 17. Cortex eines Hornsteins aus Schnitt V im „Borgerhau“ übersät mit stark fragmentierten Fossilien aus dem Jurameer.

Vor allem auf der Cortexoberfläche von Borg. 17 (Abb. 43) befindet sich verkieselt ein erheblicher Teil der Fauna des Jurameeres. Beide „Seiten“ des eher elipsoiden Hornsteins sind übersät mit stark fragmentierten Fossilien: mit Austern (Abb. 44), weiteren Muscheln (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata), Schnecke (Abb. 45) (Mollusca, Klasse Gastropoda), einem Plattenteil eines Seeigels mit Stachelwarze (Abb. 46) (Echinodermata, Klasse Echinoidea), Armfüßer (Tentaculata, Klasse Brachiopoda), Röhrenwurm oder eher Moostierchen (Tentaculata, Klasse Bryozoa). In weit geringerem Umfang enthält der Cortex von Borg. 18, ebenfalls aus Schnitt V, zerscherbte Fossilien an der Oberfläche (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, Stuttgart, mündlich).



Abb. 44: Borg. 17. Fossile Austern auf dem Cortex (Vergrößerung ca. 2,5x).



Abb. 45: Borg. 17. Schnecke im Cortex (Vergrößerung ca. 5x).



Abb. 46: Borg. 17. Stachelwarze eines Seeigels (Vergrößerung ca. 3x).

Hier, im Bereich von Schnitt V, muss es im Jurameer eine Meeresströmung gegeben haben, die die Jurafauna anreicherte, ablagerte und zerscherbte (Prof. M. Kučera, Mikropaläontologie, Universität Tübingen, mündlich).

3.5.2 Fossilien im Hornsteininneren

In einigen Fällen wurden Fossilien mit bloßem Auge auf Bruchflächen und im Sägeschnitt entdeckt. So befindet sich auf der Bruchfläche von Borg. 7 (Abb. 36) eine verkieselte Kammmuschel, *cingentulium sp.* (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata). Im Sägeschnitt von Witt. 4 befindet sich eine Austernschale (Abb. 47) (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata) (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, Stuttgart, mündlich).



Abb. 47: Witt. 4. Austernschale im Sägeschnitt (Vergrößerung ca. 5x).

Gut erkennbare Armfüßer (Tentaculata, Klasse Brachiopoda) sind im Sägeschnitt von Borg. 14 zu sehen (Abb. 48), ebenso in dem von Witt. 13 (Abb. 49) und Witt. 15, Seeigelstacheln (Echinodermata, Klasse Echinoidea) kommen auf der Bruchfläche von Borg. 17 (Abb. 50) und Wipp. 7 vor, Serporöhren (Annelida, Klasse Polychaeta) bei Wipp. 7; Witt. 9 (Abb. 51); Witt. 11 und wohl auch bei Witt. 10 (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, Stuttgart, mündlich).



Abb. 48: Borg. 14. Fossiler Armfüßer im Sägeschnitt (Vergrößerung ca. 7,5x).



Abb. 49: Witt. 13. Fossiler Armfüßer im Sägeschnitt (Vergrößerung ca. 5x).



Abb. 50: Borg. 17. Fossiler Teil eines Seeigelstachels in der Bruchfläche (Vergrößerung ca. 5x).



Abb. 51: Witt. 9. Mehrere Schnitte durch eine oder mehrere Serporöhren (Vergrößerung ca. 5x).

Wiederum wurden auch im Inneren von mehr Hornsteinen aus dem „Borgerhau“ und aus Wittlingen Fossilien gefunden, am meisten bei den Hornsteinen aus Wittlingen (Tab. 17 und Abb. 52). Arnhofen scheint, soweit mit bloßem Auge zu sehen, fossilfrei zu sein, in Wippingen und Ungarn gab es jeweils nur ganz wenige Hornsteine und Cherts mit Fossilien (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, mündlich).

Fundorte	Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	Ungarn
Fossilien im Inneren					
Anzahl Hornsteine mit sichtbaren Fossilien im Hornsteininneren	0	5	2	7	1
Prozent der Hornsteine mit Fossilien im Inneren	0	25	13,3	46,7	20

Tab. 17: Anteil der Hornsteine und Cherts mit Fossilien im Inneren (Tabelle A. M. Bertsch).

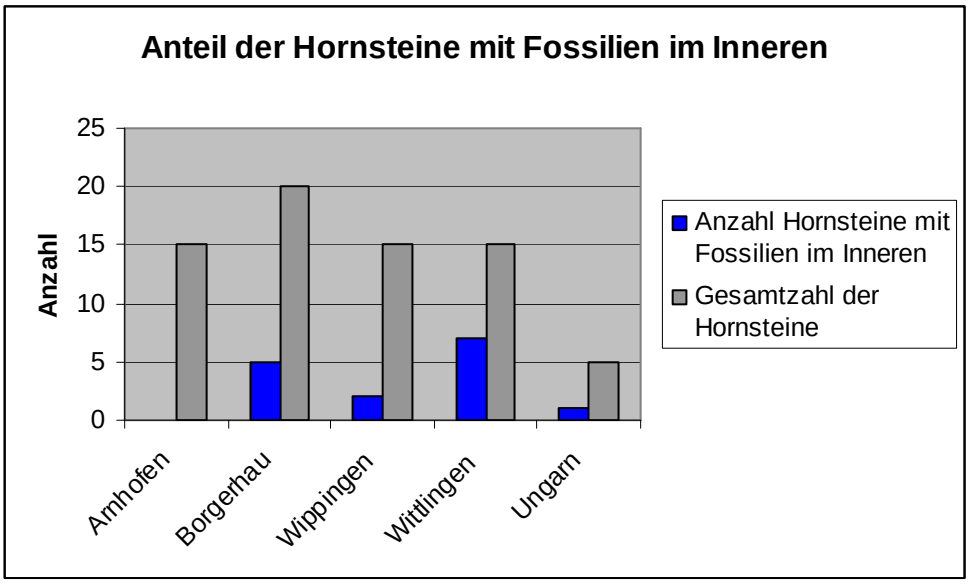


Abb. 52: Anteil der Hornsteine mit sichtbaren Fossilien im Inneren.

Wie G. Schweigert (Museum am Löwentor, Stuttgart, persönliche Kommunukation 2010) feststellte, sind in weitaus den meisten Hornsteinen Kieselschwammnadeln (Porifera, Klasse Hexactinellida) erhalten und mit der Lupe bei 10-facher Vergrößerung als kleine weiße Punkte zu sehen. Dicht besetzt damit sind vor allem die Bruchflächen und Sägeschnitte aus Wittlingen. Eine mittlere Menge an Kieselschwammnadeln, deutlich weniger als in den Hornsteinen aus Wittlingen, findet man in denen aus dem „Borgerhau“ und Wippingen. Die Hornsteine aus Wippingen enthalten meist noch etwas weniger Schwammnadeln im Inneren als die vom „Borgerhau“. Die Plattenhornsteine aus Arnhofen haben meist in den dunklen Schichten wenige Schwammnadeln. Die ungarischen Cherts sind frei von Schwammnadeln (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, Stuttgart mündlich). Zusammengefasst ist das in Tabelle 18.

Fundort **Schwamm-nadeln**	Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	Ungarn
Menge (relativ)	wenige	mittel	mittel	sehr viele	keine
Ausnahmen	keine	wenige: Borg. 4, 7, 12, 13 sehr viele: Borg. 16	viele: Wipp. 10, 11 sehr viele: Wipp. 9	viele: Witt. 15	Keine
Ausnahmen in %	0	25	20	6,7	0

Tab. 18: Relative Menge an Schwammnadeln in Hornsteinen verschiedener Fundorte.

Aber es gibt auch einige Ausnahmen (Tab. 18): Im „Borgerhau“ haben vier Hornsteine (Borg. 4, 7, 12 und 13) weniger Schwammnadeln als der Durchschnitt, Borg.16 dagegen viel mehr. Von den Wippinger Hornsteinen haben drei Hornsteine mehr und viel mehr Schwammnadeln als dort durchschnittlich zu erwarten sind (Wipp. 10, 11; Wipp. 9); in Wittlingen weicht nur ein Hornstein (Witt. 15) vom Durchschnitt ab.
Die durchschnittliche Dichte an Kieselschwammnadeln differiert demnach interessanterweise von Fundort zu Fundort. Diese ist abhängig von der Entfernung der Fundstelle zu einem ehemaligen Schwammriff und von ehemaligen Meeresströmungen, die die Schwammnadeln transportierten. Deshalb ist die durchschnittliche Menge Schwammnadeln durchaus geeignet, Artefakte bestimmten Fundorten zuzuordnen.

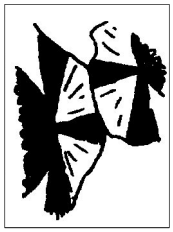


Abb. 53: Sphärolytischer Chalcedon, der in Poren hineingewachsen ist (Wilson 1966, Abb. 2, Ausschnitt).

Zum Nachweis der Schwammnadeln wurde von jedem der Fundorte zumindest ein Dünnschliff hergestellt und ausgewertet, wobei der Dünnschliff bei den Arnhofener Hornsteinen

parallel zur Oberfläche durch die dunkle Schicht geführt wurde, um die Schwammnadeln besser sichtbar zu machen (Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, Stuttgart, mündlich). Die Schwammnadeln sind als kreisförmige Querschnitte von ca. 50-150 µm Durchmesser, ellipsenförmige Schrägschnitte oder als Längsschnitte zu sehen (Abb. 54). Da Hornsteine stark diagenetisch überprägt sind, sind Schwammnadeln im Schnitt nicht mehr so deutlich abgegrenzt erkennbar wie im Kalk (Prof. A. Nebelsick, Invertebraten-Paläontologie, Universität Tübingen, mündlich; Dr. G. Schweigert, Museum am Löwentor, Stuttgart, mündlich).
Die Hohlräume der Schwammnadeln wurden, wie auch andere Hohlräume, mit sphärolithischem Chalcedon (Abb. 53) von außen nach innen gefüllt, was sie im polarisierten Licht weiß strahlen lässt (Wilson 1966; Hesse 1989; Affolter 2002, 28 Abb. 19).

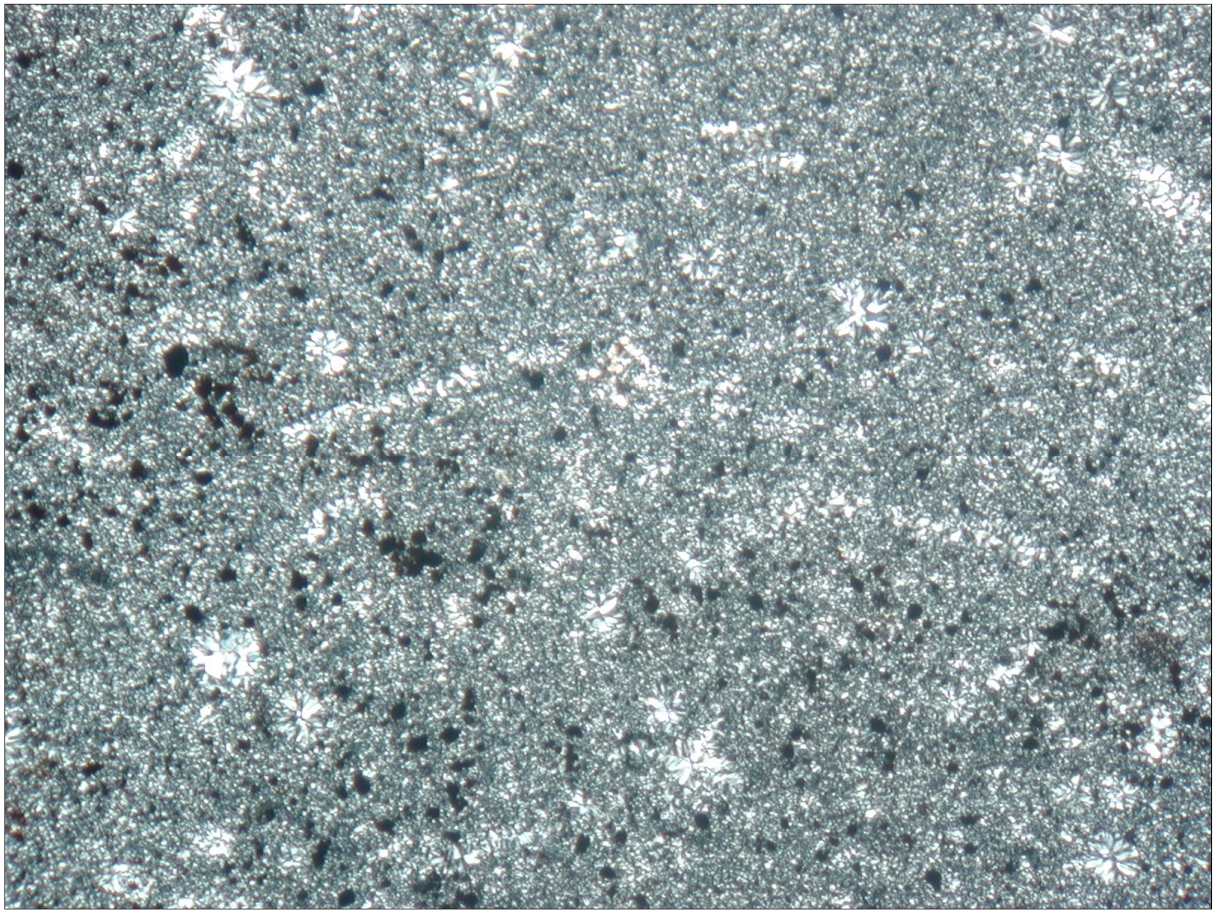


Abb. 54: Witt. 7. Dünnschliff (und Messskala: 1 mm) mit ca. 24 sehr wahrscheinlichen Schwammnadelschnitten (Aufnahme mit Canon-Kamera am Polarisationsmikroskop Leica Laborlux 12 Pol S).

Im Dünnschliff (Abb. 54) sieht man deutlich, wie die vor allem runden, selten ovalen und länglichen Hohlräume der Schwammnadeln mit sphaerolytischem Chalcedon gefüllt sind, in der Mitte ist häufig noch wenig vom Zentralkanal zu sehen (Beurer 1971, 64 Abb. 18; 20; 68 Abb. 35).

Die Dünnschliffe wurden jeweils in acht etwa gleichgroße Rechtecke unterteilt und unter dem Polarisationsmikroskop Leica Laborlux 12 Pol S betrachtet und fotografiert. Aus jedem

Rechteck wurde eine Probe von 2,9 mm x 2,3 mm auf Schwammnadeln ausgezählt und daraus die durchschnittliche Menge an Schwammnadeln je cm^2 Dünnschliff und Fundort bestimmt (Tab. 19; Abb. 55).

Schwammnadeln	Arnh. 4	Borg. 5	Wipp. 4	Witt. 7	Hung. 1
Durchschnittliche Anzahl je Probe (6,67 mm^2)	0,6	2,6	2,0	14,3	0
Durchschnittliche Anzahl je cm^2	9	39	30	214	0

Tab. 19: Relative Anzahl von Schwammnadeln in Hornstein.

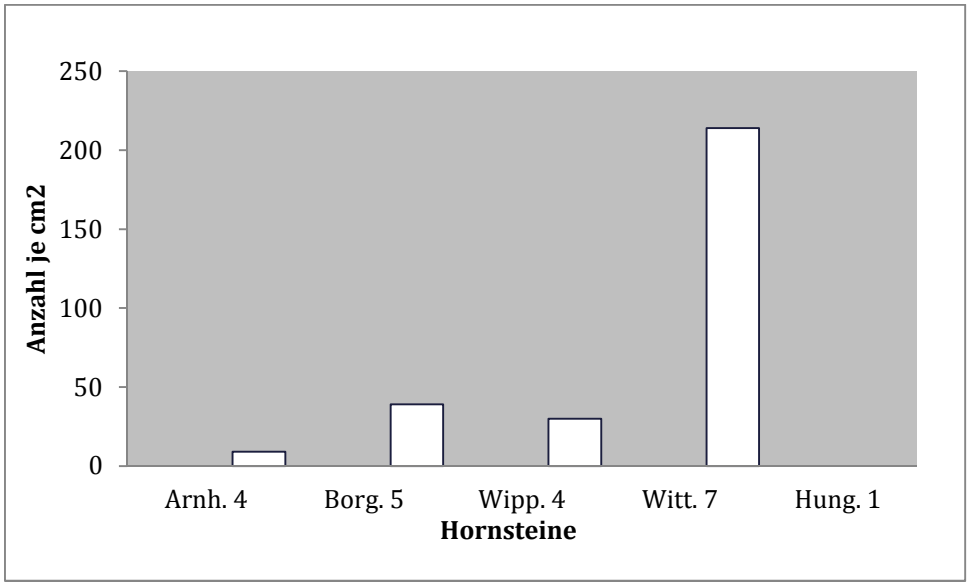
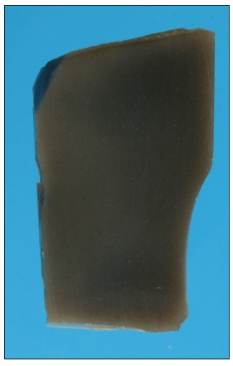


Abb. 55: Durchschnittliche Anzahl von Schwammnadeln je cm^2 je eines Hornsteins je Fundort. Ausgezählt von Dünnschliffaufnahmen unter dem Polarisationsmikroskop.

Wittlingen hat danach deutlich mehr als das Fünffache an Schwammnadeln als Hornsteine anderer Fundplätze. Deshalb ist Wittlingen durch seinen Schwammnadelreichtum deutlich von den anderen Fundorten abgrenzbar. „Borgerhau“ und Wippingen unterscheiden sich im Schwammnadelgehalt weniger deutlich.

3.6 Zusammenfassung

Die Cherts aus Ungarn sind in sich sehr heterogen, sie stammen nicht nur aus verschiedenen Gegenden Ungarns, sondern auch von verschiedenen Fundstellen. Es sind keine Jurahornsteine, sondern Triascherts. Die Cherts aus Ungarn bleiben deshalb in der Zusammenfassung unberücksichtigt.
Da bei dieser Arbeit die Unterscheidung von Jurahornstein verschiedener Fundplätze im Vordergrund steht, sind hier häufige, optisch feststellbare Unterschiede der untersuchten Hornsteine tabellarisch zusammengefasst (Tab. 20).

	Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen
Form des Rohmaterials	Platten	Knollen, Fladen	Knollen	Knollen
Musterung des Hornsteins	**schichtparallel gebändert**	**meist konzentrisch gebändert** (selten marmoriert)	**nur schwach und meist randlich gebändert,** innen einfarbig bis leicht schlierig	a) einfarbig b) meist **schlierig-wolkig**
Farben des Hornsteins	meist mittel- bis dunkelbläulichgrau	meist hell- bis mittelbläulichgrau	a) weißlich bis hellgrau, **im Inneren hellviolette Verfärbung** b) beige-grau	a) hell- bis mittel-bläulichgrau b) meist beige mit braun, v. a. am Rand weißlich bis bläulich-grau
Cortex	dünn	dünn, hart bis **teilweise dick und relativ weich**	überwiegend gröber strukturiert, dünn, hart	kleinwellig, dünn und hart bis dick und weicher
Patinierung des Cortex	gelblich bis ocker-orange, wenige Manganpunkte	gelblich bis ocker-orange, wenige Manganpunkte	beigefarben bis braun, teilweise mit viel Mangan	**gräuliches Beige mit viel Mangan**
Durchschnittliche Qualität	1,3	2,3	2,3	3,1
Schwammnadeln im Inneren (Lupe)	wenig	mittel	mittel	sehr viel
Dünnschliffe				

Tab. 20: Wichtige Merkmale zur optischen Unterscheidung von Jurahornsteinen der verschiedenen Fundorte.

Beim Rohmaterial lässt sich der Plattenhornstein aus Arnhofen leicht durch seine schichtparallele Bänderung und meist auch durch die dunklere Färbung abgrenzen. Von den Knollenhornsteinen kann man das Material aus Wittlingen vor allem aufgrund der gräulich-beigefarbenen Patinierung des Cortex (mit viel Mangan) aussortieren, der Hornstein sollte dann noch einfarbig oder deutlich marmoriert sein. Die Trennung von Hornsteinen aufgrund optischer Merkmale aus dem „Borgerhau“ und dem nahen Wippingen ist am schwierigsten. Beide haben eine gelbliche, ockerfarbene bis rostbraune Patinierung des Cortex, die aber im „Borgerhau“ meist heller ist. Ist der Hornstein bläulich-grau, konzentrisch gebändert und hat er einen (teilweise) dickeren Cortex, dann kommt er aus dem „Borgerhau“. Ist er sehr hell, schwach und nur am Rand gebändert und möglichst im Inneren hellviolett, ist er Wippingen zuzuordnen.
Immerhin lassen sich die meisten der für diese Arbeit untersuchten Jurahornsteine der Schwäbischen Alb den Beschreibungen den Rohmaterialgruppen nach Strien (2000, 10-12) zuordnen: die Wittlinger Hornsteine erwartungsgemäß der Gruppe 4; 11 der 15 Wippinger Hornsteine der Gruppe 7 (Ostalb) und 13 der 20 Hornsteine aus dem „Borgerhau“ der Gruppe 8 (unbekannter Herkunft). Möglicherweise ist demnach der „Borgerhau“ der damals unbekannte Herkunftsort des nach Strien seltenen, auffällig gebänderten Rohmaterials der Gruppe 8.

Anders gefärbte und gemusterte Hornsteine sind nach dem obigen System nicht eindeutig zuordnenbar; und das betrifft immerhin Borg. 9, Borg. 12, Borg. 15, Borg. 18, Borg. 20; Wipp. 1, Wipp. 7, Wipp. 9, Wipp. 10, Wipp. 11; Witt. 1, Witt. 4 und Witt. 12, also gut ein Viertel (genau 26 %) der untersuchten Stücke aus dem „Borgerhau“, aus Wippingen und Wittlingen. Interessant ist, dass von den Ausnahmen nur Wipp. 1 aus anstehendem Sediment kommt. Borg. 12 fällt optisch besonders dadurch heraus, dass er keinerlei konzentrische Bänderung besitzt, dafür am Rand mindestens zwei schmale tief graublaue Bänder mit bläulich-grauen Schlieren ins Hornsteininnere hinein (Abb. 29). Bei Borg. 17 fällt die schlechte, sehr porige Qualität mit einem dichten Besatz mit Fossilien im Cortex auf (Abb. 43).

Das oben gesagte gilt für Hornsteine, die frisch angeschlagen oder zersägt wurden. Viel schwieriger ist eine Zuordnung von Artefakten unbekannter Provenienz zu einer der obigen Fundstellen. Sicher ist das nur wegen der stets sichtbaren planparallelen Bänderung beim Arnhofener Plattenhornstein. Bei allen übrigen gibt es mehr oder weniger große Schwierigkeiten. So fehlt meist der Cortex als wichtiger Hinweis. Ein Artefakt mit gebogener Bänderung kann aus dem Randbereich oder mehr aus dem Inneren der Knolle kommen. Marmorierte Steine kommen im „Borgerhau“, in Wippingen und in Wittlingen vor.
Eine weitere Schwierigkeit bereitet die Patinierung der Oberflächen der Artefakte vor allem wegen des Einflusses der gelblich-, ocker- bis rostfarbenen Fe^{3+}-Ionen, die die Originalfarbe übertönen. Die Oberflächenfarben werden dadurch deutlich verändert, sie erscheinen dann alle eher beigefarben, grau-beigefarben, bräunlich-grau bis bräunlich-schwarz. Deshalb stimmte die Hornsteinfarbe einer angeschlagenen Knolle häufig schlecht mit der Sägeschnittfarbe überein (Anhang A2).
Da mit einer deutlich höheren Fehlerquote als 26 % der Zuordnung von Hornsteinartefakten aufgrund optischer Merkmale zu rechnen ist, bieten sich weitere Verfahren für die Zuordnung von Artefakt und geologischem Herkunftsort an. Das ist zum einen die Zuordnung aufgrund

von Fossilien, wie sie von Affolter (2002) und Binsteiner (2007, 24-28) teilweise erfolgreich durchgeführt wurden. Zur Unterscheidung der geologischen Herkunft bietet sich hier besonders die durchschnittliche Menge an Schwammnadeln im Hornsteininneren an. Die ungarischen Hornsteine waren ohne Schwammnadeln. Die Arnhofener Plattenhornsteine haben wenige Schwammnadeln in den dunklen Schichten. Die drei Fundstellen auf der Schwäbischen Alb unterscheiden sich teilweise in der durchschnittlichen Konzentration an Schwammnadeln: die Wippinger Hornsteine haben ebenso wie die aus dem „Borgerhau“ eine mittlere Menge, die Wittlinger dagegen haben dichte Schwammnadelkonkretionen.
Sowohl bei den makroskopisch sichtbaren Merkmalen als auch bei der Menge enthaltener Kieselschwammnadeln fällt Borg. 12 bei den Hornsteinen aus dem „Borgerhau“ heraus, er scheint demnach nicht aus dem „Borgerhau“ zu stammen. In Wippingen gilt dasselbe für die Hornsteine Wipp. 9 und 10. Alle drei „optischen Hornsteinexoten“ kamen nicht aus dem anstehenden Sediment. In Wittlingen und Arnhofen gibt es keine Hornsteine, die sowohl bei den makroskopisch sichtbaren Merkmalen als auch bei der Menge enthaltener Kieselschwammnadeln stark abweichen.

Eine weitere Möglichkeit wäre eine Unterscheidung aufgrund von chemischen Markern, wie es in den folgenden Kapiteln versucht werden soll.

4 Untersuchung der Hornsteine mittels Sauerstoffisotopie ($\delta^{18}O$)

Schon seit den 60er Jahren des 20. Jh. beschäftigen sich Forscher mit $\delta^{18}O$-Werten von Cherts (Degens und Epstein 1962; Perry 1967). Eingeführt wurde die Sauerstoffisotopen-Geochemie von Cherts durch Knauth und Epstein (1975; 1976) und Kolodny und Epstein (1976).

4.1 Prinzip der Sauerstoffisotopie

Sauerstoff ist Bestandteil des Quarzes (SiO_2), der seinerseits ca. 98 % der Hornsteine ausmacht; außerdem kann Sauerstoff an andere Elemente als Silicium, vor allem an Metalle (zum Beispiel *Al, Ti, Fe*) oder Nichtmetalle (zum Beispiel an *C* in Carbonat CO_3^{2-}) im Hornstein gebunden sein. Insgesamt besteht der Hornstein zu mindestens 54 % aus Sauerstoff.

In der Natur kommt Sauerstoff in Form von drei stabilen Isotopen vor, als ^{16}O, ^{17}O und ^{18}O (Hollemann & Wiberg (2007, 498).

Kern	Isotop	Masse	natürliches Mengenverhältnis
8 Neutronen 8 Protonen	$^{16}_{8}O$	15,994915 u	99,757 %
9 Neutronen 8 Protonen	$^{17}_{8}O$	16,999132 u	0,038 %
10 Neutronen 8 Protonen	$^{18}_{8}O$	17,999161 u	0,205 %

Tab. 21: Unterschiede der drei natürlichen Sauerstoffisotope (nach Lide 2007/2008, 11-59).

Wie in Tab. 21 dargestellt, haben Isotope desselben Elementes die gleiche Anzahl von Protonen (mit positiver Ladung) im Kern. In der Atomhülle befindet sich jeweils die gleiche Zahl relativ massearmer Elektronen (mit negativer Ladung). Aufgrund derselben Elektronenverteilung in der Atomhülle der Isotope eines Elementes haben diese auch im Wesentlichen die gleichen chemischen Eigenschaften. Schwerere Isotope werden jedoch aufgrund geringerer Vibrationsfrequenzen im Molekül fester gebunden; deshalb sind Moleküle, die schwere Isotope gebunden haben, bei gleicher Temperatur stabiler und damit weniger reaktionsbereit als Moleküle, die leichte Isotope enthalten (Faure & Mensing 2005, 694; Markl 2008, 486).
Isotope desselben Elementes unterscheiden sich in der Zahl der Neutronen und damit in der Masse, so ist zum Beispiel ^{18}O um 12,5 % schwerer als ^{16}O. Die Geschwindigkeit von Molekülen mit leichten Isotopen ist aufgrund gleicher kinetischer Energie größer als die mit schweren Isotopen bei gleicher Temperatur. Aufgrund unterschiedlicher Masse können Moleküle mit verschiedenen Sauerstoffisotopen in Gasen und Flüssigkeiten getrennt und nachgewiesen werden, weniger leicht in Feststoffen wie Gesteinen (Faure & Mensing 2005, 694).
In der Natur kommen unterschiedliche Verhältnisse der Sauerstoffisotope vor, auch in Cherts. Wegen der geringen Menge wird ^{17}O im Allgemeinen vernachlässigt und fast ausschließlich

die von der Umwelt abhängige Gleichgewichtseinstellung zwischen ^{18}O und ^{16}O betrachtet (Hoefs 2009, 58).

4.1.1 Sauerstoff-Isotopenfraktionierung im Wasser

Das Verhältnis R von ^{18}O zu ^{16}O ist in der Natur ungefähr das folgende:

$$R = \frac{^{18}O}{^{16}O} = \frac{0{,}205}{99{,}757} = 0{,}00205$$

Als Standard ***S**tandard **M**ean **O**cean **W**ater,* SMOW, wurde das Verhältnis von $^{18}O/^{16}O$ im Jahr 1976 von Baertschi auf (2005,20 ± 0,45) * 10^{-6} festgelegt.

Um gemessene Werte vergleichbar zu machen, werden sie auf den international anerkannten Standard SMOW bezogen und, da sie sehr klein sind, mit 1.000 multipliziert. Die Angabe erfolgt in der Delta-Notation in ‰ (vgl. Faure 2005, 695; Markl 2008, 489):

$$\delta^{18}O = \left(\frac{^{18}O/^{16}O_{Probe} - {}^{18}O/^{16}O_{Standard}}{^{18}O/^{16}O_{Standard}}\right) * 1000 \qquad \text{oder}$$

$$\delta^{18}O = \left(\frac{^{18}O/^{16}O_{Probe}}{^{18}O/^{16}O_{SMOW}} - 1\right) * 1000$$

$\delta^{18}O = 0$ → gleiche Konzentration von Probe und SMOW
$\delta^{18}O < 0$ → Isotopenverhältnis der Probe geringer als im Standard
$\delta^{18}O > 0$ → Isotopenverhältnis der Probe höher als im Standard, ^{18}O ist relativ angereichert

Die $\delta^{18}O$-Zusammensetzung der Gewässer auf der Erde schwankt zwischen etwa -40 ‰ und +5 ‰ (Abb. 56; Dr. H. Taubald, Isotopengeochemie, Universität Tübingen, mündlich, 13.05.2013).

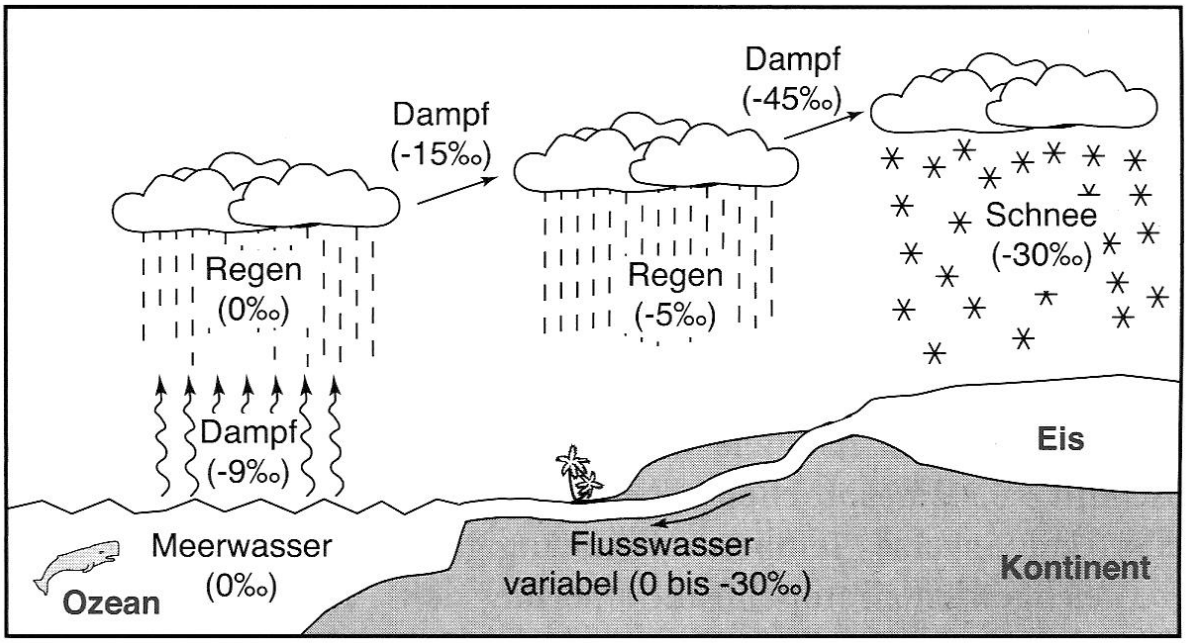


Abb. 56: $\delta^{18}O$ -Werte im atmosphärischen Kreislauf des Wassers (Markl 2008 Abb. 4.80).

Die Stärke der Isotopenfraktionierung beim Übergang von einem Aggregatzustand in einen anderen wird quantitativ durch den Fraktionierungsfaktor α ausgedrückt. Für den Übergang der flüssigen in die Gasphase ist α folgendermaßen definiert:

$$\alpha_v^l = \frac{R_l}{R_v}$$

R_l = Isotopenverhältnis der flüssigen Phase
R_v = Isotopenverhältnis der Gasphase (im Gleichgewicht mit der flüssigen Phase bei konstanter Temperatur)

Üblich ist es, den Isotopenfraktionierungsfaktor als Quotient der Isotopenverhältnisse von flüssig zu gasförmig bzw. fest zu flüssig anzugeben. Der Faktor α ist dann in den meisten Fällen > 1. Mit zunehmender Temperatur nimmt allerdings im Allgemeinen der Isotopenfraktionierungsfaktor ab und nähert sich bei sehr hohen Temperaturen dem Wert α = 1 (Faure 2005, 695-697).

Für die $\delta^{18}O$-Werte des atmosphärischen Kreislaufs des Wassers ist sowohl die kinetische Fraktionierung, die sehr schnell abläuft, als auch die Gleichgewichtsfraktionierung von Bedeutung. Für Gesteine und damit für Hornstein spielt die kinetische Fraktionierung kaum eine Rolle und kann deshalb vernachlässigt werden, dagegen ist die massenabhängige Isotopenfraktionierung im Gleichgewicht von Bedeutung (Markl 2008, 484-486). Wenn also in dieser Arbeit im Zusammenhang mit Hornstein und Chert von Isotopenfraktionierung gesprochen wird, handelt es sich um Gleichgewichtsfraktionierung.

4.1.2 Anwendung der Sauerstoffisotopie auf Hornstein

Es hat sich gezeigt, dass der Fraktionierungsfaktor α nicht nur für verschiedene Phasen desselben Stoffes, zum Beispiel Wasser, gültig ist. Er ist auch auf Gesteine, unter anderem Hornstein oder Chert, und Wasser anwendbar, wenn sich die Gesteine mit dem Wasser, auch eingeschlossenem, im Gleichgewicht befinden (Faure & Mensing 2005, 735 f.).

Die Isotopenfraktionierung ist temperaturabhängig. Generell produzieren Bindungen mit hoher Bindungsstärke und geringer Masse, wie in *Si-O*-Bindungen, hohe Vibrationsfrequenzen und tendieren zum Einbau von schweren Isotopen, was die Aufnahme von schwerem Sauerstoff durch Quarz und seine Vorläufer gegenüber Metalloxiden, aber auch Wasserstoff, begünstigt (Zheng 1992; Markl 2008, 486 f. Abb. 4.73).
Der Isotopieunterschied zwischen zwei Phasen hängt mittels folgender einfacher Beziehung von der Temperatur ab:

$$1000 \ln \alpha_y^x = A * 10^6/T^2 + B \approx \Delta$$

Δ = Unterschied zwischen der Isotopenzusammensetzung zweier Phasen δ_x und δ_y
$\approx 1000 \ln \alpha_y^x$
T = Temperatur in Kelvin
A = experimentell bestimmte Konstante
B = experimentell bestimmte Konstante (bei Mineralaustauschgleichgewichten oft 0)

Wie die Gleichung zeigt, ist die temperaturabhängige Isotopenfraktionierung invers korreliert. Die Abhängigkeit ist sogar quadratisch, α ist proportional T^{-2}. Die Fraktionierung ist bei sehr hohen Temperaturen minimal, da dann auch die OH-Gruppen und Wassermoleküle mit schwerem Sauerstoff mehr Energie besitzen und sich leichter aus dem Verband lösen. Bei tiefen Temperaturen ist sie maximal (vgl. Faure & Mensing 2005, 696 f.; Markl 2008, 496-498).
Das schwierigste an der Formel für den Isotopieunterschied ist die Abschätzung von A und B (Faure & Mensing 2005, 735 f.)[6].
Aus $1000 \ln \alpha_y^x$ lässt sich mathematisch angenähert $\alpha_y^x = \frac{\delta_x + 10^3}{\delta_y + 10^3}$ bestimmen (Faure 2005, 696 f.). Dann lässt sich auch der Fraktionierungsfaktor für Cherts α_{Wasser}^{Chert} aus den $\delta^{18}O$-Werten berechnen:

$$\alpha_{Wasser}^{Chert} = \frac{\delta^{18}O_{Chert} + 10^3}{\delta^{18}O_{Wasser} + 10^3}$$

Ebenso gilt: $$\Delta = \delta^{18}O_{Chert} - \delta^{18}O_{Wasser} \approx \frac{A * 10^6}{T^2} - B$$

In der Praxis liegt eine weitere Schwierigkeit darin, dass der $\delta^{18}O$-Wert des Meer- bzw. Porenwassers der Entstehungszeit der Cherts nur in den seltensten Fällen bekannt ist und dass dieser deshalb geschätzt werden muss. Diese Schätzung führt bei verschiedenen Autoren zu unterschiedlichen Werten für das $\delta^{18}O$ des Wassers während der Bildungszeit der Cherts am gleichen Ort (zum Beispiel: Matheney und Knauth (1993) -1 ‰; Winter und Knauth (1992) $\leq$ +2,5 ‰), was zu unterschiedlichen theoretischen Bildungstemperaturen für dieselben Cherts führt.

[6] Die Schätzwerte beruhen auf Experimenten, der Berechnung aus experimentell zu bestimmendem $\Delta_{Mineral-Wasser}$, der Berechnung der theoretischen Isotopenfraktionierung aus empirischen Beobachtungen oder auf thermodynamisch begründeten Annahmen (Markl 2008, 498).

Für die nördlichen Ausläufer der Tethys im Oberjura gibt es keine zuverlässigen $\delta^{18}O$-Schätzungen des Porenwassers für die Hornsteinbildung. In der Nähe von rezenten Schwämmen hat Meerwasser in einem Temperaturbereich von 0°C bis 10°C in der Jetztzeit $\delta^{18}O$-Werte von 0 ‰ (Matheney & Knauth 1989), was der sauerstoffisotopischen Zusammensetzung des durchschnittlichen Meerwassers entspricht. Dieser Wert wird in den meisten Schätzungen und auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

4.2 Bestimmung von $\delta^{18}O$ einiger Hornsteinproben

Gesteine sind, wie zu erwarten ist, gegenüber SMOW stark mit $\delta^{18}O$ angereichert. $\delta^{18}O$ (SMOW) nimmt von den magmatischen Gesteinen zu den Sedimentgesteinen hin zu (Markl 2008 Abb. 4.86). Für Cherts im mikrokristallinen Zustand liegt $\delta^{18}O$ zwischen 11 ‰ und 42 ‰, im Phanerozoikum im Wesentlichen zwischen 25 ‰ und 40 ‰ (Tabelle der $\delta^{18}O$-Werte aus der Literatur, Anhang D3; Faure & Mensing 2005 Abb. 26.26). Dass Hornstein die höchsten $\delta^{18}O$-Werte von allen Gesteinen hat, wurde nach Kolodny und Epstein (1976), bereits 1951 von Silvermann und 1958 von Clayton und Epstein gezeigt.

4.2.1 Aufbereitung des Hornsteins mit der Fluorid-Methode in der Silikatanlage

Um das Verhältnis von ^{18}O zu ^{16}O im Hornstein bestimmen zu können, muss der relativ fest (kurze Bindungslänge von 1,61 Å, hohe Bindungsenergie 444 kJ/mol) an Silicium (*Si*) gebundene Sauerstoff freigesetzt werden. Dafür eignet sich Fluor, das ein stärkeres Oxidationsmittel als Sauerstoff ist und das wegen seines kleineren Radius eine kürzere Bindung (1,55 Å) mit noch höherer Bindungsenergie (595 kJ/mol) zu *Si* eingeht (Hollemann & Wiberg 2007, 945; 952; 143).
Im Institut für Isotopengeochemie der Universität Tübingen wird das herkömmliche Verfahren zur Extraktion von Sauerstoff aus Hornstein mittels Brompentafluorid BrF_5 nach Clayton & Mayeda (1963) verwendet. Brompentafluorid BrF_5, eine farblose Flüssigkeit, die erst oberhalb der Zimmertemperatur (41,3°C) siedet und eine hohe Fluoridierungs- und Oxidationstendenz besitzt (Hollemann & Wiberg 2007, 460), eignet sich aus praktischen Gründen besser als Fluorgas.

M_2SiO_4	+	$4\,BrF_5$	→	$2\,MF_2$	+	SiF_4	+	$4\,BrF_3$	+	$2\,O_2$
Silikat		Brompenta-fluorid		Fluorid		Silicium-fluorid		Bromtri-fluorid		Sauerstoff

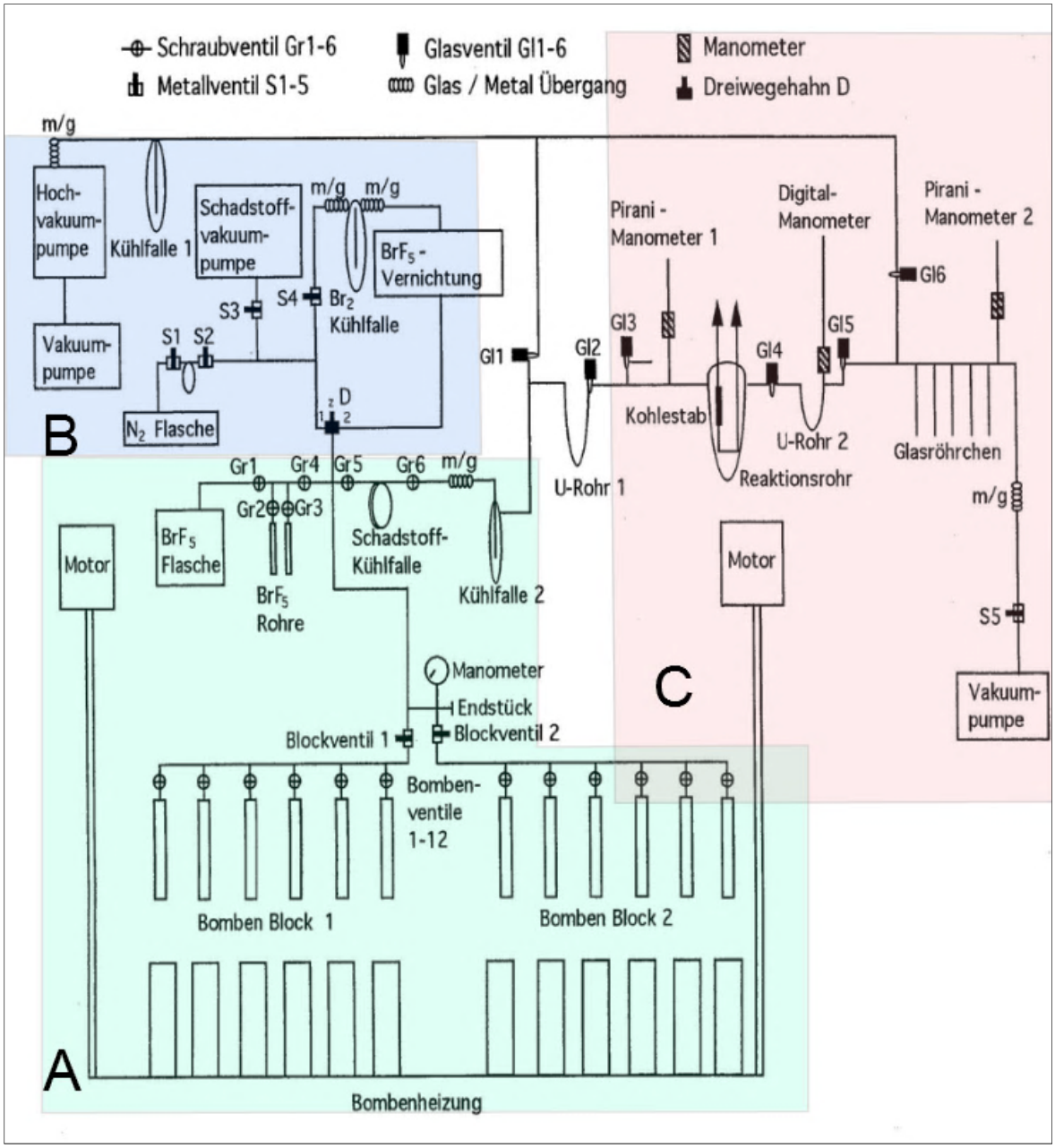


Abb. 57: Silikatanlage zur Freisetzung von Sauerstoff mittels Brompentafluorid. Bereich A (grün): Freisetzung von Sauerstoff aus SiO_2; Bereich B (blau): Entsorgung von Brompentafluorid; Bereich C (rot): Bindung des Sauerstoffs an Kohlenstoff (Schemazeichnung: Isotopengeochemie Universität Tübingen).



Abb. 58: Ausschnitt der verwendeten Silikatanlage (in Abb. 57 Bereich C, rot markiert). Oxidation des Kohlestabs mit dem aus Hornstein freigesetzten Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid als Endreaktion (links) und das Auffangen des CO_2 in den Glasröhrchen (rechts).

Vorbereitungen (Fließschema Abb. 57):
Zunächst muss an der Silikatanlage oberhalb und rechts von Gr4 (Abb. 57) mittels drei verschiedener Pumpen ein Vakuum angelegt werden. Man lässt Brompentafluorid BrF_5 aus der Flasche in die Nickelbomben fließen, bis diese gefüllt sind und ein Druck von 200 mbar entstanden ist. Im Anschluss wird das noch in den Leitungen befindliche BrF_5 vernichtet. Das System wird wieder evakuiert. Dann wird die Bombenheizung über Nacht auf ca. 700 °C hochgefahren, um verbliebene Reste in gasförmige Fluoride umzusetzen.
Am nächsten Tag muss die „Bombentemperatur" abgelesen, die Bombenheizung abgestellt und heruntergefahren werden. Das überschüssige BrF_5 wird vernichtet und das System zwei Stunden lang evakuiert.

Freisetzung des im Hornstein gebundenen Sauerstoffs (Abb. 57):
Die Schadstoffkühlfalle wird anschließend mit Stickstoff gekühlt. Je 8 bis 9 mg Hornsteinpulver waren bereits eingewogen, in Aluminiumfolie verpackt im Excicator mindestens zwei Tage lang mit Phosphorpentoxid P_2O_5 getrocknet worden. Das getrocknete Hornsteinpulver wird nun unter Stickstoffströmung und unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen in die Nickelbomben gefüllt und anschließend im Hochvakuum evakuiert. Dann wird das System 1½ Stunden bei 150° C ausgeheizt, um das an der Probe adsorbierte Wasser zu verdampfen. Anschließend muss das System bei Hochvakuum eine Stunde abkühlen. BrF_5 wird in gekühlte Bomben geladen bis ein Druck von 2*200 mbar entstanden ist. Das Hochvakuum wird beendet und die Schadstoffkühlfalle aufgetaut. Dann führt man Reste an BrF_5 im System der Vernichtung zu. Die Proben reagieren bei ca. 700 °C über Nacht (16-18 Stunden). Dabei wird der Sauerstoff mittels reaktiven fluorhaltigen Gasen aus den Silikaten vollständig freigesetzt.
Die Bombenheizung wird am nächsten Tag auf null zurückgestellt und herunter gefahren.

Reaktion von O_2 zu CO_2 und Umsublimation in Glasröhrchen (Abb. 57 & 58):
Die Schadstoffkühlfalle, Kühlfalle 1, Kühlfalle 2 und U-Rohr werden mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Das Bombenventil einer gekühlten Bombe wird geöffnet. Bei der niedrigen Temperatur des flüssigen Stickstoff gelangt nur O_2 durch Druckausgleich zum beheizten Kohlestab (ca. 800°C), der mit Platindraht als Katalysator umwickelt wurde, und reagiert dort zu CO_2, das an der gekühlten Glaswand ausfriert:

C	+	O_2	→	CO_2
Kohlestab		Sauerstoff		Kohlenstoffdioxid

Die Restgase werden abgepumpt. CO_2 sublimiert in U-Rohr 2 um, dort wird auch die Ausbeute gemessen. Eine weitere Umsublimation folgt in ein Glasröhrchen, das abgeschmolzen wird und dessen Inhalt dann im Massenspektrometer bestimmt wird. Der Vorgang wiederholt sich für alle weiteren 11 Proben in den Nickelbomben.
Zuletzt muss der Ausgangszustand wieder hergestellt werden mit Kühlfalle 2 auftauen, umsublimieren der Restgase in die Schadstoffkühlfalle, letztere auftauen und die Restgase der BrF_5-Vernichtung zuführen.

4.2.2 Bestimmung von $\delta^{18}O$ mit dem Massenspektrometer Finnigan MAT 252

Die Erfindung des Massenspektrometers im frühen 20. Jahrhunderts ermöglichte erst die Entwicklung der Isotopenspektrometrie. Das erste Gerät wurde von J. J. Thomson am Cavendish Laboratorium der Universität Cambridge gebaut und diente der Unterscheidung der Massen von $^{20}_{10}Ne$ und $^{22}_{10}Ne$, dem folgten Dempster und Aston 1918 und 1919 mit Massenspektrographen, die sie in den folgenden Jahren zur Entdeckung der natürlich vorkommenden Isotope des Periodensystems nutzten und um deren Massen- und Mengenverhältnisse zu bestimmen. Nier schuf 1940 den modernen Massenspektrometer (Faure & Mensing 2005, 64).

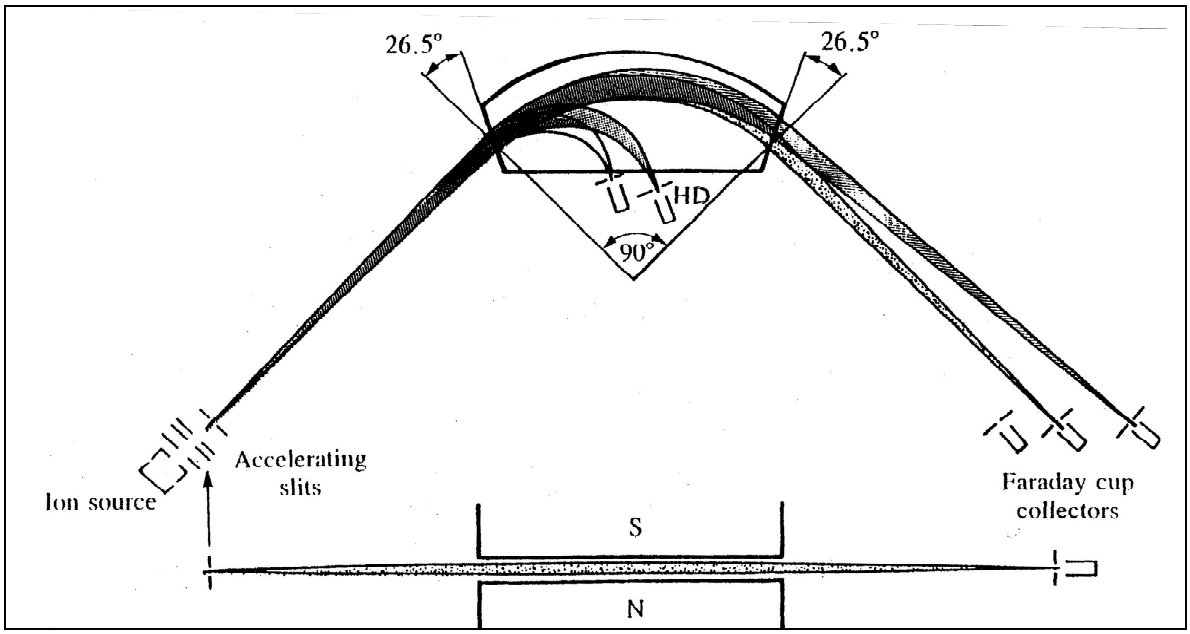


Abb. 59: Modell des Massenspektrometers mit Ionenquelle, Elektromagnet und Ionenkollektoren (Finnigan MAT 252, 1990).

Ein moderner Massenspektrometer besteht im Prinzip aus vier Teilen (Gijbels & Adriaens 2000, 164-170; Faure & Mensing 2005, 64 f.) (Abb. 59):

- einer Ionenquelle für monoenergetischen Ionenstrom (Abb. 59 links)
- einen Elektromagneten als Analysator (Abb. 59 Mitte)
- Ionenkollektoren (Abb. 59 rechts)

Die drei Teile sind evakuiert. Sie sind mit einem Computer für die Datenverarbeitung verbunden (vierter Teil).

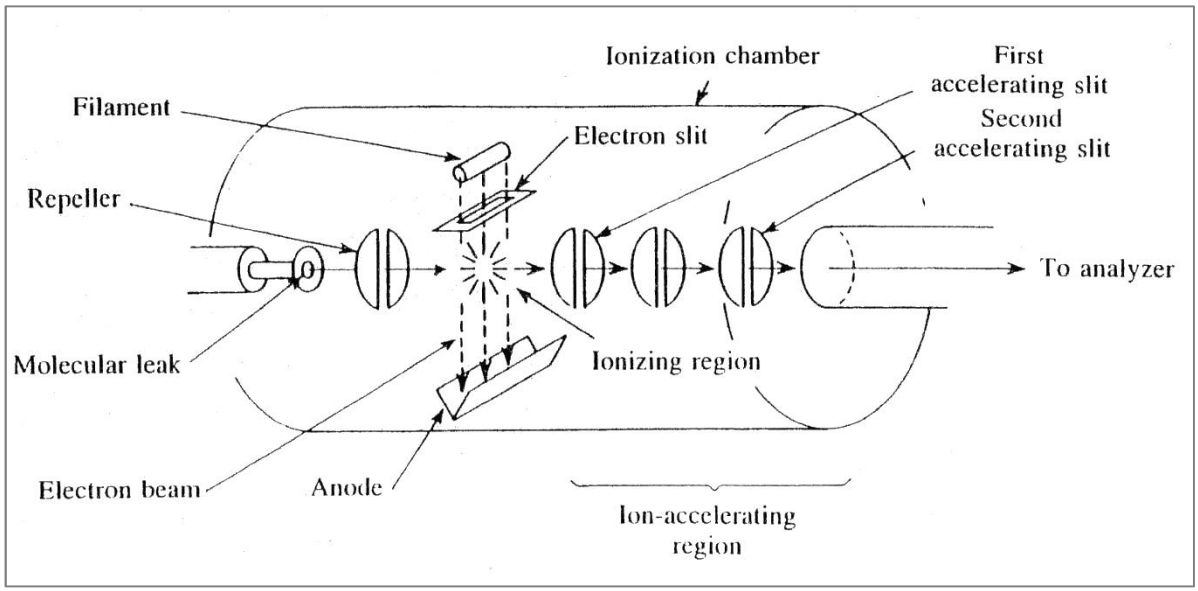


Abb. 60: Modell der Ionenquelle des Massenspektrometers (Finnigan MAT 252, 1990).

Zunächst wird das Standardgas (REF. CO_2 R19-A29) geladen und gemessen. Ein Glasröhrchen mit dem eingeschmolzenen CO_2 aus dem Hornstein wird angeritzt, und CO_2 kann durch eine schmale Öffnung (molecular leak) in den *Ionisationsraum* diffundieren (≙ laden) (Abb. 60). Die CO_2-Moleküle werden dort durch Beschuss mit einem Elektronenstrom, der sich senkrecht zu den CO_2-Molekülen Richtung Anode bewegt, ionisiert. In einem elektrischen Hochspannungsfeld (Acceleration slits) werden die entstandenen positiv geladenen CO_2^+ −Ionen beschleunigt und zu einem Ionenstahl gesammelt (Abb. 60) (Faure & Mensing 2005, 64 f.). Durch die Beschleunigung im elektrischen Feld (Spannung U = 10 kV) erhöht sich die kinetische Energie der Ionen. Für diese gilt (1):

$$e * U = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (1)$$

m = Masse
v = Geschwindigkeit

Der beschleunigte und gebündelte Ionenstrom gelangt in das elektrische Feld eines *Elektromagneten***,** dessen Pole so gestaltet und ausgerichtet sind, dass die magnetischen Feldlinien senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ionen angeordnet sind (Abb. 59). Beim Flug der Teilchen durch das Magnetfeld und ihrer Ablenkung von der ursprünglichen Flugbahn wirkt einerseits die Lorentzkraft, die die Teilchen nach innen zieht, andererseits die Zentrifugalkraft, die die Teilchen nach außen zieht. Man kann annehmen, dass beide Kräfte gleich groß sind:

Lorentzkraft = Zentrifugalkraft

$$e * B * v = \frac{m * v^2}{r_m} \qquad (2)$$

B = magnetische Flussdichte
r_m = Radius des Massenpunktes

Aus den Gleichungen (1) und (2) lässt sich jeweils v^2 ausrechnen:

$$\text{aus (1)} \qquad v^2 = \frac{2eU}{m}$$

$$\text{aus (2)} \qquad v^2 = \frac{e^2B^2r_m^2}{m^2}$$

Die beiden v^2 können gleichgesetzt werden, da die Teilchen ja mit der kinetischen Energie aus (1) in das Magnetfeld fliegen (3):

$$\frac{2eU}{m} = \frac{e^2B^2r_m^2}{m^2} \qquad (3)$$

Nach Auflösen der Gleichung (3) nach dem Bahnradius der Materieteilchen ergibt sich:

$$r_m = \sqrt{\frac{2Um}{eB^2}}$$

Das magnetische Feld lenkt die Ionen also in kreisförmige Bahnen, deren Radius proportional zur Masse der Isotope ist. Das bedeutet, dass die schwereren Ionen weniger stark abgelenkt werden als die leichteren. Die getrennten Ionenströme gelangen durch das Analysatorrohr zu den Faraday-Bechern des Kollektors (Abb. 59) (Finnigan MAT 252, 1990).

Der *Ionenkollektor* besteht aus einem Metallbecher hinter einem Schlitz (Abb. 61). Die Umgebung des Schlitzes fängt die Sekundärelektronen ab. Der Strom von CO_2^+, der in den Kollektorbecher gelangt, wird durch Elektronen neutralisiert, die vom Kollektorboden durch einen hohen Widerstand (10^{10} - 10^{12} Ω) fließen. Das an den Polen des Widerstands hervorgerufene Potentialgefälle ist proportional zur relativen Häufigkeit der CO_2^+-Ionen, es wird verstärkt und gemessen (Finnigan MAT 252, 1990).

Die Auswertung erfolgt computergesteuert. Bei der Massenanalyse von Sauerstoff aus Hornstein und Chert in Form von CO_2 gibt es mehrere isotopomere Massen:

m = 44 u: $^{12}C^{16}O^{16}O$ sehr häufig	m = 47 u: $^{13}C^{16}O^{18}O$ selten
m = 45 u: $^{13}C^{16}O^{16}O$ häufig	$^{12}C^{17}O^{18}O$ sehr selten
$^{12}C^{16}O^{17}O$ sehr selten	$^{13}C^{17}O^{17}O$ sehr selten
m = 46 u: $^{12}C^{16}O^{18}O$ selten	m = 48 u: $^{12}C^{18}O^{18}O$ sehr selten
$^{13}C^{16}O^{17}O$ sehr selten	$^{13}C^{17}O^{18}O$ sehr selten
$^{12}C^{17}O^{17}O$ sehr selten	m = 49 u: $^{13}C^{18}O^{18}O$ sehr selten

In der Praxis werden nur die Massen 44 u, 45 u und 46 u als Spannungsänderung in [V] gemessen.

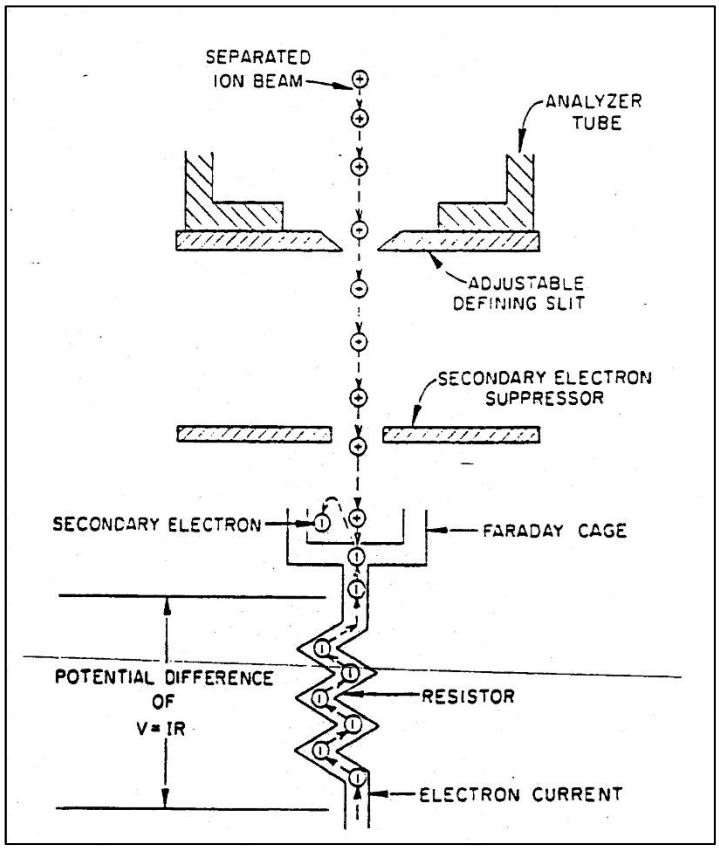


Abb. 61: Modell des Ionenkollektors im Massenspektrometer (Finnigan MAT 252).

Das Verhältnis 45 u zu 44 u entspricht dann dem Quotienten der Spannungsänderungen in [V] sowohl bei der Probe (R_{PR}) als auch beim Referenzgas (R_{RF}). Daraus kann der *δ-Wert* im *Computer* errechnet werden:

$$\delta_{45/44} = \left(\frac{R_{RF45/44}}{R_{ST45/44}} - 1 \right) * 1000$$

Er gibt fast ausschließlich das Verhältnis von $^{13}C^{16}O_2$ zu gewöhnlichem $^{12}C^{16}O_2$ wieder.

Dasselbe geschieht für das Verhältnis 46 u zu 44 u. Damit werden fast ausschließlich die Verhältnisse von $^{12}C^{16}O^{18}O$ zu $^{12}C^{16}O_2$ und $^{13}C^{16}O^{17}O$ zu $^{12}C^{16}O_2$ bestimmt.

Messung und Berechnung werden je sechsmal wiederholt, Probe C und Referenzgas A abwechselnd. Es werden der δ-Mittelwert, Standardabweichung und Standardfehler berechnet (Finnigan MAT 252, 1990).

Zuvor war das Referenzgas A relativ zu einem „Standard“ B durch das Verhältnis seiner Isotope kalibriert worden (4):

$$\delta_{A/B} = \left(\frac{R_A}{R_B} - 1 \right) * 1000 \qquad (4)$$

Bei der Messung des Gases der Probe C wurde diese relativ zum kalibrierten Referenzgas A in $[V]$ gemessen und verglichen (5):

$$\delta_{C/A} = \left(\frac{R_C}{R_A} - 1\right) * 1000 \qquad (5)$$

Es lässt sich zeigen, dass durch Ableitung von der obigen Formeln (4 und 5) nach $\frac{R_A}{R_B}$ und $\frac{R_C}{R_A}$ und anschließende Multiplikation die folgende Formel (6) ableitbar ist:

$$\delta_{C/B} = \left(\frac{\delta_{A/B}}{1000} + 1\right) * \delta_{C/A} + \delta_{A/B} \qquad (6)$$

Das Verhältnis der Probenisotope C wird durch diese Umrechnungen im Computer auf den „Standard“ B bezogen, sodass sich alle im gleichen Gerät gemessenen Werte auf denselben Standard beziehen. Sie werden eventuell noch um Ausreißerwerte korrigiert (Finnigan MAT 252, 1990).

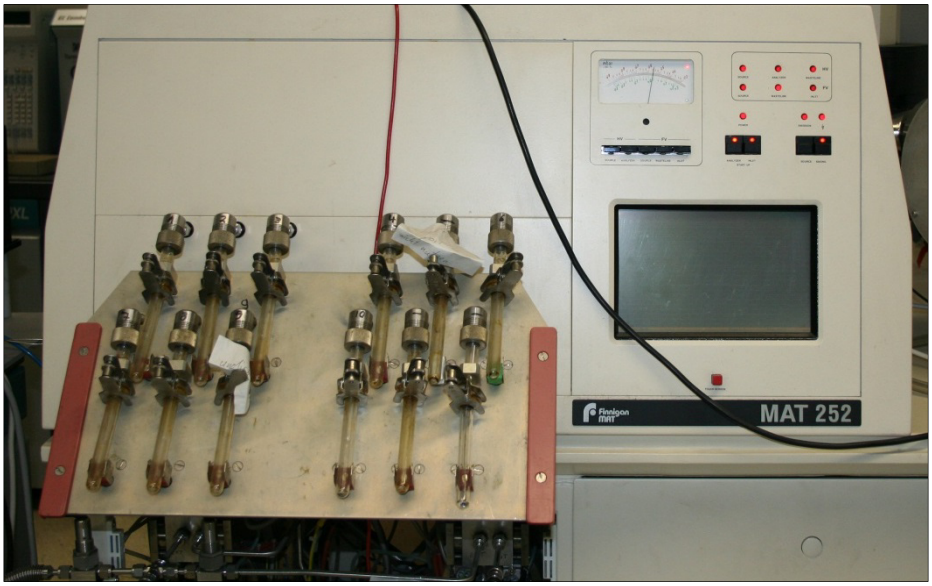


Abb. 62: Massenspektrometer: Multiport zur Aufnahme von 12 Proben zu untersuchender Substanzen (links), Touchscreen zur Anzeige des Einlasssystems (rechts Mitte), Manometer und Vakuumsanzeigen (oben rechts).

Vor der Standardisierung der gewonnenen Werte gegen internationale Standardwerte müssen die Probenwerte noch ^{17}O korrigiert werden. Die in ISODAT angewendete Ionenkorrektur (vgl. Craig 1957) bezieht sich auf das natürliche Verhältnis von ^{17}O zu ^{18}O:

$$R_{17} = R_{18}^{a} * K$$

a = 0,516
K = 0,0099235

Die ^{17}O-korrigierten Werte werden gegenüber PDB (**P**ee**d**ee-**B**elemnit als Standard) standardisiert und anschließend in den ^{18}O-Standard SMOW (**S**tandard **M**ean **O**cean **W**ater) nach folgender Beziehung umgerechnet (Hoefs 2009, 61):

$$\delta^{18}O_{SMOW} = 1{,}03091\ \delta\ ^{18}O_{PDB} + 30.91$$

4.3 Ergebnisse der sauerstoffisotopischen Untersuchungen

Zunächst musste Sauerstoff aus den Hornsteinproben extrahiert werden; das geschah in der Silikatanlage. Mit dem Massenspektrometer Finnigan MAT 252 konnten anschließend ^{16}O und ^{18}O aufgrund der Masse getrennt werden. Das Isotopenverhältnis $^{18}O/\ ^{16}O$ wurde im Anschluss vom Computer des Massenspektrometers berechnet. Die $\delta^{18}O$ sind die gesuchten Ergebnisse dieser Hornsteinuntersuchungen, die im folgenden Kapitel diskutiert werden.

Probe	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ Mittelwert	Standardabweichung	Probe	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$ Mittelwert	Standardabweichung
BER Arnh1	32,6	31,9	0,6	BER Wipp1	31,5	31,1	0,5
BER Arnh2	31,8			BER Wipp2	31,6		
BER Arnh3	30,7			BER Wipp4	30,7		
BER Arnh4	32,0			BER Wipp5	30,6		
BER Arnh5	32,5			BER Witt2	30,5	29,7	0,8
BER Arnh6	31,9			BER Witt3	29,9		
BER Borg1	32,0	32,0	0,4	BER Witt4	28,5		
BER Borg2	31,9			BER Witt5	30,6		
BER Borg3	31,4			BER Witt6	28,9		
BER Borg8	32,4			BER Hung1	27,3	31,1	2,0
BER Borg9	32,0			BER Hung2	32,3		
BER Borg10	31,5			BER Hung4	32,9		
BER Borg12	32,2			BER Hung5	31,7		
BER Borg13	32,7			MITTELWERT	31,4		
BER Borg14	32,0						
BER Borg15	32,0						
BER Borg16	32,2						

Tab. 22: $\delta^{18}O$-Werte von 30 Hornsteinen und Cherts der Fundorte Arnhofen (Arnh), „Borgerhau“ (Borg), Wippingen (Wipp), Wittlingen (Witt) und Ungarn (Hung), deren Mittelwerte und Standardabweichungen.

Die $\delta^{18}O$-Werte (Tab. 22) wurden bei jeweils drei Messungen gewonnen. Wegen undichter Bomben waren mehrere Werte nicht ganz sicher und wurden deshalb nicht in die Tabelle aufgenommen. Offiziell liegt die Reproduzierbarkeit der Isotopenmessungen am Massenspektrometer bei ± 0,02 ‰, für die chemische Präparation bei ± 0,1 bis 0,2 ‰; also liegt der analytische Fehler insgesamt bei < ± 0,22 ‰.

Die Standardabweichungen der Messungen am Massenspektrometer für 8 Proben lagen zwischen 0,009 ‰ bis 0,077 ‰ mit einem Mittelwert von 0,035 ‰; wobei die Standardabweichungen der Messungen für $^{13}C/^{12}C$ mit durchschnittlich 0,026 ‰ deutlich niedriger waren als die für $^{18}O/^{16}O$ mit 0,035 ‰.

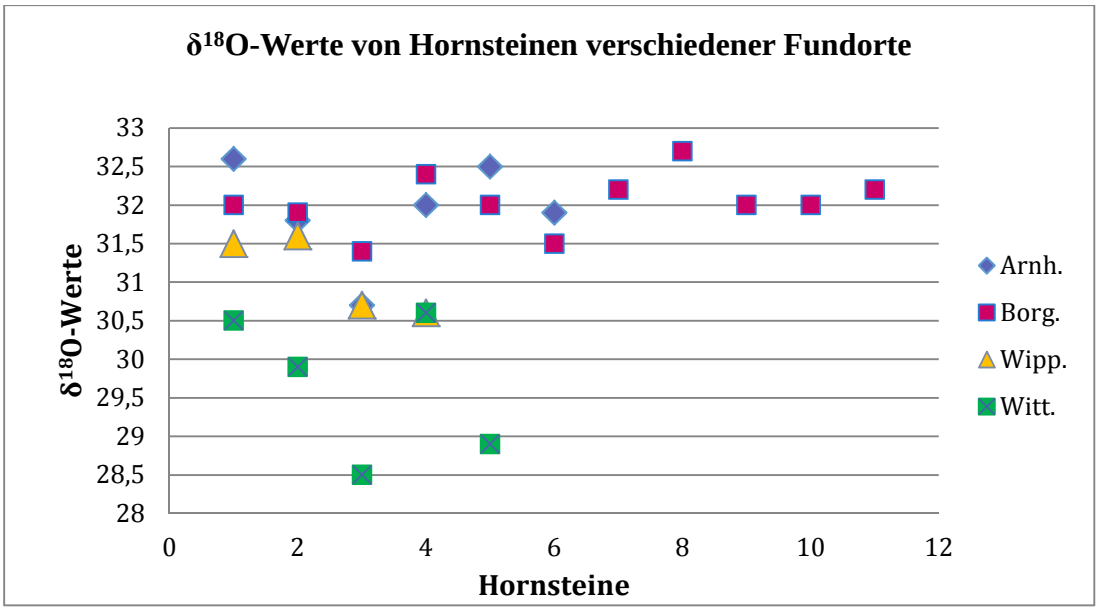


Abb. 63: $\delta^{18}O$-Werte untersuchter Jurahornsteine der vier schwäbischen und bayerischen Fundorte. Die Hornsteine aus Wittlingen fallen durch besonders niedrige $\delta^{18}O$-Werte auf. Die $\delta^{18}O$-Werte der Hornsteine von Arnhofen und „Borgerhau“ sind höher und liegen, von einer Ausnahme abgesehen, im gleichen Bereich.

In Tab. 22 und Abb. 63 fällt auf, dass die Mittelwerte für *Arnhofen* und *„Borgerhau“* fast übereinstimmen. Die Spannweite der Werte in Arnhofen ist mit 1,8 ‰ größer als im „Borgerhau“ mit 1,3 ‰; ebenso ist natürlich die Standardabweichung in Arnhofen mit s = 0,62 ‰ größer als im „Borgerhau“ mit s = 0,39 ‰. Die Hornsteine Borg. 8, 10, 14 kommen sicher aus anstehendem Sediment im „Borgerhau“, die $\delta^{18}O$-Werte von 31,5 ‰ bis 32,4 ‰ sind deshalb repräsentativ für diesen Fundort.
Die $\delta^{18}O$-Werte aus *Wittlingen* weichen am stärksten davon ab, ihr Mittelwert liegt um 2,2 ‰ bis 2,3 ‰ unter denen aus Arnhofen und „Borgerhau“. Allerdings ist auch die Spannweite von 2,1 ‰ und die Standardabweichung s = 0,84 ‰ größer.
Die Sauerstoffisotopie-Werte aus *Wippingen* mit einem Mittelwert von 31,1 ‰ liegen zwischen denen aus dem „Borgerhau“ und aus Wittlingen, wobei die ersten beiden Werte aus Wippingen stärker zum „Borgerhau“ tendieren. Alle vier untersuchten Hornsteine stammen aus dem anstehenden Sediment, sind also auch hier repräsentativ für diesen Fundort. Die Spannweite beträgt 1,1 ‰ und die Standardabweichung s = 0,45 ‰.
Die größte Spannweite von 5,6 war bei den *ungarischen Cherts* zu finden, ebenso die höchste Standardabweichung von 2,20. Hung. 1 hat von allen untersuchten Hornsteinen den weitaus niedrigsten $\delta^{18}O$ −Wert von 27,3 ‰. Hung. 1 stammt aus den Buda-Bergen. Die übrigen ungarischen $\delta^{18}O$ −Werte liegen etwas höher als die aus dem „Borgerhau“, im Durchschnitt bei 32,3 ‰, und sie stammen alle aus dem Balaton-Hochland. Interessant wäre nun eine Untersuchung von weiteren Hornsteinen aus den Buda-Bergen auf $\delta^{18}O$ −Werte, um zu erfahren, ob sich die Hornsteine aus den beiden ungarischen Gegenden so klar mittels $\delta^{18}O$ unterscheiden lassen oder ob es sich bei Hung. 1 um einen Ausreißer handelt.

Es hat sich gezeigt, dass alle Hornsteine aus Wittlingen $\delta^{18}O$-Werte ≤ 30,6 ‰ haben und dass die Wittlinger Hornsteine diesen $\delta^{18}O$-Bereich fast alleine besetzen (Ausnahmen: Wipp. 5 $\delta^{18}O$ = 30,6 ‰; Hung. 1 $\delta^{18}O$ = 27,3 ‰). Diese Untersuchung der $\delta^{18}O$-Werte von Hornstei-

nen verschiedener Fundorte ist zwar statistisch nicht relevant, da zu wenige Hornsteine je Fundort (4-11) analysiert wurden, aber sie können einen Hinweis darauf geben, dass möglicherweise die Hornsteine aus Wittlingen aufgrund der $\delta^{18}O$-Werte von den übrigen schwäbischen und bayerischen Hornsteinen abgetrennt werden können, wobei es nur eventuell Schwierigkeiten mit einigen Wippinger Hornsteinen geben könnte.
Besonders die im Vergleich zu den übrigen schwäbischen und bayerischen Fundorten deutlich niedrigeren $\delta^{18}O$ −Werte der Hornsteine aus Wittlingen weisen darauf hin, dass sich hier die Bedingungen während der Zeit der Hornsteinbildung von denen der anderen Fundorte doch wohl deutlich unterschieden. Die häufig andere Musterung der Hornsteine aus Wittlingen, fleckig-marmoriert anstatt konzentrisch gebändert, ist ein weiterer Hinweis.

4.4 Hinweise auf die Hornsteinentstehung durch $\delta^{18}O$-Werte

Da Cherts lange Zeit aufgrund ihrer $\delta^{18}O$-Werte als Klimaproxis betrachtet wurden und teilweise noch heute als solche angesehen werden, soll nachfolgend zunächst kurz auf die Hornsteinentstehung eingangen werden.

4.4.1 Entstehung der schwäbischen und bayerischen Hornsteine

Vor allem in den 60er bis 90er Jahren des letzten Jahrhunderts beschäftigten sich einige Forscher intensiv mit der Hornsteinentstehung. Eine der frühen, wichtigen Arbeiten ist die von R. C. L. Wilson (1966) über die Siliciumdioxid-Diagenese im Calcit des südenglischen Oberjura, bei der die verschiedenen SiO_2-Diagenese-Produkte im Vordergrund stehen. L. P. Knauth entwarf 1979 ein Modell für die Herkunft von Hornstein, der in Calcit lagert. M. Kastner (1981) und R. Hesse (1988, 1989) veröffentlichten grundlegende und zusammenfassende Artikel zur Silikat-Diagenese. Weitere verwendete Literatur ist nachfolgend angegeben[7]:

Zu *Silikat bildende Organismen*: Beurer 1971, 45; Iler 1979, 734-739; Williams et al. 1985; Bohrmann et. al. 1990; Botz & Bohrmann 1991; Schmidt et al. 1997; Stanley 2001, 494 f.; Rothe 2002, 85-87; Middleton et al. 2003, 665; Moschen 2004, 90-112; Dodd & Sharp 2010; Wille et al. 2010; Geyer und Gwinner 2011, 286 f.; Jochum et al. 2012.

Zu *chemische und thermodynamische Voraussetzungen der Hornsteinbildung*: Ernst & Calvert 1969; Kastner et al. 1977; Mizutani 1977; Hein et al. 1978; Willey 1980; 1982; Fleming & Crerar 1982; Kastner & Gieskes 1983; Williams et al. 1985; Williams & Crerar 1985; Hollemann & Wiberg 2007, 951-953; 959-982; 1229.

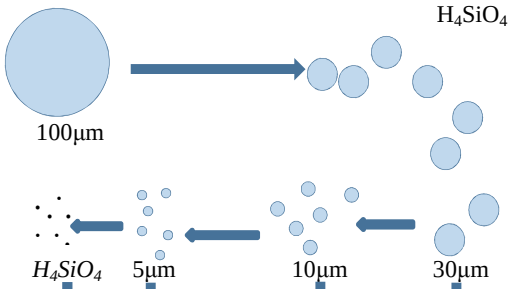
Zu *kolloidale Lösung von Opal-A im Meer*: Ernst & Calvert 1969; Hurd & Theyer 1975; Stein & Kirkpatrick 1976; Kastner et al. 1977; Hein et al. 1978; Iler 1979, 40-43; Willey 1980; 1982; Pisciotto 1981; Williams et al. 1985; Williams & Crerar 1985; Hollemann & Wiberg 2007, 959 f.

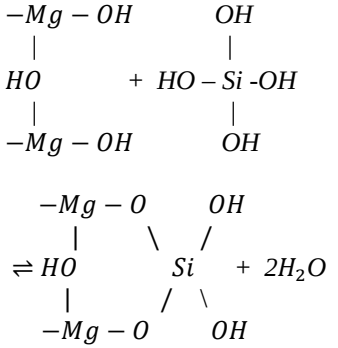
Zu *Fällung von Silikaten und deren Diagenese*: Ernst & Calvert 1969; Jones & Segnit 1972; Knauth & Epstein 1976; Kolodny & Epstein 1976; Murata & Norman II 1976; Kastner et al.

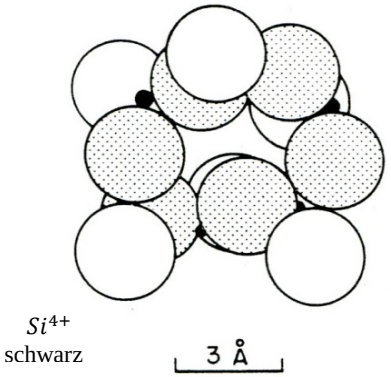
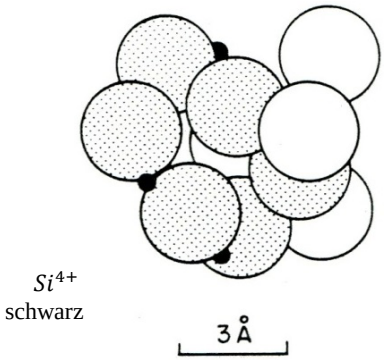
[7] Wegen der tabellarischen Darstellung im Kapitel 4.4.1 werden diese Autoren nicht einzeln zitiert.

1977; Mizutani 1977; Murata et al. 1977; Iler 1979, 83-91; 172-177; Pisciotto 1981; Isaacs 1982; Williams et al. 1985; Williams & Crerar 1985; Behl & Smith 1992; Rothe 2002, 86 f.; Sharp et al. 2002; Faure & Mensing 2005, 736-739; Migaszewski et al. 2006; Hollemann & Wiberg 2007, 951- 953; 959-962; Behl 2011.

Zur Kurzinformation ist nachfolgend die chemische Entstehung von Jurahornstein tabellarisch zusammengefasst (Tab. 23).

<table>
<tr><th>Ab- und Aufbauprozesse</th><th>SiO_2-Polymerisat</th><th colspan="2">Veränderung</th><th>Modell (Bertsch, nach Iler 1979, 174 Abb. 3.1; Williams & Crerar 1985)</th><th>Chemische Reaktionen Gleichgewichtskonstante</th><th>Ort</th></tr>
<tr><td>A Zersetzung abgestorbener SiO_2-haltiger Organismen, vor allem Schwämme und Radiolarien, im Meerwasser</td><td>Wände der Schwammnadeln und Radiolarienschalen aus Opal-A werden abgebaut</td><td>durch aerobe Bakterien entstehen Kieselsäure und kurzkettige Polymere (kP)</td><td>durch anaerobe Bakterien entstehen Kieselsäure + kP + OH^- (Erhöhung des pH-Wertes)</td><td rowspan="2">Opal-A in Meerwasser gelöst → kP + H_4SiO_4


pH 7-10, keine Salze → Opal-A
pH 3-10, mit Salzen → Opal-CT
dreidimensionale Gel-Netzwerke von Opal-CT bilden Ansätze zu kristalliner Struktur</td><td>Opal-A + n H_2O ⇌ Kieselsäure H_4SiO_4
$K_{Kieselsäure} = \frac{c(Kieselsäure)}{c(Opal-A) * c(H_2O)^n}$</td><td>vor allem am Meeresboden, evtl. in obersten Schichten des Sedimentes</td></tr>
<tr><td>B Füllung der Hohlräume der Schwammnadeln und Schalen bei gleichzeitigem Abbau von Opal-A außen</td><td>Opal-CT wird im Inneren der Schwammnadeln und Schalen gebildet</td><td colspan="2">durch lokal übersättigte Lösung von Kieselsäure und kurzkettigen Polymeren, Fällung an innerer Wand der Schwammnadeln u. a. als Kristallisationskeim</td><td>Kieselsäure ⇌ Opal-CT + n H_2O
$K_{Opal-CT} = \frac{c(Opal-CT) * c(H_2O)^n}{c(Kieselsäure)}$</td><td>wie A</td></tr>
<tr><td>C Fällung um Kristallisationskeim(e), meist schichtweise oder „zwiebelschalenförmig“</td><td>Opal-CT</td><td colspan="2">durch lokal übersättigte Lösung von Kieselsäure und kurzkettigen Polymeren Fällung an Kristallisationskeimen: vor allem $Mg(OH)_2$ und silifizierten Kalkschalenresten von Organismen, katalysiert durch OH^--Ionen</td><td>
Startreaktion für die Polykondensation, Aktivierungsenergie: +97,1 kJ/mol, mit OH^- +59,8 kJ/mol</td><td>am Meeresboden und in oberen Sedimentschichten, immer dann, wenn die lokale Sättigung an Kieselsäure und kurzkettigen Polymeren überschritten wird</td></tr>
</table>

Ab- und Aufbauprozesse	SiO_2-Polymerisat	Veränderung	Modell (nach Jones und Segnit 1972, aus Williams & Crerar 1985)	Chemische Reaktionen, Gleichgewichtskonstante	Ort
D schicht- bzw. „zwiebelschalen“weise „Reifung“ des Opal—CT	Opal-CT (Opal-Cristobalit-Tridymit)	durch weitere Kristallisation des abgelagerten Opal-CT, durch Ionendiffusion mit dem Wasser, auch Richtung Oberfläche, dort Oxidation u. a. von Eisenionen, wodurch dunklere Bänder von Fe^{2+}/Fe^{3+} entstehen	SiO_2-Struktur in α-Cristobalit 	weitere Kristallisation unter Wasserabgabe bei zunehmender Temperatur entsprechend dem geothermischen Gradienten	im Sediment bis ca. 200 m Tiefe
E Umbau von Opal-CT zu mikrokristallinem Quarz	α-Quarz: Chalcedon (vor allem in Schwammnadeln und Radiolarienschalen), kryptokristalliner und mikrokristalliner Quarz	sehr langsame Veränderung bei höherer Temperatur durch noch stärker dreidimensionale Vernetzung zu einer stabileren Kristallstruktur mit Ausbildung neuer *Si-O*-Bindungen (dichteres SiO_2-Gitter als im Opal-CT)	SiO_2-Struktur in Quarz 	Opal-CT ⇌ Mikroquarz + n H_2O ΔH = -912 kJ $K_{Mikroquarz} = \frac{c(Mikroquarz) * c(H_2O)^n}{c(Opal-CT)}$ Aktivierungsenergie zur Lösung von Bindungen: 23,3 kJ, mit OH^- 14,3 kJ.	ab 100 m bis 300 m tief im Sediment
F „Reifung“ von mikrokristallinem Quarz	mikrokristalliner α-Quarz	Noch stärkere dreidimensionale Vernetzung, vor allem Tetraederstruktur	wie E, insgesamt noch stärker geordnet	Mikroquarz ⇌ Mikroquarz + n H_2O	wie E

Tab. 23: Chemische Entstehung von Jurahornstein tabellarisch, vereinfacht als Kurzinformation (Tabelle A. M. Bertsch, nach verschiedenen Autoren, s.o.).

Für die schwäbischen und bayerischen Jurahornsteine werden im Wesentlichen zwei Möglichkeiten der geologischen Hornsteinbildung diskutiert: die Hornsteinfällung um einen oder mehrere Kristallisationskeime und der Ersatz von Kalkknollen oder -schichten durch Silikat.

Hornstein entsteht, ebenso wie Chert, durch *Fällung, meist um einen Kristallisationskeim oder um mehrere Kristallisationskeime, und nachfolgende „Reifung" der SiO_2-Polymerisate* (von Rad & Rösch 1974; Wise & Weaver 1974; Keene 1975; Murata & Larson 1975; Kastner et al. 1977; Murata et al. 1977; Kastner 1981, 927-937; Pisciotto 1981; Williams & Crerar 1985; Bohrmann et al. 1990; Rothe 2002, 87; Migaszewski et al. 2006).

Geologisch muss man sich die Hornsteinentstehung im schwäbischen und bayerischen Jura etwa folgendermaßen vorstellen: Von den Schwammriffen führten flache Böschungen zum Sediment auf dem Meeresboden der hier flacheren Bereiche der Tethys. Abgelöste und abgestorbene Schwammteile rutschten auf den Meeresboden. Kieselige Spongienskelette (Hexactinellidea und Listhidea) und isolierte Einzellerschalen wurden mit den anorganischen und organischen kalkigen Sedimenten abgelagert (Beurer 1971, 45 f.). Aufgrund des größeren Oberfläche- zu Massenverhältnis wurden SiO_2-haltige Einzellerskelette, im Jurameer meist Radiolarien, rascher abgebaut als Schwammnadeln (vgl. Kastner et al. 1977). Überwiegend ging aber Opal-A[8] als Kieselsäure oder auch als niederpolymeres SiO_2-Produkt am Meeresgrund in Lösung. Das in den Sedimenten, auch in Schalenresten und Tierpanzern, vorhandene Calciumcarbonat $CaCO_3$ lieferte bei Lösung im Meerwasser OH^--Ionen, die zusammen mit Mg^{2+} aus dem Meerwasser das schlecht lösliche $Mg(OH)_2$ bildeten, das als Kristallisationskeim die Fällung von Opal-CT-Lepisphären auf Kalkschalen, sowie auf oder in Hohlräumen von Radiolarien und Schwammnadeln begünstigte (Kastner et al. 1977). In den Hohlräumen der Schwammnadeln schlug sich dann sphärolytischer Chalcedon nieder, der heute die Schwammnadeln nach Anfeuchten weiß strahlen lässt, so dass sie mit bloßem Auge erkennbar sind, noch besser allerdings im Polarisationsmikroskop (Abb. 54).
Ob der gesamte gelöste Opal-A im kalkhaltigen Meerwasser überwiegend als Opal-CT[9] ausfiel oder auch gleich als mikrokristalliner Quarz gefällt wurde, wurde vielfach diskutiert, hängt aber sehr wahrscheinlich von den pH-, Konzentrations- und Temperaturverhältnissen ab (Kastner et al. 1977; Williams & Crerar 1985; Hesse 1988). Nach Kastner et al. (1977) nahm im frühen Stadium der Diagenese die Menge des gelösten Opal-A aus den SiO_2-haltigen Schalen und Nadeln wahrscheinlich rasch zu und übertraf die Menge der Quarzkristallisation und Silicium-Diffusion. Die Konzentration im Porenwasser nahm dann zu, bis sie Werte oberhalb des Löslichkeitsgleichgewichtes von Opal-CT erreichte, wodurch die Opal-CT-Phase kristallisierte.

Die Ablagerung des Opal-CT an einem Kristallisationskeim erfolgte mit großer Wahrscheinlichkeit periodisch, evtl. im Verlauf von Jahrhunderten bis Jahrtausenden oder gar Jahr-

[8] Opal-A: amorphe, stark hydratisierte SiO_2-Verbindung, < 100 µm (Tab. 23); im Röntgendiffraktogramm zeigt er ein diffuses Band zwischen 3,8 und 4,1 Å (Jones & Segnit 1972; Kastner 1981).
[9] Opal-CT: eindimensionale dreischichtige Struktur von Ringen aus sechs SiO_2 (Tab. 23) von Cristobalit mit zweischichtigen Tridymit-Domänen, die sich oft in Hohlräumen als Lepisphären (kugelförmige Aggregate einander durchdringender, blättchenförmiger Kristalle) niederschlagen, >100 µm; im Röntgendiffraktogramm zeigt der Niedrigtemperatur-Cristobalit breite Peaks bei 2,5 und 4,1 Å (Jones & Segnit 1972; Kastner 1981).

millionen, immer dann, wenn die Konzentration an gelöstem SiO_2, der pH-Wert und die Temperatur es ermöglichten, was zur typischen Ausbildung konzentrischer Bänder bei Jurahornsteinknollen führte (z. B. im „Borgerhau“ und meist in Wippingen). Bei besonders hoher Konzentration an gelöstem SiO_2, bei Vorhandensein von genügend $Mg(OH)_2$ und hohem pH-Wert bildeten sich in großer Nähe um viele Kristallisationskeime Opal-CT-Fällungen, die im Laufe der Zeit zusammenwuchsen (z. B. überwiegend in Wittlingen). Plattenhornstein wie in Arnhofen muss durch Sedimentation in Schichten von Opal-A, Kieselsäure und kurzkettigen Polymeren aus Schwammnadeln und Radiolarienschalen auf gleiche Weise entstanden sein.

Die Alternative zur *Hornsteinentstehung* um einen oder mehrere Kristallisationskeime ist die Antithese, dass süddeutsche Hornsteine, wie auch andere Cherts, *durch Ersatz des Calcits in Kalkknollen oder Kalkgestein* entstanden sind (Beurer 1971, 45-49; Knauth 1979; Hesse 1989; Affolter 1991; Murray 1994; Burkert 2001, 16 f.; Affolter 2011). Es handelt sich nach Beurer (1971, 46) bei den Kieselknollen um „gefüge- und volumengetreue Nachbildungen des Kalksteins“.

Der Ersatz von Calcit (Calciumcarbonat) durch Opal-CT ist eine Gleichgewichtsreaktion:

$$\underset{\text{Calciumcarbonat}}{CaCO_3} + \underset{\text{Kieselsäure}}{H_4SiO_4} + \underset{\text{Kohlenstoffdioxid}}{CO_2} \rightleftharpoons \underset{\text{Calciumion}}{Ca^{2+}} + \underset{\text{Hydrogencarbonationen}}{2HCO3^-} + \underset{\text{Opal}}{SiO_2\downarrow} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O}$$

Nach dem Massenwirkungsgesetz (MWG) gilt für die Konstante K_c:

$$K_c = \frac{c(Ca^{2+}) * c(HCO_3^-)^2 * c(SiO_2) * c(H_2O)}{c(CaCO_3) * c(H_4SiO_4) * c(CO_2)}$$

Nach dem MWG und dem Prinzip von Le Chatellier begünstigt eine lokal erhöhte CO_2-Menge und/oder eine höhere Konzentration an Kieselsäure, beides zum Beispiel aus dem bakteriellen Abbau der Kieselschwammreste und Radiolarien, zusammen mit einem erniedrigten pH-Wert, die Hinreaktion und damit die Fällung von SiO_2 als Opal-CT. Durch diese Reaktion wird Calcit aufgelöst und durch Opal-CT ersetzt.
Andererseits kann bei erhöhten Konzentrationen an Calcium- und/oder Hydrogencarbonationen oder größeren Mengen an Opal-A in Form von Schwammnadeln und Radiolarienschalen deren Calcification vermehrt stattfinden, das Vorhandensein von OH^--Ionen begünstigt die Rückreaktion. Durch diesen Prozess entstanden die Schwammkalke der Schwäbischen Alb.

Eine Entstehung von Hornsteinknollen durch Ersatz von Kalkknollen dürfte es jedoch für schwäbische und bayerische Hornsteine kaum gegeben haben. Dagegen sprechen die folgenden Punkte:

- Das Meerwasser der Tethys war aufgrund des Calcitgehaltes basisch (ca. pH 8,2) (vgl. Hesse 1989). Durch aerobe Zersetzung organischen Materials entstandene Säuren wurden vom Carbonat-/Hydrogencarbonatsystem des Meerwasssers gepuffert (Dickerson & Geis 1983, 395 f.). Die zur Auflösung der Kalkknollen ($CaCO_3$) katalytisch notwendigen Säuren fehlten großräumig (Hesse 1989). Säuren waren also nur kurzfristig im Mikrobereich

vorhanden, weshalb der Ersatz von Kalk durch Kieselsäure wohl bei den schwäbischen und bayerischen Hornsteinen nur sehr kleinräumig stattgefunden haben kann (Verkieselung von ursprünglich kalkhaltigen Skeletten und Schalen von Organismen).

- Der Ersatz von Calcit der Kalkknollen durch SiO_2 müsste von außen nach innen erfolgen, die Silifikation der Knollen müsste dann nahe der Peripherie am stärksten sein. Das wurde von den obigen Autoren nicht beschrieben. Im Kern der Hornsteinknolle sollte es häufiger keinen Mikroquarz, sondern Opal-CT geben. Dann sollten auch häufiger Jurahornsteinknollen gefunden werden, die im Inneren noch einen Kalkkern haben. Bei allen 70 durchsägten und untersuchten schwäbischen und bayerischen Hornsteinen war dies jedoch nicht der Fall.
- Die sehr niedrigen Konzentrationen an Ca^{2+} von durchschnittlich 0,08 % in den schwäbschen und bayerischen Jurahornsteinen und die sehr hohe an SiO_2 von durchschnittlich 98 % sprechen ebenfalls dagegen, was auch für die ungarischen Cherts gilt.
- Wie Achat (Abb. 64) bildet Hornstein (Abb. 65) um einen Kristallisationskeim Sphärolithe, halbkugelförmige SiO_2-Aggregate. Viele dicht gelagerte Sphärolithe können in gallertigem Zustand zu Bändern verwachsen (Abb. 64 rechts) (Landmesser 1994). Im Gegensatz zum Achat ist aber beim Hornstein das Wachstum von Sphärolithen von innen nach außen gerichtet wie Abb. 65 zeigt. Beim Achat lagert sich, im Gegensatz zum Hornstein, Kieselsäure in Hohlräumen ab, meist als Blasenfüllungen in basischen bis intermediären Vulkaniten, und bildet dort Chalcedon, kryptokristallinen Quarz (Landmesser 1994)[10].

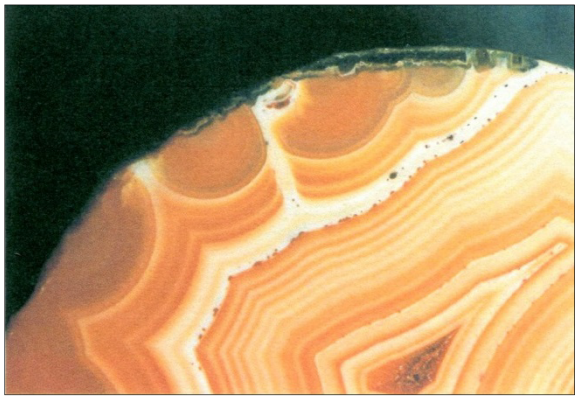


Abb. 64: Achat mit gut erkennbaren gebänderten Sphärolithen. Sie setzen an der Hohlraumwand an und wurden in noch weichem, verformbarem Zustand von einem Deformationskanal verdrückt (Landmesser 1994 Abb. 23).



Abb. 65: Hornsteinsägeschnitt mit Sphärolithen. Diese setzen auf einer früheren Hornsteinoberfläche an und weisen auf das Wachstum des Hornsteins nach außen hin (Borg. 8).

Für eine Entstehung der süddeutschen Hornsteine durch Fällung um einen oder mehrere Kristallisationskeime sprechen zusätzlich folgende Punkte:

- Meist sind bei Knollenhornsteinen um den zentralen Kern mehr oder weniger gut sichtbare, schichtförmige Auflagerungen sichtbar („Zwiebellook“). Diese sind ein Zeichen für periodische Hornsteinbildung (Landmesser 1994; Migaszewski et al. 2006). Während der Reifung einer Silikatablagerung wird Wasser abgegeben und die Poren werden verfüllt. Wie bei der Achatbildung (Abb. 64) kann monomere Kiesel-

[10] Chalcedon: kryptokristalline Quarzvarietät mit fasrigen Strukturen unter dem Mikroskop und submikroskopischen Poren (Kastner 1981).

säure in den sich bildenden Hornstein diffundieren und dort zu Quarz heranreifen und so ältere Hornsteinschichten verdichten (Landmesser 1994). Migaszewski et al. (2006) beobachteten enge Kanäle, die von jeder Grenze benachbarter Bänder ausgehen und sich nach innen hin erweitern. Diese Kanäle dienten dem Einstrom von Poren füllendem Material und wurden jeweils im Intervall zwischen zwei Silikatablagerungen gebildet. Diese Beobachtung weist ebenfalls auf eine Hornsteinbildung von innen nach außen hin. Das Poren füllende Material ist nach Migaszewski et al. (2006) das Ergebnis teilweiser Lösung der Knollenoberfläche bei höherem pH-Wert.

- Die „Zwiebelschalen" und manche Schichten von Plattenhornsteinen sind häufig nach außen hin dunkler abgegrenzt. Das ist ein Hinweis auf die Diffusion farbgebender Ionen, vor allem Fe^{2+}, das aus der Kondensation der Opal-CT-Bildung in Wasser gelöst, wanderte. An der jeweiligen Hornsteinoberfläche wurde Fe^{2+} teilweise zu rotbraunem Fe^{3+} oxidiert und war damit zum Beispiel als Roteisenstein Fe_2O_3 auch weniger löslich (Hollemann & Wiberg 2007, 1648; 1644). Fe^{2+} und Fe^{3+} färben als Magnetit Fe_3O_4 schwarz (Tab. 7).
- Dass die Hornsteinreifung von innen nach außen stattfindet, ist auch daran zu erkennen, dass das Zentrum der Hornsteinknollen im Allgemeinen gröber und härter ist als die Randbereiche, was sich deutlich bei den Sägezeiten bemerkbar macht. Dass der Kristallisationsgrad und die Anordnung größerer Einzelkristalle von der Rinde über die Bänder zum Kern hin zunehmen, konnten Migaszewski et al. (2006) mit Röntgendiffraktogrammen der Theta 31,06 Peaks (Cristobalit) zweier polnischer Hornsteine aus dem Oberjura nachweisen. Das abgebildete Teilspektrum eines Hornsteins aus Sródborze zeigt recht deutliche Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Peaks aus dem stärker kristallinen Kern, einem weniger kristallinen mittleren Band und der wenig kristallinen Rinde (Abb. 66).
- Ebenso können das $\delta^{18}O$-Werte zweier Oberjurahornsteine (Il 5 und F1) aus den Góry Świętokrzyskie (Holy Cross Mountains) in Polen zeigen (Tab. 24), die von der Hornsteinmitte zur Rinde hin zunehmen (Migaszewski et al. 2006).

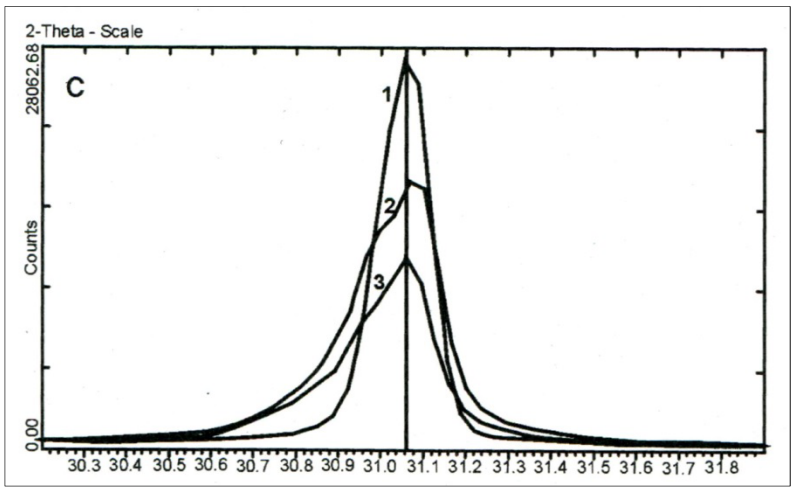


Abb. 66: Ausschnitt eines Röntgendiffraktogramms (31,06 Peak) eines Jurahornsteins aus Sródborze (Polen) (1 Hornsteinmitte, 2 Band in der Mitte des Hornsteins, 3 Hornsteinrinde). Der Kristallisationsgrad des Jurahornsteins nimmt von innen nach außen ab (Migaszewski et al. 2006 Abb. 8C).

	Probennummer und -beschreibung	$\delta^{18}O$-Werte (‰)
Ilza (Il)	Il/5 Kern, innerer Teil	29,0
	Il/5 Kern, äußerer Teil	29,8
	Il/5 Hornsteinrinde	31,5
Wojciechowka (F)	F/1q Hornsteinrinde	31,2
	F/1b Kern, äußerer Teil	31,5
	F/1c Kern, innerer Teil	29,9
	F/1d Kern, äußerer Teil	30,7
	F/1e Kern, äußerster Teil	32,0
	F/1f Hornsteinrinde	32,2

Tab. 24: $\delta^{18}O$-Werte von zwei Oberjurahornsteinen (Il 5 und F1) aus den Holy Cross Mountains in Polen. Die $\delta^{18}O$-Werte nehmen vom Hornsteinzentrum nach außen hin ab (verändert nach Migaszewski et al. 2006 Tab. 1).

4.4.2 $\delta^{18}O$-Werte und Bildungstemperatur der Hornsteine

$\delta^{18}O$-Werte von Cherts sind temperatur- und fluidabhängig. Deshalb wurden sie über lange Zeit, teilweise bis zum heutigen Tage, als Klimaproxis für Paläotemperaturen angesehen. Aus der Fraktionierungsgleichung (vgl. Kapitel 4.1.2) wurde durch Umformung die Bildungstemperatur für Hornsteine abgeleitet:

$$T = \sqrt{\frac{A * 10^6}{\Delta - B}}$$

Δ = Differenz der Isotopenzusammensetzung zweier Phasen δ_x und $\delta_y \approx 1000 \ln \alpha_y^x$
(z. B. δ_x: $\delta^{18}O$ des Hornsteins und δ_y: $\delta^{18}O$ des Meerwassers, in dem er entstanden ist)
T = Temperatur in Kelvin
A = experimentell bestimmte Konstante
B = experimentell bestimmte Konstante

Die Fraktionierungsgleichung erhielt in der Folge bei verschiedenen Autoren verschiedene Werte für A und B, was zu verschiedenen Fraktionierungsgleichungen führte, zum Beispiel:

$1000 \ln \alpha_{chert-H_2O} = 3{,}38 * 10^6 T^{-2} - 3{,}40$ (Clayton et al. 1972)

$1000 \ln \alpha_{chert-H_2O} = 3{,}05 * 10^6 T^{-2} - 2{,}09$ (Matthews und Beckinsale 1979)

$1000 \ln \alpha_{chert-H_2O} = 3{,}34 * 10^6 T^{-2} - 3{,}31$ (Matsuhisa et al. 1979)

$1000 \ln \alpha_{chert-H_2O} = 3{,}52 * 10^6 T^{-2} - 4{,}35$ (Kita et al. 1985)

$1000 \ln \alpha_{chert-H_2O} = 3{,}09 * 10^6 T^{-2} - 3{,}29$ (Knauth und Epstein 1976)

Die ersten drei Gleichungen wurden in hydrothermalen Experimenten mit Quarz bei Hochtemperatur gewonnen und anschließend für Niedertemperatur-Cherts extrapoliert[11]. Matthews und Beckinsale haben < 10°C niedrigere Bildungswerte für Cherts als die anderen beiden, die nicht erklärbar sind. Kita et al. (1985) bestimmten den Fraktionierungsfaktor nicht für Quarz, sondern für gefälltes, amorphes SiO_2 in geothermalem Wasser bei 34-93 °C. Da Knauth und Epstein (1976) viele der für die Sedimente berechneten Temperaturen, in denen die Hornsteine entstanden sind, zu hoch erschienen, legten sie als unteren Bezugspunkt ein Quarzchert aus dem Horizont Guyot im Pazifik aus ≤ 150 m Tiefe mit $\delta^{18}O$ = 39 ‰ fest. Es handelt sich wohl um den höchsten Wert für ein marines Chert überhaupt, von dem die Autoren annehmen, dass es bei nahezu 0 °C Temperatur am Meeresboden ausgefällt wurde. Daran wurde ihre Fraktionierungsgleichung gebunden[12].

Sehr unterschiedliche Bildungstemperaturen errechnen sich für biogene Cherts zum Beispiel für $\delta^{18}O$-Werte von 32 ‰ (Durchschnitt „Borgerhau“) und 29,7 ‰ (Durchschnitt Wittlingen) bei einem angenommenen $\delta^{18}O$ des Porenwassers von 0 ‰, wie aus Tabelle 25 ersichtlich ist:

Fraktionierungsgleichungen **Chert**	Clayton et al. (1972)	Matthews & Beckinsale (1979)	Matsuhisa et al. (1979)	Kita et al. (1985)	Knauth & Epstein (1976)
$\delta^{18}O$-Wert = 32 ‰ (ø im „Borgerhau“)	35,8 °C	26,0 °C	34,4 °C	38,0 °C	22,8 °C
$\delta^{18}O$-Wert =29,7 ‰ (ø in Wittlingen)	46,4 °C	36,6 °C	44,9 °C	48,8 °C	32,9 °C
Temperaturkoeffizient in ‰ je °C	-0,22	-0,22	-0,22	-0,21	-0,23

Tab. 25: Vergleich der theoretischen, mittleren Bildungstemperaturen für „Borgerhau“ und Wittlingen nach verschiedenen Autoren. Interessant ist die Ähnlichkeit des Temperaturkoeffizienten der verschiedenen Gleichungen.

Die aus den unterschiedlichen Fraktionierungsgleichungen errechneten Bildungstemperaturen, zum Beispiel für den Durchschnitt der Hornsteine aus dem „Borgerhau“ ($\delta^{18}O$ = 32 ‰), variieren stark zwischen 22,8 °C und 38,0 °C, also um gut 15 °C, in Wittlingen variieren die durchschnittlichen Bildungstemperaturen je nach Fraktionierungsgleichung um knapp 16 °C.
Über die richtige sauerstoffisotopische Fraktionierungsgleichung für Cherts bestand und besteht in der Wissenschaft kein Konsens.
Trotz aller Unterschiede dieser und weiterer Fraktionierungsgleichungen und der daraus errechneten Bildungstemperaturen für Cherts ist der Temperaturkoeffizient, hier zwischen -0,21 ‰ $\delta^{18}O$/°C und -0,23 ‰ $\delta^{18}O$/°C, erstaunlich konstant. Die unterschiedlichen $\delta^{18}O$-Temperaturskalen verschiedener Forscher von - 4,4 bis - 4,7 °C je ‰ $\delta^{18}O$ stimmen aber recht

[11] Die jeweiligen Fraktionierungsgleichungen wurden unter folgenden Bedingungen bestimmt:
- Clayton et al. (1972): Synthese von Quarz (18 Proben) und teilweise Austauschreaktion mit Wasser (20 Proben), beides bei 195-750 °C
- Matsuhisa (1979): Isotopenaustausch (33 Proben) bei 25-800 °C
- Matthews und Beckinsale (1979): Synthese von Quarz (18 Proben) bei 256 °C, 360 °C, 465 °C, wobei die Ergebnisse bei 256 °C stark streuen.

[12] Vor allem für Hornsteine aus dem Präkambrium, dem unteren Paläozoikum und der Trias.

gut überein, sodass praktisch zum Beispiel ein um 1 ‰ $\delta^{18}O$ erhöhter Wert eine Temperaturerniedrigung von knapp 5 °C anzeigt. Bei aller Unterschiedlichkeit der Fraktionierungsgleichungen ermöglicht das, Änderungen der $\delta^{18}O$-Werte in Änderungen der Temperatur (°C) direkt umzusetzen.

Auch die niedrigsten berechneten Bildungstemperaturen von 22,8 °C bzw. 32,9 °C, nach der Fraktionierungsgleichung von Knauth & Epstein (1976) aus durchschnittlichen $\delta^{18}O$-Werten von „Borgerhau“ und Wittlingen, liegen über den für das späte Jurameer aus Fossilien, besonders aber aus Riffkorallen, gewonnenen ganzjährigen Wassertemperaturen von etwas über 18 °C (Geyer & Gwinner 2011, 217), über die heute Konsens besteht.

Forscher, vor allem im 20. Jahrhundert, wie Perry & Tan (1972); Knauth & Epstein (1975, 1976); Kolodny & Epstein (1976); Kenny & Knauth (1992); aber auch Knauth (2005); sowie Robert & Chaussidon (2006) gingen davon aus, dass die Bildung von Opal-CT der Cherts im oberflächennahen Sediment stattfindet, wo die Cherts noch wechselnden Temperaturen (Klima) ausgesetzt waren, und dass diese $\delta^{18}O$-Werte im Wesentlichen erhalten bleiben. Dafür sind aber bei einem vermuteten $\delta^{18}O$-Wert des Wassers von 0 ‰ die errechneten Temperaturen für die schwäbischen und bayerischen Hornsteine zu hoch.
Die Bohrkerne der Tiefseeforschung DSDP führten dann aber zu der Erkenntnis, dass zumindest Tiefsee-Cherts mehrere 100 bis mehrere 1000 m unter dem Meeresboden gebildet und dabei ihre $\delta^{18}O$-Werte erniedrigt wurden (vgl. Anhang B6). Ab einer Sedimenttiefe von 16 m wirkt sich der geothermale Gradient aus und erhöht die Sedimenttemperatur (Knauth und Epstein 1976) um durchschnittlich 3 °C/100 m. Die Geothermie liefert die Aktivierungsenergie für die chemischen Reaktionen der Opal-CT- und Quarzbildung.
Genauso wie die Tiefseecherts brauchen die Flachwasserhornsteine aus dem stark calciumhaltigen und damit basischen und flachen Bereich der Tethys Zufuhr von Aktivierungsenergie für die sehr langsame Reaktion von Opal-CT zu mikrokristallinem Quarz der Hornsteine. Auch diese Energie liefert die Geothermie, wofür eine Sedimenttiefe von ≤ 200-350 m offensichtlich ausgereicht hat, da das der Höhe der Gesteinsschicht des Malm oberhalb der Hornsteinschicht der Schwäbischen Alb entspricht (Prof. Aigner, Sedimentgeologie, Universität Tübingen, mündlich; Dr. Martin, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg, persönliche Kommunikation).

4.4.3 Streuung der $\delta^{18}O$-Werte desselben geologischen Zeitraumes

Arnhofen und „Borgerhau“ hatten wohl durchschnittlich sehr ähnliche äußere Bedingungen während der Zeit der Hornsteinbildung, was an dem mittleren $\delta^{18}O$-Wert von 32 ‰ abgelesen werden kann. Bei den Fundorten Wittlingen und „Borgerhau“ weichen dagegen die $\delta^{18}O$-Werte durchschnittlich um ca. 2,2 ‰ voneinander ab. Als Ursachen für die niedrigeren $\delta^{18}O$-Werte der Hornsteine aus Wittlingen bieten sich an:

- SiO_2 vor allem aus Schwämmen mit niedrigeren $\delta^{18}O$ − Werten
- stärkerer Einfluss meteorischen Wassers
- lokal höhere Temperaturen während der Opal-CT-Fällung aufgrund einer höheren Zersetzungsrate der abgestorbenen Schwämme durch Bakterientätigkeit

- örtlich höhere Sedimenttemperatur durch hydrothermale Einflüsse während der Bildung des mikrokristallinen Quarzes.

Keine der möglichen Ursachen ist auszuschließen.

Ob und wie stark sich die $\delta^{18}O$ − Werte der Kieselschwammnadeln und Schalen der Einzeller (vor allem Radiolarien) im Jura in den flachen, nördlichen Bereichen der Tethys unterschieden, ist unbekannt. Ursprünglicher biogener Opal-A aus dem Jura ist nicht mehr vorhanden (Hesse 1988). Nach Labeyrie (1974); Matheney & Knauth (1989), sowie Jochum et al. (2012) liegen die $\delta^{18}O$-Werte rezenter Schwammnadeln verschiedener Meere zwischen 36,4 und 45,0 ‰. Von den untersuchten, rezenten Schwammnadeln sind wohl die aus der Adria mit $\delta^{18}O$-Werten von 37,4 ‰ (Suberites domuncula) und 38,0 ‰ (Tethya aurantium) in 20 m Tiefe am ehesten mit denen aus dem Oberjura zu vergleichen (Jochum et al. 2012). Wichtig wäre auch die Klärung der Frage, ob die temperaturabhängige Fraktionierung der SiO_2-bindenden Organismen nur von Veränderungen der isopischen Zusammensetzung des Wassers, in dem sie leben, abhängt. Für spezielle Fraktionierungmechanismen einzelner Arten sprechen unterschiedliche Fraktionierungskurven vor allem für Schwämme, aber auch für marine Diatomeen (Matheney & Knauth 1989; Jochum et al. 2012). Für Diatomeen im Süßwasser wurde letzteres durch Versuchsergebnisse ausgeschlossen (Moschen 2004, 106-109). Dennoch können Schwankungen von Nahrungsangebot, temperaturabhängiger Wachstumsrate, Konkurrenz und Fraß durch Konsumenten den Effekt der Isotopenfraktionierung überlagern (vgl. Moschen 2004, 102; 104).

Ein stärkerer Einfluss meteorischen Wassers an verschiedenen Fundorten ist besonders in Wittlingen wahrscheinlich. Gerade dort zeigen häufige Kieselschwammstotzen das Flachmeer der Schwellenregion der Tethys an (Geyer & Gwinner 2011, 275).

Viele der Hornsteine aus Wittlingen wirken vor allem im Inneren fleckig marmoriert, wie wenn sie relativ schnell aus kleineren, nebeneinander liegenden Opal-CT- Einheiten oder solchen aus mikrokristallinem Quarz zusammengewachsen wären. Das geschieht immer dann, wenn eine stark übersättigte SiO_2-Lösung viel $Mg(OH)_2$ als Kristallisationskeime enthält. Es erfolgt dann eine rasche Minderung der gelösten Kieselsäuren durch Fällung, bei der sogar die Opal-CT-Phase übersprungen werden kann (Kastner et al. 1977; Williams et al. 1985). Für eine besonders hohe Konzentration an Kieselsäure und ihren niederpolymeren Produkten spricht, dass die Hornsteine in Wittlingen die höchste Konzentration an Schwammnadelresten von allen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fundorten haben. Das zeigte sich vor allem auch an der mehr als fünffach höheren Dichte der mit Chalcedon verfüllten Schwammnadelhohlräume gegenüber den anderen Fundorten im Dünnschliff (Abb. 55; Tab. 19). Eine massenhafte Zersetzung der Schwämme durch Bakterien dürfte lokal die Temperatur kurzfristig erhöht haben. Der Sauerstoff könnte dann auch schnell knapp geworden sein, wodurch vor allem anaerobe Bakterien tätig wurden, was die OH^--Konzentration und damit den pH-Wert stark erhöht hat, was wiederum die Fällung von Opal-CT und Mikroquarz begünstigt hat. Erst in den letzten Opal-CT-Phasen in Wittlingen wurde die Kieselsäurekonzentration so gering, dass nur noch schmale „Zwiebelschalen“ auf die inzwischen zusammengewachsenen Hornstein„bausteine“ aufgelagert werden konnten.

Ob der geothermische Gradient nicht nur heute (11 °C/100 m), sondern auch schon in der Malm-/Kreidezeit in Wittlingen, höher war als an den übrigen Fundorten, ist nicht bekannt

und wird eher nicht vermutet (Prof. Aigner, Sedimentgeologie Universität Tübingen, mündlich; Dr. Martin, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg, persönliche Kommunikation).

Bei den hier untersuchten schwäbischen und bayerischen Hornsteinen, bei denen viele Parameter übereinstimmen, gab es maximale Abweichungen der $\delta^{18}O$-Werte bis 4,2 ‰, letzteres würde etwa 19 °C Bildungstemperaturdifferenz bei gleichem $\delta^{18}O$-Wert des Meerwassers entsprechen. Weltweit differieren die $\delta^{18}O$-Werte im Jura um 9 ‰, was einer Bildungstemperaturdifferenz von ca. 41°C entspricht (bei 0 ‰ $\delta^{18}O$-Wert des Meerwassers) (Abb. 67; Tabelle D3 im Anhang). In anderen geologischen Zeiträumen differieren die $\delta^{18}O$-Werte sogar bis zu 14,7 ‰, zum Beispiel im Mesoproterozoikum vor etwa 1,3 Milliarden Jahren, mit einer errechneten unrealistischen Temperaturdifferenz von ca. 67°C (bei 0 ‰ $\delta^{18}O$-Wert des Meerwassers) (Abb. 68; Tabelle D3 im Anhang). Das ist in jedem Fall erstaunlich viel, auch wenn die Cherts aus verschiedenen klimatischen Bereichen kommen.

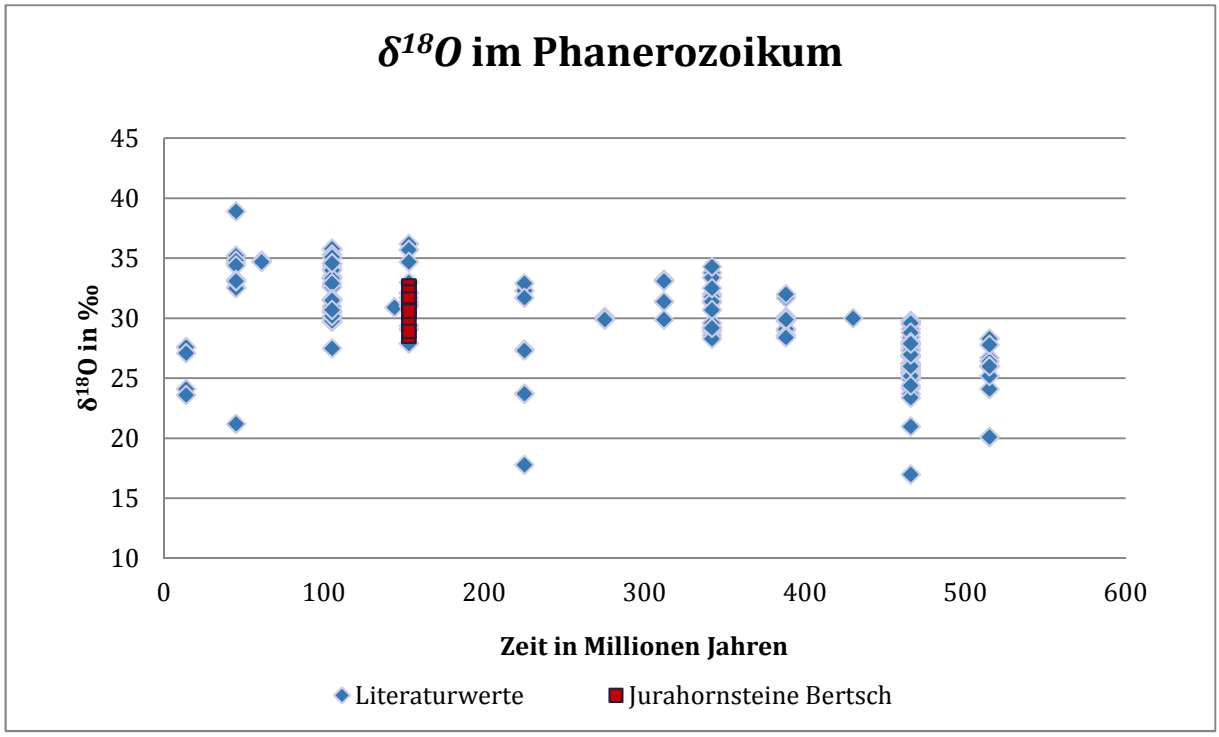


Abb. 67: $\delta^{18}O$-Werte von Cherts aus der Literatur und die für diese Arbeit bestimmten $\delta^{18}O$-Werte für schwäbische und bayerische Jurahornsteine. Die letzteren Werte passen recht gut zu den $\delta^{18}O$-Werten von Cherts dieser Zeit weltweit.

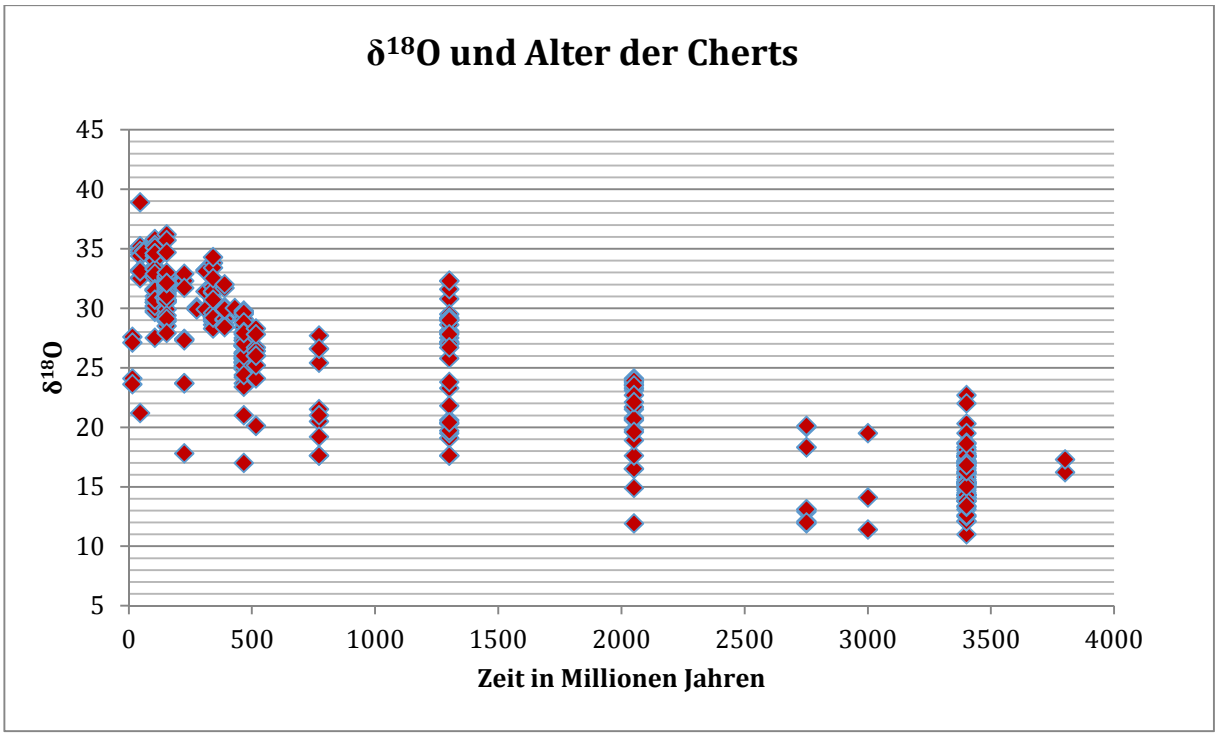


Abb. 68: $\delta^{18}O$-Werte von Cherts in den letzten 4 Milliarden Jahren. Deutlich ist die Tendenz zur Abnahme der $\delta^{18}O$-Werte mit dem Alter der Cherts.

Knauth & Epstein (1976), sowie Kolodny & Epstein (1976) versuchten das Problem der mit dem Alter der Cherts abnehmenden $\delta^{18}O$-Werte zu lösen, indem sie $\delta^{18}O$-Werte gegen δD-Werte grafisch darstellten (Abb. 69).
Es zeigte sich, dass Cherts aus demselben geologischen Zeitraum diese Werte etwa parallel zur meteorischen Wasserlinie mit einer Steigung von 8 streuen. Die Linie A ist eine empirische Gerade mit einer Steigung von -6 und der Ort, an dem sich die Cherts, die im Gleichgewicht mit dem Ozeanwasser entstanden sind, befinden sollten. Höhere Bildungstemperatur plottet mit niedrigeren $\delta^{18}O$- und höheren δD-Werten. Die Bildungstemperaturen im Ozean (in °C) sind durch die Geraden parallel zur meteorischen Wasserlinie angegeben, wobei für das untere Paläozoikum und die Trias die höchsten Ozeantemperaturen angenommen werden. Das Feld der geologischen Zeit, das sich jeweils von der A-Linie nach links unten zieht, etwa parallel zu den erwarteten Bildungstemperaturen, gibt dann den Grad der Mischung von Meerwasser mit meteorischem Wasser bis hin zu reinem meteorischem Wasser bei der Entstehung der einzelnen Cherts an (Abb. 69). Werte rechts der A-Linie sind nach dieser Theorie durch Evaporation verändert (Knauth & Epstein 1976; Kolodny & Epstein 1976; Sharp 2007, 190 f.).

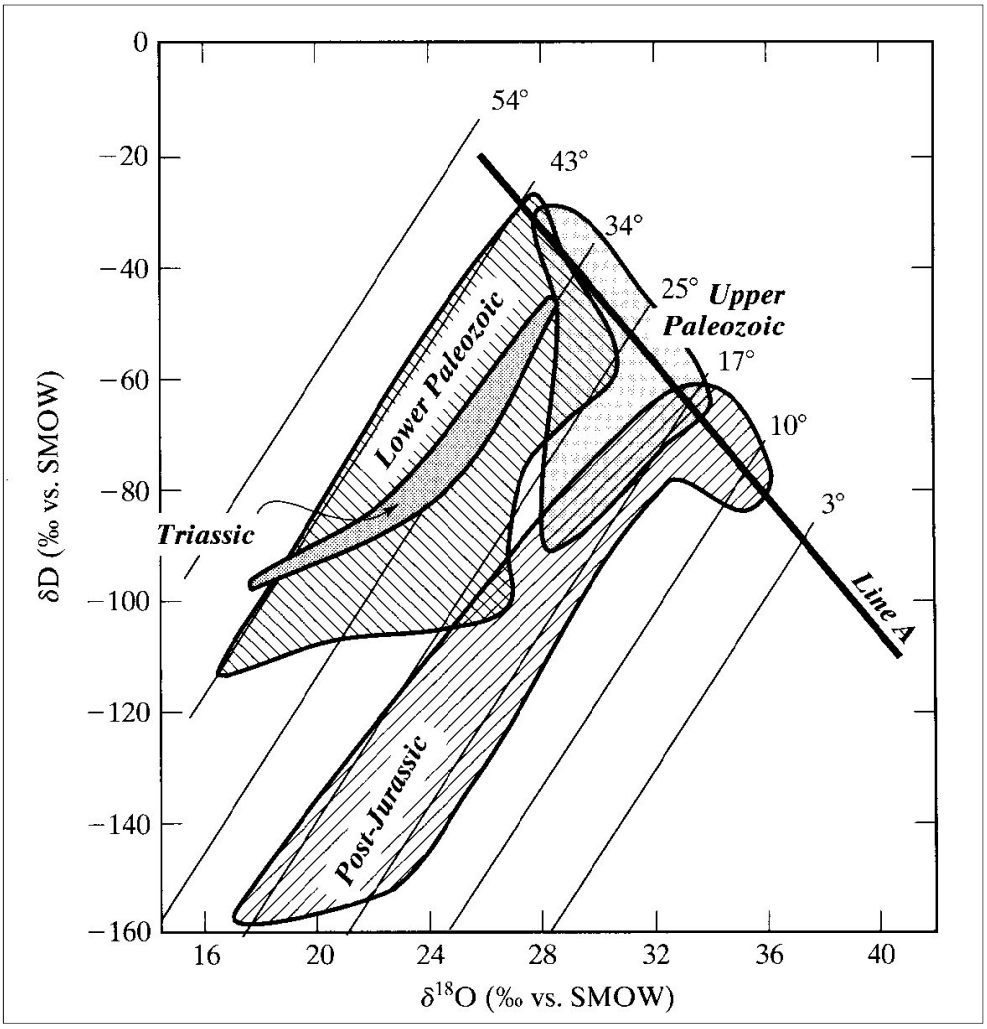


Abb. 69: δD-Werte einiger Cherts gegen deren $\delta^{18}O$-Werte aufgetragen. Auf der Linie A (einer empirischen Geraden) sollen sich die Cherts befinden, die im Gleichgewicht mit dem Ozeanwasser entstanden sind. Im Bereich der Temperaturlinien, parallel zur meteorischen Wasserlinie, befinden sich Cherts, die von rechts nach links durch zunehmende Konzentration von meteorischem Wasser beeinflusst sind (Sharp 2007, Abb. 8.9 verändert nach Knauth & Epstein 1976).

Betrachtet man die Grafik von 100 Hornsteinen aus der Literatur (Abb. 70; vgl. Anhang D4) mit Angaben zu $\delta^{18}O$- und δD-Werten, zeigt es sich, dass relativ wenig Cherts in der Nähe der Linie A liegen. Die Bildung der meisten Cherts wäre demnach von meteorischem Wasser beeinflusst. Ein weiteres Problem ist, dass die Cherts stark, teilweise sehr stark von einer Parallelen zur meteorischen Wasserlinie abweichen (Temperaturlinien), so besonders stark zum Beispiel die $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte aus dem Proterozoikum, aber auch die des Trias und Perm (vgl. Anhang B7).

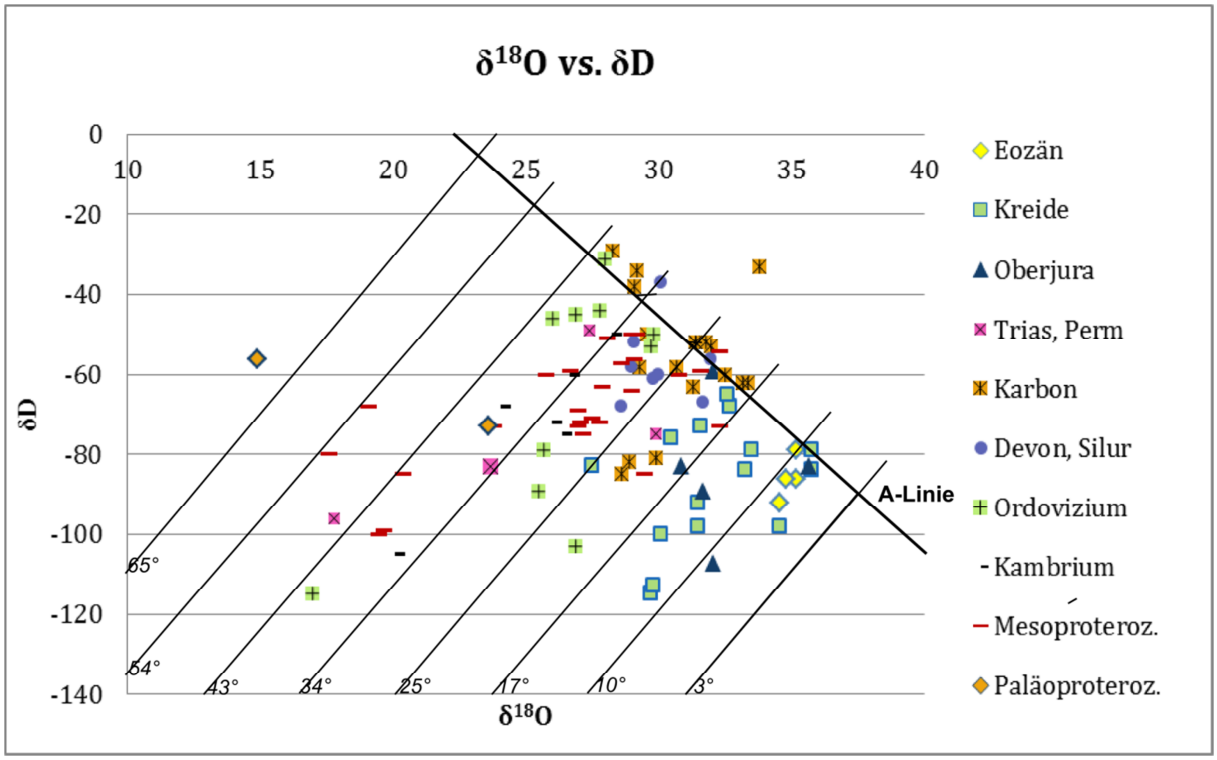


Abb. 70: $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte von 100 Cherts aus der Literatur. Die meisten Cherts liegen deutlich links der A-Linie und streuen relativ stark außerhalb bestimmter Temperaturlinien, die parallel zur meteorischen Wasserlinie verlaufen (vgl. Anhang B7).

Das Problem, dass, nach diesen zunächst recht bestechend wirkenden Hypothesen, weitaus der größte Teil der untersuchten Cherts von meteorischem Wasser beinflusst wären, sahen auch schon Knauth & Epstein (1976) so.

Neue Zweifel an dieser Theorie lassen Untersuchungen an zwei Jurahornsteinen aus Polen mit periodisch antiphasischen $\delta^{18}O$- und δD-Werten aufkommen (Abb. 71), die nicht auf der A-Linie liegen (Sharp et al. 2002; Migaszewski et al. 2006). Wären sie, wie nach der obigen Theorie erwartet, periodisch von meteorischem Wasser beeinflusst, müssten sich die $\delta^{18}O$- und δD-Werte gleichsinnig verändern (Migaszewski et al. 2006)[13].

[13] Das Besondere des Hornsteins aus Ozarow (Abb. 71) ist, dass die Schwankungen der $\delta^{18}O$- und δD-Werte fast perfekt gegenläufig sind. Ursache dafür kann nicht die Diagenese sein, verändert sie doch sowohl die $\delta^{18}O$- als auch die δD-Werte in gleicher Richtung. Die hier gefundenen antiphasischen $\delta^{18}O$- und δD-Werte werden dagegen gewöhnlich mit regelmäßigen Temperaturwechseln wie Tag-Nachtrhythmen, jahreszeitlichem Temperaturwechsel oder Klimawechsel in Beziehung gebracht. An Einflüsse solch kurzzeitiger Temperaturwechsel bei einer Hornsteindiagenesezeit von < 25-50 Ma ist hier nicht zu denken. Die gegenläufige Periodizität der beiden stabilen Isotope zeigt an, dass es in der Zeit der Hornsteindiagenese in einer Ablagerungstiefe im Sediment von >100 m dreifache Temperaturwechsel gegeben haben muss. Migaszewski et al. (2006) unterstellen nach Abwägung verschiedener Möglichkeiten periodische hydrothermale Aktivitäten während der Bildung dieses Hornsteins (Sharp et al. 2002; Migaszewski et al. 2006). Wenn diese Erklärung richtig ist, handelt es sich bei den antiphasischen $\delta^{18}O$- und δD-Werten des Hornsteinquerschnittes um ein lokales Problem des polnischen Ozarow. Leider gibt es bisher keine solchen Untersuchungen von Querschnitten durch Hornsteine aus Süddeutschland, die einen Hinweis geben könnten, ob es sich vielleicht doch um ein allgemeineres Problem handelt, das Anlass zu weiterer Forschungsarbeit bietet.

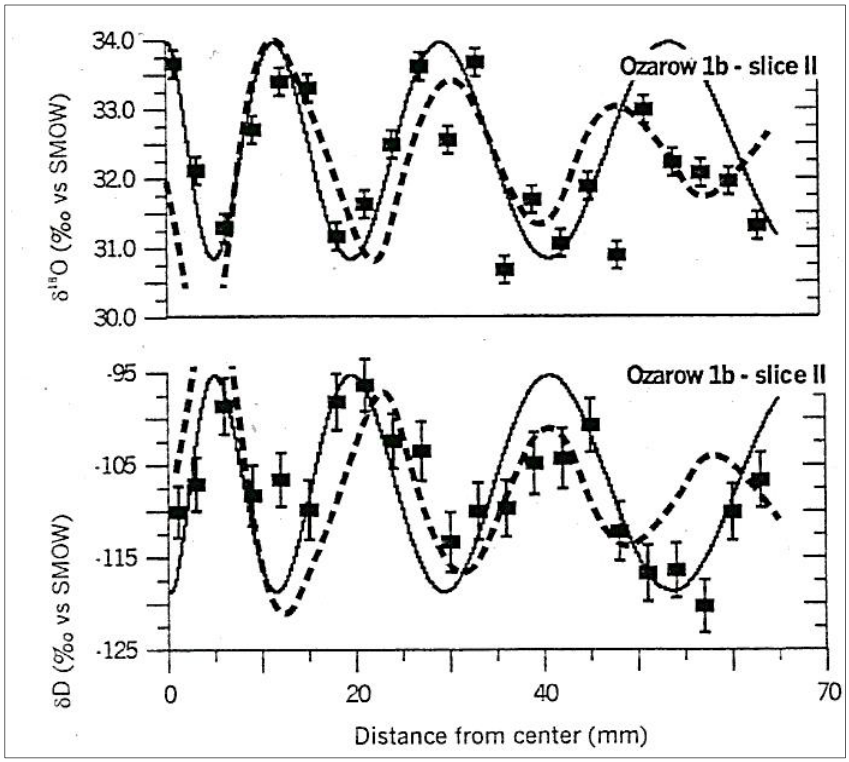


Abb. 71: Periodisch antiphasische $\delta^{18}O$- und δD-Werte eines Jurahornsteinquerschnittes aus Ozarow (Polen) (Sharp et al. 2002).

Wie Abb. 70 zeigt, muss sich die Temperaturabhängigkeit des $\delta^{18}O$-Wertes eines Cherts auf verschiedene Fraktionierungsschritte bei unterschiedlichen Temperaturen beziehen. Es ist deshalb verständlich, dass Cherts gleicher geologischer Zeit, die aus unterschiedlichen geographischen Räumen stammen und verschiedenen Bildungsbedingungen (zum Beispiel Flachwasser, Tiefsee, meteorisches Wasser, pH-Wert, Kristallisationskeime) und damit auch unterschiedlichen Bildungszeiten ausgesetzt waren, sich in ihrem $\delta^{18}O$-Wert deutlich unterscheiden können. Diese Meinung wurde von Kastner (1981, 936) und in jüngerer Zeit vor allem von Faure & Mensing (2005, 736-739) vertreten. Die Streuung innerhalb derselben oder einer nah verwandten Zeit ist, nach Faure & Mensing (2005, 737), folgenden Umständen zuzuschreiben (wobei der letzte Punkt als der wichtigste angesehen wird):

- „Temperaturunterschiede im Ablagerungsgebiet“
- „Unterschiede des $\delta^{18}O$−Wertes des Meerwassers im Ablagerungsgebiet“
- „diagenetische Veränderungen bei erhöhten Temperaturen nach der Ablagerung und Isotopenaustausch mit meteorischem Wasser, die beide den ^{18}O-Gehalt im Chert senken“

4.4.4 Tendenzielle Abnahme der $\delta^{18}O$-Werte mit dem Alter der Cherts

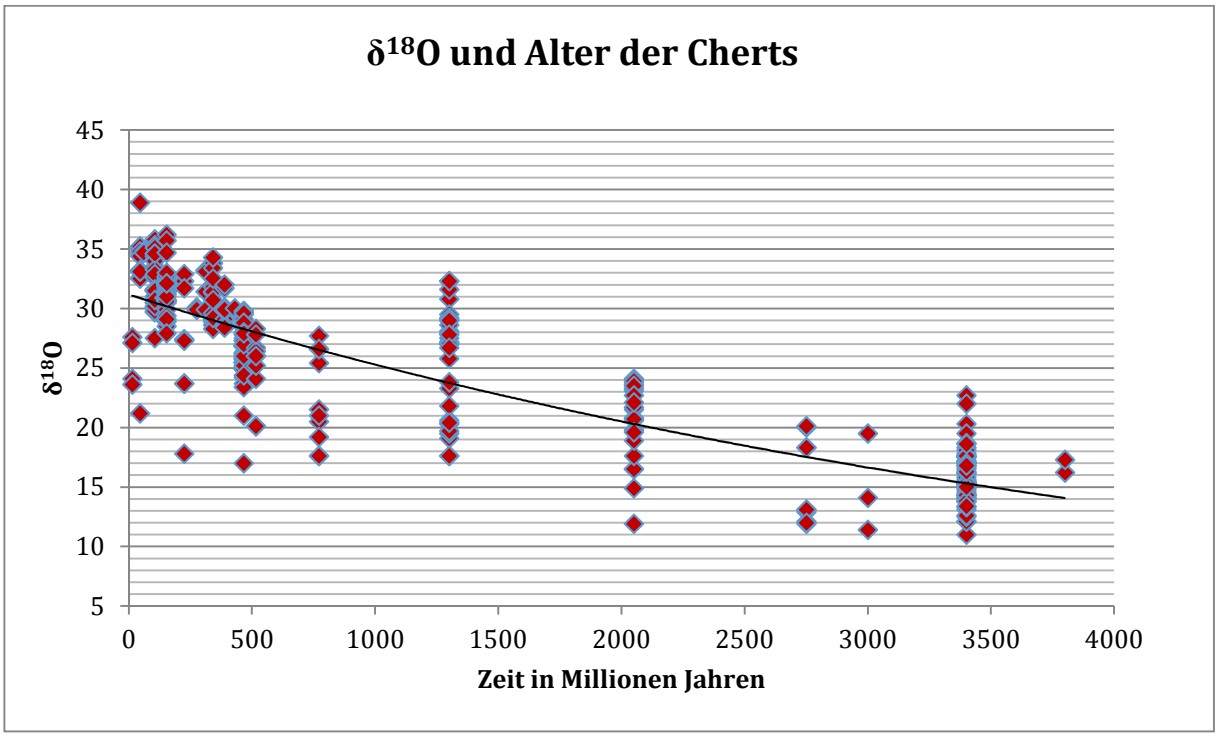


Abb. 72: Entwicklung der $\delta^{18}O$-Werte von Cherts während der letzten 4 Milliarden Jahre. Eine exponentielle Abnahme dieser Werte (Trendlinie) ist unübersehbar (nach $\delta^{18}O$-Werten aus der Literatur von 299 Cherts und 30 hier untersuchten Hornsteinen im Anhang D3).

Wie Abb. 72 zeigt, nehmen die $\delta^{18}O$-Werte mit dem Alter der Hornsteine und Cherts ab. Dabei verläuft die Trendlinie exponentiell. Die $\delta^{18}O$-Werte von ca. 3,4 Milliarden Jahre alten Cherts sind um bis zu 28 ‰ niedriger als die aus etwa 50 Millionen Jahre alten Schichten, was einer Zunahme der Bildungstemperatur um 123 °C bis 132 °C (bei einem $\delta^{18}O$-Wert von 0 ‰ des Meerwassers) entsprechen würde, was unrealistisch ist.

Die in den letzten 40 Jahren wissenschaftlich diskutierten Ursachen für die Abnahme der $\delta^{18}O$-Werte mit dem Alter der Cherts können folgendermaßen zusammengefasst werden (verändert nach Robert 1988):

- eine zunehmende Veränderung der Temperaturen in der Vergangenheit (Knauth & Epstein 1976; Knauth & Lowe 1978)
- eine Veränderung in der isotopischen Zusammensetzung des Ozeans (Chase & Perry 1977; mit einer Neubewertung von Karhu & Epstein 1986)
- zusätzlich Beachtung der Intensität der Wasser/Gestein-Interaktion und des Wasser/Gestein-Verhältnisses (Robert 1988)

Die Annahme einer zunehmenden Veränderung der Meerestemperaturen mit dem Alter der Cherts beruht ja gerade auch auf $\delta^{18}O$-Werten von Cherts (sog. „Klimaproxis“). Die heute recht gut gesicherten Temperaturdaten für das Phanerozoikum auf der Basis verschiedener Datenquellen (Bubenzer & Radtke 2007 Abb. 4, im Anhang C) befinden sich keineswegs im Einklang mit dem Verlauf der $\delta^{18}O$-Kurve in diesem Zeitraum (Abb. 67). Auch eine Kurve, die die jeweils höchsten $\delta^{18}O$-Werte der Cherts ihrer Zeit auf der A-Linie verbindet, also von

Cherts, die nicht von meteorischem Wasser beeinflusst sind, hat keine durchlaufende Beziehung zu den Temperaturdaten des Phanerozoikum. Für die Zeit vor 550 Millionen Jahren fehlen noch gesicherte Temperaturdaten.
Ursachen für die Schwierigkeiten mit den $\delta^{18}O$-Werten und der Meerestemperatur wurden bereits unter 4.4.2 diskutiert: Cherts bilden sich nur anfangs im Meerwasser, ihre weitere Entwicklung findet in unterschiedlicher Tiefe im Sediment und bei unterschiedlichen Temperaturen statt, diese entsprechen nicht der Luft- oder Wassertemperatur.

Eine Veränderung der isotopischen Zusammensetzung des Ozeans wurde gegensätzlich diskutiert: Zum Beispiel erklärten Perry & Tan (1972) die niedrigen $\delta^{18}O$-Werte der frühen präkambrischen Cherts aus Südafrika durch eine isotopische Zusammensetzung des Ozeanwassers mit $\delta^{18}O$ = ca. -15 ‰ bei durchschnittlicher heutiger Ozeantemperatur. Im Gegensatz dazu sahen es Karhu und Epstein (1986) aufgrund ihrer Untersuchungen von Chert/Phosphatpaaren als gesichert an, dass das Ozeanwasser in der Vergangenheit eine konstante Zusammensetzung von $\delta^{18}O$ = ca. -1 ‰ hatte, die Wassertemperatur dagegen schwankte. Heute existiert nach Faure & Mensing (2005, 738) die vorherrschende Einschätzung, dass die $\delta^{18}O$-Werte der präkambrischen Cherts durch Vorgänge nach ihrer Ablagerung erniedrigt wurden „and therefore cannot be used to determine the isotope composition of seawater and the temperature of the Precambrian oceans."

Wenn mikrokristalliner Quarz im Verlauf von vielen Jahrmillionen mit $\delta^{18}O$ abgereichert wird, können Cherts nicht absolut dicht („geschlossen") sein, wie vielfach angenommen wurde (Knauth & Epstein 1976). Das engmaschige dreidimensionale SiO_2-Netz von Opal-CT und Quarz dürfte keine absolute Schranke für kleine Moleküle darstellen. Gegenüber anderen möglichen, sauerstoffhaltigen chemischen Verbindungen im Hornstein ist Wasser am kleinsten und am leichtesten flüchtig und dürfte so, für die Abnahme von $\delta^{18}O$ mit der Zeit hauptsächlich verantwortlich sein. Das in den SiO_2-Gitterhohlräumen befindliche Wasser kann mit dem Umgebungswasser (Porenwasser, Meerwasser, meteorischem Wasser) austauschen und so den $\delta^{18}O$-Wert senken.

Die Differenzen der $\delta^{18}O$-Werte von Cherts lassen sich auch durch unterschiedliche Temperaturen bei den Fraktionierungen, die Cherts während ihrer Bildung durchlaufen, erklären. Für Flachwassercherts in Kalk, wie den Oberjurahornsteinen, gibt es (mindestens) fünf Sauerstofffraktionierungs"stufen" entsprechend der Temperatur und dem $\delta^{18}O$-Wert des beteiligten Wassers:

- im biogenen Organismus, zum Beispiel Kieselschwamm
- Opal-A der Organismen mit Meerwasser am Meeresboden und in den ersten Sedimentschichten
- Fällung des Opal-CT für jede gebildete Schicht oder „Zwiebelschale" neu
- „Reifung" des Opal-CT; Bildung von mikrokristallinem Quarz in größeren Sedimenttiefen
- weitere Kristallisation des Quarzes

Bei den Kondensationsreaktionen während der Chert-Bildung handelt es sich um chemische Reaktionen, die die Kristallinität erhöhen, dabei wird jeweils Wasser abgespalten. Das freige-

setzte Wasser, sowohl aus den Hohlräumen der Cherts als auch das Reaktionswasser, enthält bei höherer Temperatur aufgrund der schwächeren Fraktionierung etwas höhere $\delta^{18}O$-Werte, wodurch der $\delta^{18}O$-Wert in den Cherts mit der Einbettungstiefe und dem Alter sinkt.

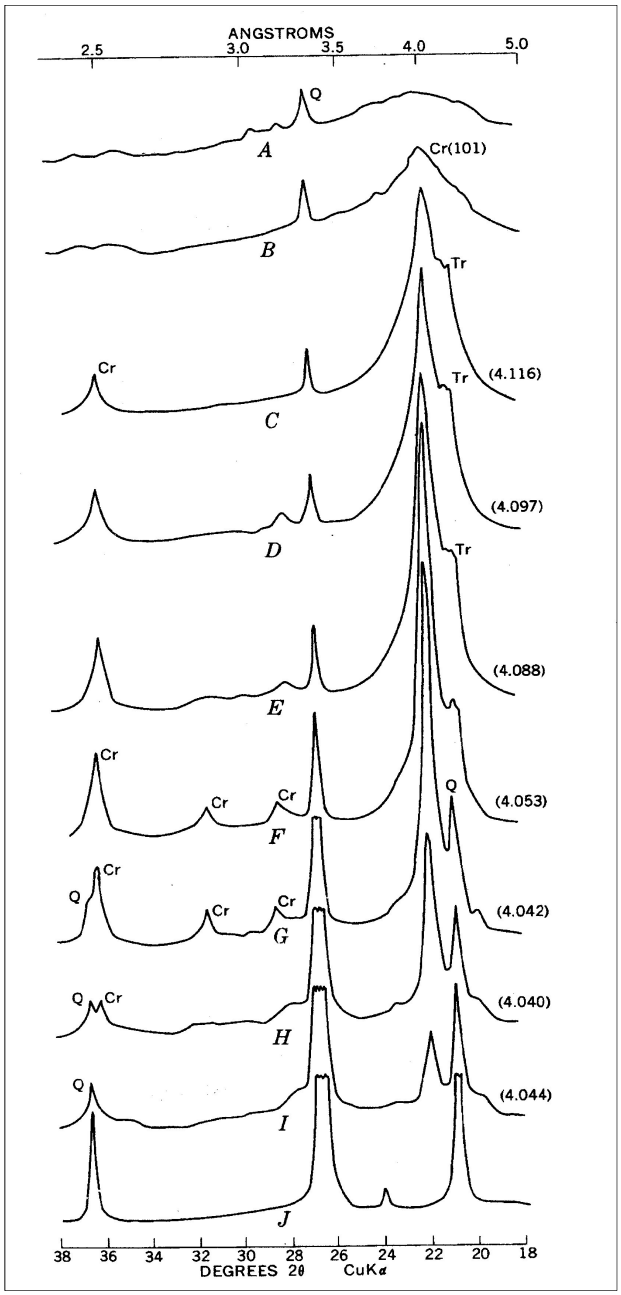


Abb. 73: Ausschnitt von übereinander angeordneten Röntgendiffraktogrammen (Cu Kα) in stratigraphischer Reihenfolge der Proben von B: Opal-A über C: Opal-CT, G: Opal-CT und Quarz bis J: Quarz. In Klammern d (101) spacing in Å des Cristobalit der Geamtgesteinsprobe. Typische Peaks: Tr Tridymit, Cr Cristobalit, Q Quarz (verändert nach Murata & Larson 1975, Abb. 5).

Für langsame Veränderungen innerhalb der Cherts über Jahrtausende bis Jahrmillionen sprechen auch die folgenden Beobachtungen:
Cristobalit geht im Laufe der Zeit vom ungeordneten Zustand in einen stärker geordneten Zustand über, was sich im Röntgendiffraktogramm nachweisen lässt, und auf einer Erhöhung der

Kristallinität beruht (Mizutani 1977; Hein et al. 1978; Kastner 1981, 937; Pisciotto 1981; Williams et al. 1985).
Im Gegensatz zu der vor allem in der Vergangenheit vertretenen Meinung einer sprunghaften Veränderung von Opal-CT zu Quarz (Murata et al. 1977; Kastner 1981, 937; Sharp 2007, 191 f.) verändern sich die $\delta^{18}O$-Werte nicht sprunghaft, wie aus den DSDP (Deep Sea Drilling Project)-Forschungen an Tiefseebohrkernen, den tabellierten Werten und Grafiken geschlossen werden kann. Auch das Röntgendiffraktogramm verändert sich in typischer Weise mit der Zunahme der Kristallinität (Pisciotto 1981; Williams et al. 1985; Hesse 1988; Robert 1988) und die zunehmende Kristallinität des Mikroquarzes mit zunehmendem Alter (Abb. 73) (Murata & Norman 1976; Robert 1988).
Damit scheinen weitere, schwierige, noch andauernde Diskussionen über sehr hohe Temperaturen des präkambrischen Ozeans (> 70 °C) und sehr niedrige $\delta^{18}O$-Werte des präkambrischen Ozeans (-8 ‰)[14] im Zusammenhang mit den $\delta^{18}O$-Werten von Cherts weitgehend überholt (vgl. Knauth 2005; Robert & Chaussidon 2006).

4.4.5 Entstehungszeitraum der Hornsteine und $\delta^{18}O$

Eine weitere, sehr schwierige Frage ist, wielange die Hornsteinentwicklung von der Fällung bis zur Quarzphase dauert.

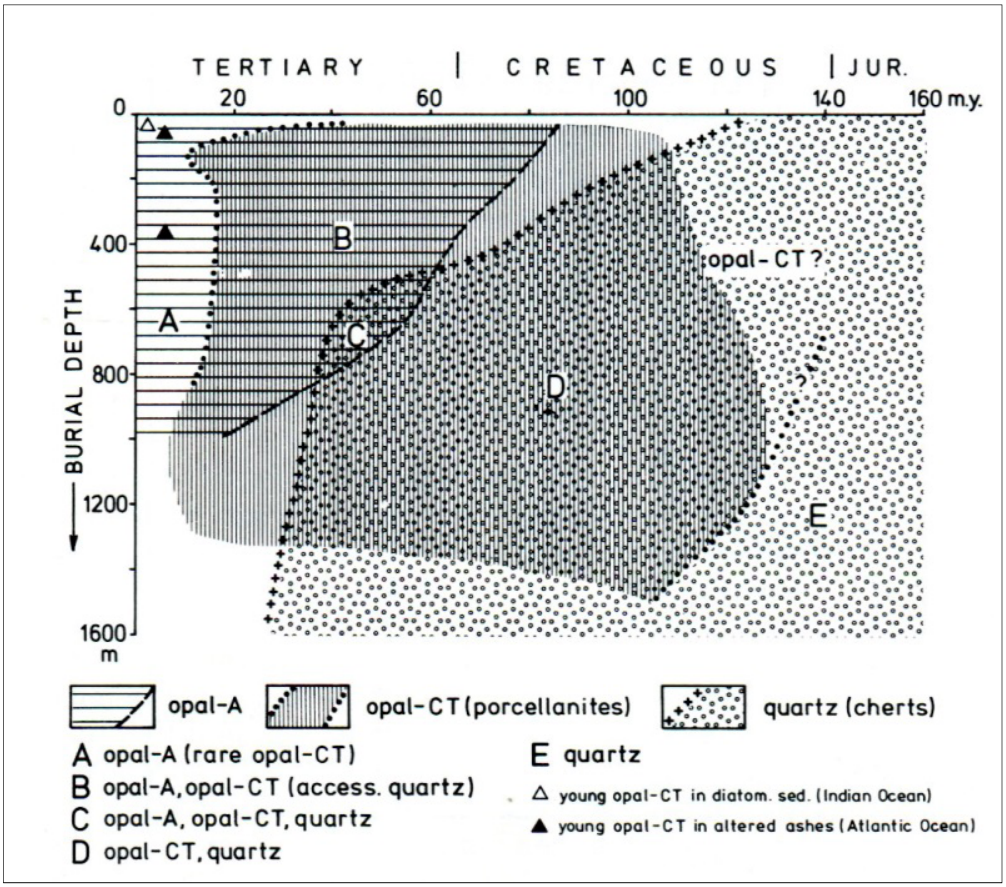


Abb. 74: Versenkungstiefendiagramm der Stabilitätsbereiche von Opal-A, Opal-CT und diagenetischem Quarz in den geologischen Formationen Jura, Kreide und Tertiär. Untersuchungen von DSDP- SiO_2-haltigen Sedimenten, vor allem aus dem Atlantik (Riech & von Rad 1979 Abb. 11).

[14] Dr. H. Taubald, Isotopengeochemie, Universität Tübingen, mündlich am 13.5.2013.

Für Tiefseecherts gibt es relativ sichere, aber auch breit gestreute Bildungszeiten. Aufgrund der DSDP-Forschungen konnten verschiedene SiO_2-Phasen aus Sedimenten verschiedener geologischer Phasen (vor allem Quartär bis Kreide) untersucht und datiert werden (Riech & von Rad 1979; Hesse 1988) (Abb. 74). Die Bildungs- und „Reifungszeiten", jeweils von der Fällung bis zur genannten SiO_2-Phase, betragen demnach:

Opal-A:	bis 85 Millionen Jahre
Opal-CT:	10 bis 125 Millionen Jahre
Quarz:	30 bis > 120 Millionen Jahre

Andere Schätzungen des Alters von Cherts messen die Dicke der Sedimentschicht über den Cherts und errechnen daraus mit Hilfe einer mittleren Sedimentationsrate ein durchaus unterschiedliches Alter, zum Beispiel Kolodny & Epstein 1976: 1 m/100.000 a; Murata et al. 1977: 1 m/4.000 a. Extrapolationen der Werte chemischer Experimente mit hoher Temperatur und Hochdruck liefern weitere Zeitschätzungen in Abhängigkeit von der Temperatur (Ernst & Calvert 1969).

Es hat sich gezeigt, dass die Bildungszeiten der einzelnen Phasen abhängig von der Einbettungstiefe (zum Beispiel 500-1500 m für Quarz), dem geothermischen Gradienten, der Zusammensetzung der Lösung und der des Gastsedimentes sind (Kastner et al. 1977; Kastner 1981, 936). Offensichtlich haben sich einige Wissenschaftler auf ungefähr 25 bis 50 Millionen Jahre für die Chertbildung bei einem durchschnittlichen geothermischen Gradienten geeinigt (Keene 1975, 444; Kastner et al. 1977; Hein et al. 1978; Riech & von Rad 1979). In diesem Bereich (30-52 Millionen Jahre) liegt auch die Bildung von Tiefseecherts in Kalk (Behl & Smith 1992).
Für Hornsteine aus dem kalkhaltigen und damit basischen Randbereich der Tethys entfällt die Opal-A-Phase weitgehend. Die Opal-CT- und die Quarzbildung sind durch das Vorhandensein von $Mg(OH)_2$ und einem pH-Wert ≥ 8 gegenüber den meisten Tiefseecherts beschleunigt. Dagegen wurden diese Hornsteine weniger tief eingebettet als Tiefseecherts (< 300 m), es stand also weniger Temperatur für die Umwandlungsprozesse zur Verfügung. Oberjurahornsteine bestehen aufgrund des hohen Alters ($\leq$ 156 Millionen Jahre) fast vollständig aus mikrokristallinem Quarz (vgl. 4.4.1). Schätzungen der Bildungszeiten für Oberjurahornstein speziell gibt es nicht.

$\delta^{18}O$-Werte können nur sehr indirekt eine Aussage über die Bildungszeiten von Cherts in Kalk machen. Aus den $\delta^{18}O$-Differenzen zwischen Opal-CT und Quarz lassen sich mit Hilfe von Fraktionierungsgleichungen Bildungstemperaturdifferenzen berechnen, die zwischen 7 °C und 42 °C liegen (Knauth & Epstein 1975; 1976; Behl & Smith 1992, 81; Kenny & Knauth 1992). Bei Verwendung eines durchschnittlichen Temperaturgradienten von 3 °C/100 m und einer Sedimentationsrate von 1 m/100.000 a errechnen sich bei den obigen Temperaturdifferenzen 23 Millionen Jahre bis 140 Millionen Jahre für die Chertbildung im Kalk. Bei Verwendung anderer Fraktionierungsgleichungen, Temperaturgradienten und Sedimentationsraten erhält man eine noch breitere Streuung der Bildungszeiten für Cherts in Kalk. $\delta^{18}O$-Werte können damit keineswegs genauere Bildungszeiten als herkömmliche Methoden für Cherts liefern: etwa 25 bis 50 Millionen Jahre.

4.5 Zusammenfassung

Sauerstoffisotopie beruht auf der Tatsache, dass sich durch Fraktionierung aufgrund der Masse zwischen den beiden natürlichen Isotopen ^{16}O und ^{18}O in der Natur ein Gleichgewicht einstellt, das von der Temperatur abhängig ist.

Der $\delta^{18}O$-Gehalt von 30 Hornstein- und Chertproben, 6 aus Arnhofen, 11 aus dem „Borgerhau“, 4 aus Wippingen, 5 aus Wittlingen und 4 aus Ungarn, wurde mit dem Massenspektrometer Finnigan MAT 252 gemessen, nachdem der Sauerstoff der Hornsteinpulverproben nach der Fluoridmethode in der Silikatanlage in Form von CO_2 abgetrennt worden war. Der gesamtanalytische Fehler liegt bei 0,22 %.

Aufgrund ihrer relativ niedrigen $\delta^{18}O$-Werte mit einem Durchschnitt von 29,7 ‰ erscheint es möglich, die Hornsteine aus Wittlingen von den übrigen aus den schwäbischen und bayerischen Fundorten zu trennen; ob das für das nahegelegene Wippingen auch gilt, konnte nicht sicher festgestellt werden.

Auch wenn die hier durchgeführten $\delta^{18}O$-Untersuchungen aufgrund der geringen Anzahl von Hornsteinen je Fundort statistisch nicht relevant sind, gaben sie doch deutliche Hinweise, dass eine weitere Trennung von Hornsteinen der untersuchten Fundorte aufgrund der $\delta^{18}O$-Werte wenig aussichtsreich erscheint. Im Gegensatz zu der anfänglichen Hoffnung, die Hornsteine aller untersuchten Fundorte aufgrund der hohen Temperatursensibilität der $\delta^{18}O$-Werte trennen zu können (ca. 1 ‰ Differenz der $\delta^{18}O$-Werte entspricht ungefähr 5 °C), gelang dies nicht.

Literaturstudien zur Hornstein- und Chertentstehung im Allgemeinen und der veröffentlichten $\delta^{18}O$-Werte (und δD-Werte) von Cherts vermittelten dann die Einsicht, dass die $\delta^{18}O$-Werte der Cherts weit komplexere Ursachen haben als es noch heute von einigen Autoren gesehen wird. Die $\delta^{18}O$-Werte der Cherts, ebenso wie die der Hornsteine, geben offensichtlich nicht ausschließlich die Temperatur des (Meer-)Wassers wieder, in dem die erste SiO_2-Fällung als Opal-A oder Opal-CT stattfand. Kastner (1981, 936) formulierte zu den $\delta^{18}O$-Werten der Cherts bereits: „Instead they reflect the complex diagenetic origin of cherts, which includes the conditions of bottom water at sedimentation, the increase in temperature due to burriel depth, and the isotopic composition of the interstitial water…Thus it is questionable whether deep-sea porcelanites, and especially cherts, ever record bottom water temperatures of any geologic age.” Und Faure & Mensing (2006, 738) äußerten sich zu den $\delta^{18}O$-Werten der präcambrischen Cherts: „…the prevailing assessment is that the $\delta^{18}O$ values of Precambrian cherts … have been lowered by postdepositional processes and therefore cannot be used to determine the isotope composition of seawater and the temperature of Precambrian oceans.” Den Aussagen dieser beiden Forscher schließe ich mich an.

Für die komplexe diagenetische Entstehung und „Reifung“, die die $\delta^{18}O$-Werte der Cherts und Hornsteine wiedergeben, spricht:

- die Abnahme der $\delta^{18}O$-Werte jedes einzelnen Cherts während seiner Entwicklung von Opal-A zum Opal-CT und zum Quarz

- die exponentielle Abnahme der $\delta^{18}O$-Werte der Quarzcherts mit dem Alter, unabhängig von der jeweiligen Meerestemperatur (für das Phanerozoikum nachgewiesen)

Für den Verlust von $\delta^{18}O$ und damit Sauerstoff aus den Cherts kommt, meiner Meinung nach, aufgrund seiner geringen Größe nur Wasser H_2O in Frage. Durch Fraktionierung bei zunehmender Sedimenttemperatur mit zunehmender Tiefe (durchschnittlicher geothermischer Gradient 3 °C/100 m) wird bei den Kondensationsreaktionen zur Bildung der SiO_2-Gitter relativ mehr $\delta^{18}O$ als vorher freigesetzt. Das Wasser in den Hohlräumen der SiO_2-Gitter der Cherts kann dann auch noch in geringem Umfang mit Umgebungswasser (Meerwasser, Porenwasser, meteorischem Wasser), das in jedem Fall einen relativ niedrigen $\delta^{18}O$-Wert hat, austauschen, wodurch sich der $\delta^{18}O$-Wert der Cherts weiter erniedrigt.

Im Fall der schwäbischen und wohl auch bayerischen Hornsteine, die alle im Flachwasserbereich der Tethys ihren Anfang nahmen, deren Wasser sich in den einzelnen Buchten wohl nicht nennenswert in pH-Wert und Salzgehalt unterschied, die auch im Oberjura (Malm ε bis ζ) ähnlichen Temperaturen ausgesetzt waren, sollte man relativ ähnliche $\delta^{18}O$-Werte erwarten, was auch im „Borgerhau“ und in Wippingen, ja sogar in Arnhofen der Fall war. Die Abweichungen innerhalb der einzelnen Fundorte zeigen jedoch, dass jedes Chert in gewissem Umfang die eigene thermale Entwicklungsgeschichte wiedergibt. Entsprechend der Achatbildung bindet wohl ein reifender Hornstein alle Kieselsäure und kurzkettigen Polymere der Umgebung, die den Nachbarhornsteinen erst wieder zu einem späteren Zeitpunkt und unter anderen Temperaturverhältnissen zur Verfügung stehen (Landmesser 1994).
Die insgesamt deutlich niedrigeren $\delta^{18}O$-Werte in Wittlingen können nur durch einen höheren Temperaturgradienten vor Ort während der „Hornsteinreifung“ erklärt werden oder durch einen stärkeren Einfluss meteorischen Wassers.

5 Untersuchung von Hornstein mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse

Es handelt sich dabei um eine chemische Methode zur Untersuchung von Hornstein. Mit der **R**öntgen**f**luoreszenz-**A**nalyse (RFA) können chemische Elemente sowohl qualitativ als auch quantitativ bestimmt werden. Besonders in den Geowissenschaften gehört die Methode der RFA zu den anerkannten, analytischen Verfahren zur Bestimmung von Haupt- und Nebenelementen (Weber-Diefenbach 2000, 115).

Voraussetzung für die Entwicklung dieser Methode war die Entdeckung der X-Ray (Röntgenstrahlen) durch Röntgen (1895) und der Nachweis der Beziehungen zwischen Ordnungszahl der Elemente und Wellenlänge, die Moseley (1913) als erster erkannte. In den zwanziger und dreißiger Jahren des 20. Jh. spielte die Röntgenspektralanalyse zunächst nur eine wichtige Rolle bei der Arbeit am Periodensystem der Elemente in der Physik. Durch die Arbeiten von Harding (1922), Glocker & Schreiber (1925), vor allem aber von Hevesey et al. (1930, 1932) setzte sich die Erkenntnis durch, dass es sich bei der Röntgenspektrometrie um eine wichtige Methode auch für die analytische Chemie handelt. Jedoch erfolgte erst nach dem Zweiten Weltkrieg durch die schnelle technische Entwicklung der Durchbruch. Mit dem Siegeszug der Elektronik ab etwa 1970 kam dann ein zweiter Schub. Heute stehen technisch ausgereifte RFA-Systeme für Forschung und Routinebetrieb zur Verfügung (Weber-Diefenbach 2000, 115).

5.1 Prinzip der Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)

Mit Fluoreszenz bezeichnet man das Selbstleuchten mancher Stoffe im sichtbaren Bereich während der Bestrahlung (Mommsen 1986, 99; vgl. Hollemann & Wiberg 2007, 104). Zur Bestrahlung der zu untersuchenden Substanzen werden energiereiche Röntgenstrahlen mit Wellenlängen zwischen 0,01 und 11,3 nm verwendet (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 28). Die bestrahlten, angeregten Atome ihrerseits geben wiederum für sie typische Röntgenquanten ab, die gemessen werden. Obwohl Röntgenstrahlen für das menschliche Auge unsichtbar sind, wird der Begriff Fluoreszenz in erweiterter Bedeutung auch für die Emission von Röntgenstrahlen verwendet (Mommsen 1986, 99).
Bei der Bestrahlung mit energiereichen Röntgenstrahlen, können die Atome einer Probe zu ihrer charakteristischen Röntgenstrahlung (Röntgenfluoreszenz) angeregt werden. Dabei können Elektronen aus *inneren* „Schalen“ des Atoms, zum Beispiel der K-„Schale“, herausgeschlagen werden (Abb. 75), wenn die Energie der anregenden Strahlung größer ist als die Bindungsenergie des betroffenen Elektrons (Hahn-Weinheimer et al. 1995, 6 f. Abb. 2.2; 11). Die Bindungsenergie des Elektrons wird auch als Absorptionskante bezeichnet (Verma 2007, 9). Die entstehende Lücke wird in kurzer Zeit (vgl. $\leq 10^{-8}$ s Weber-Diefenbach 2000, 116; ~ 10^{-15} s Verma 2007, 2) durch energiereichere Elektronen aus Schalen mit höherer Hauptquantenzahl (äußere „Schalen“), zum Beispiel der L-„Schale“, wieder aufgefüllt (Weber-Diefenbach 2000, 116 f.). Die Energiedifferenz wird jeweils in Form eines Röntgenquants abgegeben (Fluoreszenzstrahlung).

Da das Energieniveau der Elektronen für jedes Atoms typisch ist und für alle Atome desselben Elementes charakteristisch, haben auch die nach Bestrahlung abgegebenen Röntgenpho-

tonen individuelle Energie, die für alle Atome desselben Elementes gleich sind, sich aber für Atome anderer Elemente unterscheiden.

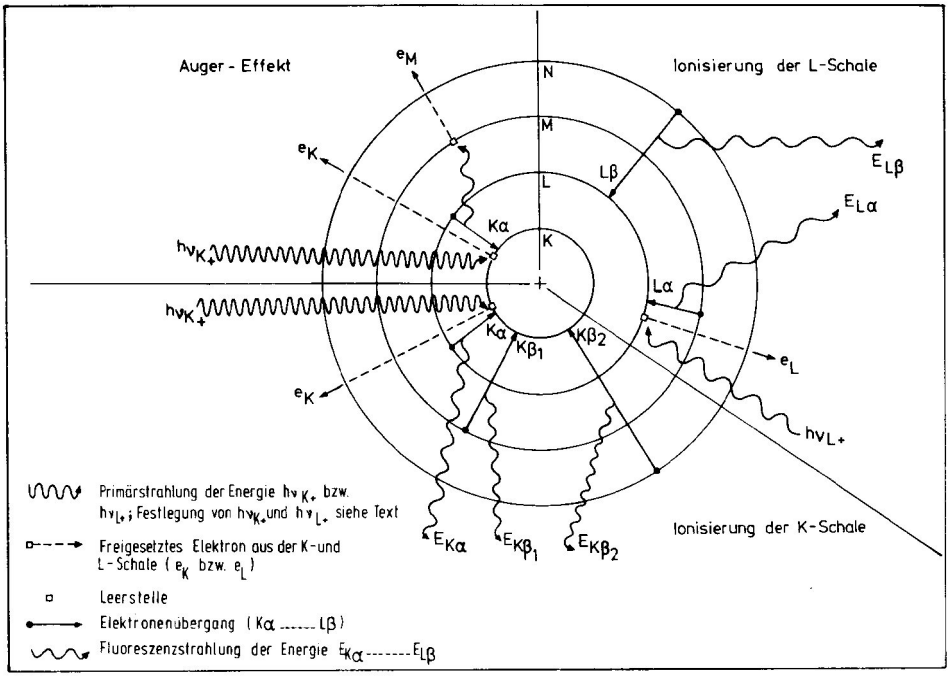
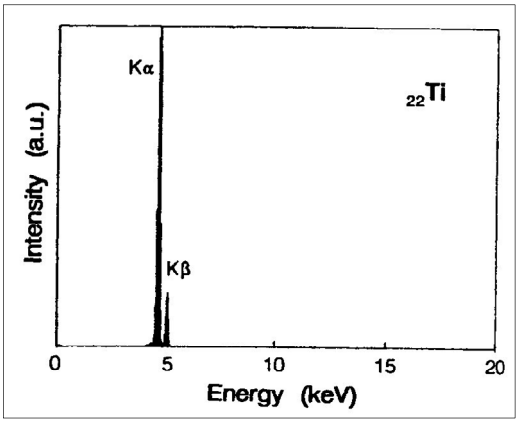


Abb. 75: Herausschlagen von Elektronen der innersten „Schale“, der „K-Schale“ (kleines Quadrat) eines Atoms durch kurzwellige Röntgenstrahlung ($h\upsilon_K$), links, (e_K) oder aus der „L-Schale“ durch längerwellige Röntgenstrahlung ($h\upsilon_L$), rechts, (e_L). Auf der „K-“ bzw. „L-Schale“ entsteht jeweils eine Elektronenlücke (kleines Quadrat), die durch energiereichere Elektronen weiter außen liegender „Schalen“ (schwarze Punkte) wieder aufgefüllt wird. Dabei wird die Energiedifferenz in Form von Röntgenstrahlung bestimmter Wellenlänge ($E_{K\alpha}$, $E_{K\beta1}$, $E_{K\beta2}$, Mitte unten, bzw. $E_{L\alpha}$, $E_{L\beta}$, rechts) freigesetzt. Die abgegebene Röntgenstrahlung kann aber auch ein Elektron einer weiter außen liegenden „Schale“ anregen, sodass dieses als Auger-Elektron das Atom verlässt, links oben (Hahn-Weinheimer et al. 1995, Abb. 2.2).

Deshalb verursachen diese Fluoreszenzphotonen in einem Röntgenspektrum für jedes Element, zum Beispiel für Titan und Blei (Abb. 76; 77), diskrete Linien oder Peaks als Intensitätsmaxima, so dass jedes chemische Element, vergleichbar einem Fingerabdruck, an seinen charakteristischen Linien oder Peaks identifiziert werden kann (Klockenkämper 1997, 7).



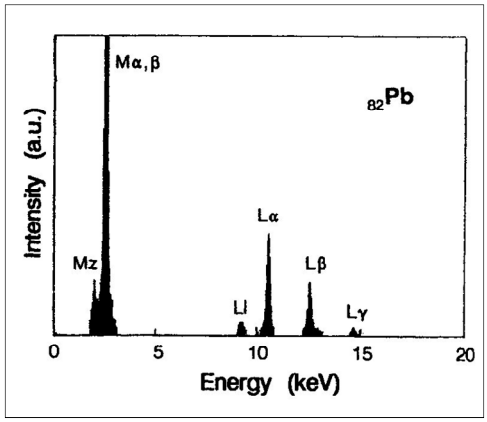


Abb. 76 & 77: Röntgenspektrum von Titan mit K-Linien (links) und Blei mit L- und M-Linien (rechts) (Klockenkämper 1997, Ausschnitt aus Abb. 1-4).

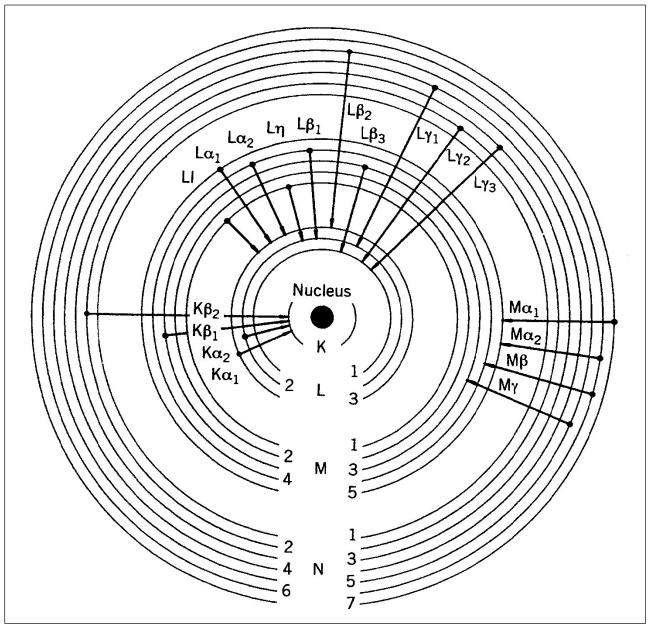


Abb. 78: Mögliche Elektronenübergänge, die grundsätzlich in schweren Atomen möglich sind und die die Hauptlinien oder Peaks im Röntgenspektrogramm hervorrufen (Klockenkämper 1997, Abb. 1-3).

Obgleich es nicht jedem Elektron erlaubt ist, Leerstellen auf inneren Schalen zu füllen, gibt es entsprechend der Regeln der Quantentheorie eine Reihe erlaubter Übergänge, deren wichtigste Abb. 78 zeigt. Die drei für die RFA bedeutendsten Serien werden nach der Elektronenlücke einer Hauptschale, aus der das herausgeschlagene Elektron stammt, mit K-, L- oder M-Serie bezeichnet.

Die intensivsten Peaks einer Serie heißen α (nach der gebräuchlichen Bezeichnung nach Siegbahn 1920), die nächsten weniger intensiven Peaks in absteigender Reihenfolge β, γ, η, und ι. Eine weitere Unterscheidung erfolgt durch arabische Zahlen als Index, wie $K\alpha_{2.}$ (Klockenkämper 1997, 7 f.)

Bei einer Anregung bis 40 keV liefert jedes Element, außer H und He, zwischen 2 und ca. 10 intensive Peaks, von denen vor allem die K- und L-Peaks der Röntgenspektra genutzt werden. Die Beziehung zwischen Peak oder Photonenenergie und Element wurde von H. G. J. Moseley 1913 entdeckt (Klockenkämper 1997, 9).

Nach dem Moseley'schen Gesetz gilt:

$$\lambda = k_1 / (Z-k_2)^2$$

λ = Wellenlänge der Fluoreszenzstrahlung
Z = Ordnungzahl des bestrahlten Elementes
k_1, k_2 = Konstanten, von den einzelnen Linien abhängig

Es zeigt auf, dass die Wellenlänge λ und damit die Energie der einzelnen Linie der Fluoreszenzstrahlung, sowohl für jedes chemische Element (Z) charakteristisch ist, als auch für den jeweiligen Elektronenübergang innerhalb der Elektronenhülle eines Elementes (Klockenkämper 1997, 5; Weber-Diefenbach 2000, 116).

$$E_{Photon} = \frac{h * c}{\lambda}$$

h = Planck'sche Konstante ($h = 4{,}1357*10^{-18}$ keV*s)
c = Lichtgeschwindigkeit ($c = 2{,}9979*10^{8\ m}$/s)

Das Moseley'sche Gesetz ist jedoch für die Berechnung der charakteristischen Fluoreszenzlinien nicht genau genug. In der Praxis werden heute Tabellen oder Computerprogramme verwendet (Klockenkämper 1997, 11).

Die Intensitätsverhältnisse variieren auch innerhalb der K- und L-Linien, sie betragen etwa für $K_{\alpha1} : K_{\alpha2} : K_{\beta1} = 100 : 50 : 25$; für $L_{\alpha1} : L_{\alpha2} : L_{\beta1} : L_{\beta2} : L_{\gamma1} = 100 : 10 : 50\text{-}100 : 10\text{-}20 : 5\text{-}10$ (vgl. Verma 2007, 9; Weber-Diefenbach 2000, 116). γ- und δ-Linien sind sehr schwach und deshalb in der Praxis kaum von Interesse (Dr. Haustein, Curt-Engelhorn-Zentrum, Mannheim, mündlich).

Die freiwerdende Energie kann aber, wie bereits oben festgestellt, nicht nur in Form eines Röntgenquants emittiert werden, sie kann auch Elektronen äußerer Schalen anregen und emittieren (Auger-Elektronen) (Abb. 75). Die Fluoreszenzausbeute ω gibt das Verhältnis der emittierten Röntgenquanten zur Anzahl der entstandenen Leerstellen wieder (Hahn-Weinheimer et al. 1995, 7 f.). ω kann annähernd definiert werden durch:

$$\omega = \frac{Z^4}{A + Z^4}$$

A = Konstante: für K-Serien ca. $9 * 10^5$,
für L-Serien ca. $7 * 10^7$,
für M-Serien ca. $1 * 10^9$

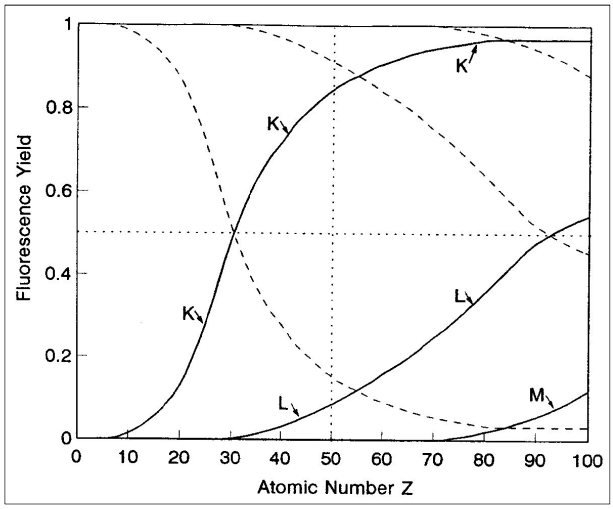


Abb. 79: Intensität der Fluoreszenzstrahlung (durchgezogene Linie) und Emission von Auger-Elektronen (gestrichelte Linie) (Klockenkämper 1997, Abb. 1-6).

Die Fluoreszenzausbeute hängt demnach von der Ordnungszahl Z des Elementes ab und der „Schale", in der die Elektronenlücke entstanden ist. Wie Abb. 79 zeigt, handelt es sich bei der Emission von Röntgenphotonen (durchgezogene Linien) und von Auger-Elektronen (gestrichelte Linien) um konkurrierende Prozesse, die sich fast zu 100 % aufsummieren. Die Abgabe von Auger-Elektronen überwiegt bei leichten Elementen, deshalb ist die RFA für Elemente mit der Ordnungszahl < 10 wenig effektiv, ω erreicht dagegen fast den Wert 1 für die K-Schale schwerer Elemente (z. B. Blei) (Klockenkämper 1997, 12).
Deshalb ist die RFA für geringe Konzentrationen leichter Elemente weniger genau.

Die Fluoreszenzstrahlung der Atome der Probe muss nach eventueller Trennung und Verstärkung durch einen Detektor bestimmt werden (Weber-Diefenbach 2000, 118-121).

Entsprechend dem Charakter der Röntgenstrahlen in Form von Wellen oder Teilchen als Träger definierter Energien werden **W**ellenlängen**d**ispersive RFA (WDRFA) und **E**nergie**d**ispersive RFA (EDRFA) unterschieden (Weber-Diefenbach 2000, 120 f. Abb. 3.3.7). Die WDRFA ist im Gegensatz zur EDRFA die deutlich genauere Methode, mit der vor allem auch quantitativ gearbeitet werden kann (Pollard et al. 2007, 104 f.). Da mit dem S4 PIONEER ein wellenlängendispersives Gerät zur Untersuchung der atomaren Zusammensetzung des Hornsteins

zur Verfügung stand, wird sich diese Arbeit im folgenden Punkt auf die WDRFA beschränken.

5.2 Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (WDRFA) als Methode

In der schematischen Abb. 80 sind die ersten drei der vier Komponenten des Röntgenfluoreszenzspektrometers ersichtlich: Anregung von Elektronen der Probe (Röntgengenerator mit -röhre), Linientrennung der Fluoreszenzstrahlung im Spektrometer (Kollimatoren, Analysatorkristalle), Messapparatur (Detektoren mit Messelektronik); dazu kommt noch die periphere Datenauswertung (EDV).

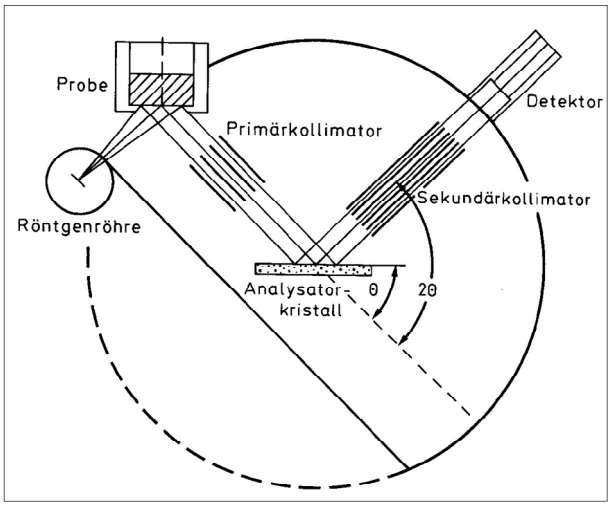


Abb. 80: Bauprinzip eines wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzspektometers (WDRFA) (Weber-Diefenbach 2000 Abb. 3.3.8).

5.2.1 Anregung der Probensubstanz

Die RFA-Schmelztablette (Abb. 92) gelangt mit einem Sauger in die Geräteeingabeposition, von dort in einem Probenbecher in die Vorvakuumkammer und anschließend in die Messposition (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 42; 47).

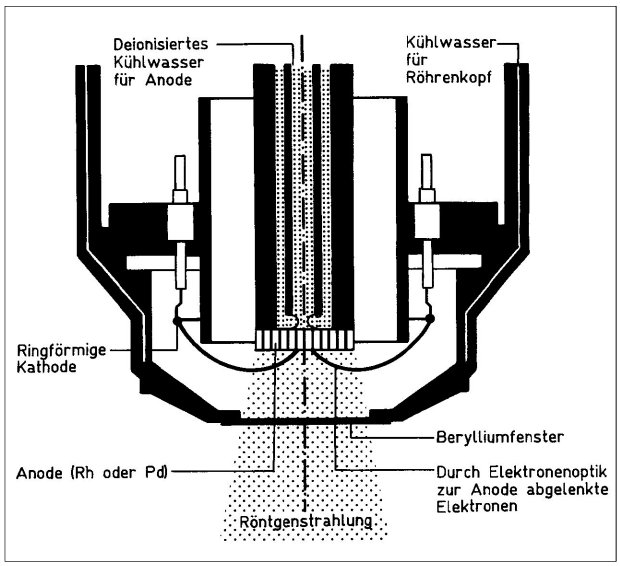


Abb. 81: Prinzip der Endfenster-Röntgenröhre (Weber-Diefenbach 2000, Abb. 3.3.9).

Als Strahlungsquelle dient im Allgemeinen eine Endfensterröhre (Abb. 81), so auch in dem verwendeten Gerät. Die Elektronen treten aus der beheizten ringförmigen Kathode, der Glühkathode, aus und werden in Richtung der elektrischen Feldlinien auf die Anode aus Rhodium hin beschleunigt und dort abgebremst. Um Stöße mit Gasmolekülen zu vermeiden, muss im Bereich der Elektronenbahnen ein Vakuum herrschen. Die Anode wird wegen der angelegten Hochspannung mit deionisiertem Wasser gekühlt.

Durch die von der Rhodium-Anode freigesetzte *Rh*-L-Strahlung werden die leichten Elemente *Be* bis *Cl* angeregt, durch die ebenfalls von der Rhodium-Anode freigesetzte *Rh*-K-Strahlung die Elemente bis *Mo* (*Ru*), die Elemente höherer Ordnungzahl als *Rh* durch die hochenergetische Bremsstrahlung (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 8; 43).
Der Generator für die Röntgenröhre liefert einen Röhrenstrom bis zu maximal 150 mA und eine maximale Hochspannung von 60 kV bei einer maximalen Leistung von 4 kW. 20 kV reichen für die Anregung der K-Strahlung der Elemente mit der Ordnungszahl $Z \leq 42$, für schwere Elemente sind 60 kV erforderlich (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 8 f.).
Die Röntgenstrahlung tritt durch ein dünnes Berylliumfenster aus und bestrahlt die zu untersuchende Probe (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 7). Zwischen Röntgenröhre und Probe ist ein Primärstrahlfilter mit einem Wechsler für 10 Positionen zwischengeschaltet, der unerwünschte bzw. störende Komponenten der Röhrenstrahlung ausfiltert und so auch das Signal-Untergrundverhältnis verbessert (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 42-46; Weber-Diefenbach 2000, 122).

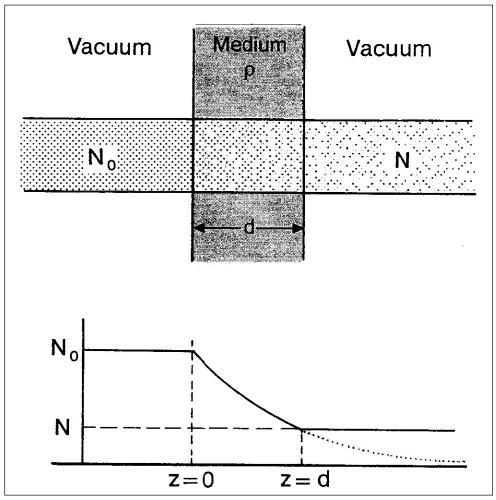


Abb. 82: Abnahme der Intensität der Röntgenstrahlung beim Durchdringen der zu untersuchenden (Hornstein-)Probe (Klockenkämper 1997, Abb. 1-9).

Röntgenabsorption durch das Probenmaterial:
Beim Durchdringen des Probenmaterials wird die Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von der Dichte p und Dicke d des Probenmaterials abgeschwächt, wie Abb. 82 zeigt; Röntgenstrahlung wird absorbiert. Die Intensität N_0 der einfallenden Strahlung aus der Röntgenröhre ist stets größer als die Intensität N der Strahlung der Probe, da einerseits Elektronen der Probe herausgeschlagen (Auger-Elektronen), andrerseits gestreut werden, wobei sich beide Vorgänge überlagern (Abb. 79) (Klockenkämper 1997, 16).

Den Zusammenhang zwischen N_0 und N nach Durchgang durch die Schichtdicke d der Probe beschreibt das Lambert-Beer'sche Gesetz:

$$N = N_0 e^{-\mu d}$$

N_0 = einfallende Strahlungsintensität
N = Intensität der Strahlung in der Probe
M = linearer Absorptionskoeffizient
D = Dicke der Probe

Das Lambert-Beer'sche Gesetz besagt, dass je größer die Schichtdicke d der Probe und je größer ihr linearer Absorptionskoeffizient μ ist, desto geringer fällt die Intensität der Strahlung der Probe aus. Der lineare Absorptionskoeffizient μ hat die Dimension [1/cm] und ist von der Energie bzw. Wellenlänge der eingestrahlten Röntgenquanten und der speziellen

Dichte p [in g/cm^3] des durchstrahlten Materials abhängig (Klockenkämper 2007, 16 f.; Weber-Diefenbach 2000, 117). Deshalb wird das zu untersuchende Material verdünnt, beispielweise Hornstein durch Schmelzmittel.

Je stärker die Strahlung eines Elementes im Probenmaterial absorbiert wird, desto kleiner ist die Schicht der Probe, aus der messbare Strahlung kommt. Dies hat zur Folge, dass bei der Analyse verschiedener Elemente in einer Probe de facto auch unterschiedliche Schichtdicken zur Messung beitragen. Die Analyse sehr leichter Elemente (wie *Be, B, C*) in Festkörpern ist praktisch einer reinen Oberflächenanalyse gleichzusetzen, da deren Strahlung aus einer Schicht von nur wenigen Atomlagen stammt. Für hochenergetische Strahlung schwerer Elemente sind leicht hohe Sättigungsdicken von 10 cm erreichbar, bei der z. B. 90 % der Strahlung absorbiert wird. Die Berechnung der zur Analyse beitragenden Schichtdicken in den definierten Proben ist heutzutage in moderne Softwarepakete integriert (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 12f.).

5.2.2 Dispersion der Fluoreszenzstrahlung im Spektrometer

Die Dispersion (Linientrennung) der Fluoreszenzstrahlung der Probe ist notwendig, um aus der Masse der Röntgenstrahlung elementtypische Linien herauszufiltern und um weitere unerwünschte Streustrahlung, wie einen Teil der Bremsstrahlung (Strahlungsuntergrund) zu unterdrücken (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 14). Das erledigt der Primärkollimator, der aus der Menge der von der Probe emittierten Strahlung mittels einer Reihe paralleler Lamellen ein paralleles Strahlenbündel aussondert (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 47f.) (Abb. 80).

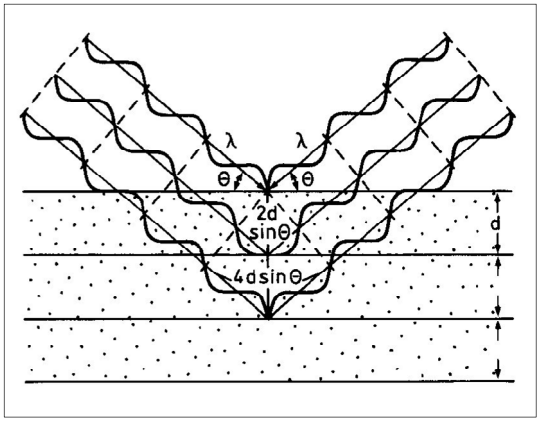


Abb. 83: Braggsche Reflexion von Röntgenstrahlen an den Netzebenen eines Analysatorkristalls (Weber-Diefenbach 2000, Abb. 3.3.3).

Dieses parallele Fluoreszenz-Strahlenbündel wird am Gitter eines Analysatorkristalls gebeugt, in dem es an jeder Netzebene des Gitters eine Reflexion um den Winkel θ erfährt (Abb. 83).

Nach der Bragg'schen Gleichung gilt:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

d = Abstand der Netzebenen
λ = Wellenlänge der Röntgenstrahllinie
θ = Winkel der zur Netzebene auftreffenden Strahlung
n = Reflexionsordnung (n = 1, 2, 3…)
(Weber-Diefenbach 2000, 118; Verma 2007, 19)

Bei größerer Wellenlänge der Fluoreszenzstrahlung zum Beispiel muss nach der Bragg'schen Gleichung bei gleichem Gitterabstand d auch sin θ größer werden. Dem sind aber Grenzen gesetzt, da sich der Winkel θ theoretisch nur zwischen 0° und 90° bewegen kann (gerätetech-

nisch zwischen 2° und 75°), sin θ hat dann Werte zwischen 0 und +1. Deshalb sind verschiedene Kristalltypen mit verschiedenen 2d-Werten nötig. Als Standardtypen stehen drei verschiedene LiF-Kristalltypen für Elemente ab den Ordnungszahlen Z = 19, Z = 23 und Z = 27 zur Verfügung. Multilayer (künstlich hergestellte Schichtanalysatoren) eignen sich für Elemente mit niedrigen Ordnungszahlen, zum Beispiel OVO-55 für *O* bis *Si*, zusätzlich gibt es Sonderkristalle (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 28). Dafür ist ein Kristallwechsler notwendig, der bis zu acht verschiedene Kristalle mit verschiedenen Abständen der Netzebenen d aufnehmen kann (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 49).
Die Trennung zweier benachbarter Linien oder sich überlagernder Linien ist umso besser, je größer die Dispersion ist. Unter Dispersion versteht man die Größe der Winkeländerung Δθ bei Änderung der Wellenlänge um Δλ ($\Delta\theta/\Delta\lambda$). Die bei der Beugung am Kristall vorliegende Winkeldispersion ergibt sich theoretisch aus der Differentiation der Bragg'schen Gleichung:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{n}{2d\cos\theta}$$

Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass sich die Dispersion und damit die Linientrennung mit abnehmendem Netzebenenabstand vergrößert. Ist die Beugung einer Röntgenstrahllinie an zwei verschiedenen Gittern möglich, so ist wegen zunehmender Trennschärfe das mit dem kleineren Gitterabstand d vorzuziehen (Hahn-Weinheimer et al. 1995, 20; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 29).

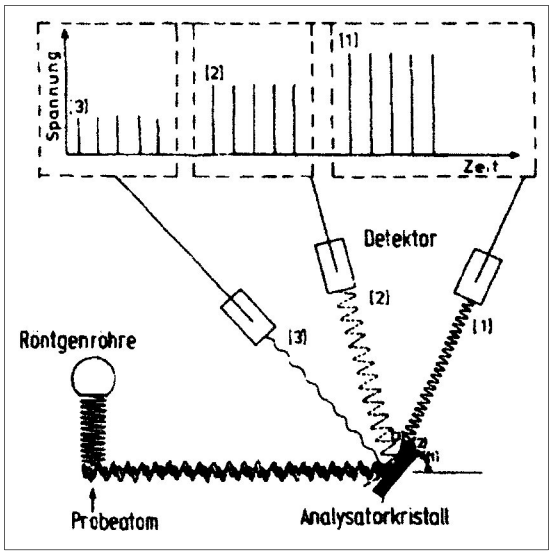


Abb. 84: Dispersion der Fluoreszenzstrahlung am Anlysatorkristall, ihre Trennung in Sekundärkollimatoren 1, 2, 3 und die Bestimmung ihrer Peaks durch den Detektor (verändert nach Hahn-Weinheimer et al. 1995 Abb. 2.10).

Die bei der Reflexion der Fluoreszenzstrahlung in ihre einzelnen Wellenlängen zerlegte Röntgenstrahlung passiert zur Parallelisierung je einen weiteren Kollimator, den Sekundärkollimator, der in einem bestimmten Winkel auf den Bragg-Kristall ausgerichtet ist und somit nur jeweils Strahlung einer Wellenlänge auf einen Detektor trifft (Abb. 80; 84) (Mommsen 1986, 102 f. Abb. 37; Hahn-Weinheimer et al. 1995, 19 f.). Ein Goniometer kann elektronisch gesteuert die Einstellung aufeinander folgender Winkelpositionen zwischen Röntgenquelle, Probe und Röntgendetektor übernehmen (Pollard et al. 2007, 105 f.; Verma 2007, 18) (Abb. 84).

5.2.3 Messung der Fluoreszenz mittels Detektoren

Als Detektoren werden der Proportionszähler PZ und der Szintillationszähler SC, einzeln oder hintereinander geschaltet, verwendet. Beide wandeln die Röntgenquanten in elektrische Impulse um (Weber-Diefenbach 2000, 122).

Der Proportionszähler = Gasproportionalzähler (Abb. 85) besteht aus einem zylindrischen Rohr, mit geeignetem Gas gefüllt, meist *Ar* (Argon) + 10 % CH_4 (Methan), das von einem dünnen Draht, dem Zähldraht, durchzogen wird. Die durch das Fenster eindringenden Röntgenquanten ionisieren die Gasatome und -moleküle. Entstandene positive Ionen wandern zur Kathode (Rohr), die Elektronen zur Anode, dem Zähldraht. Die Anzahl der entstandenen Elektron-Ionenpaare ist proportional zur Energie des Röntgenquants. Im Mittel müssen zur Erzeugung eines Elektron-Ionenpaares ca. 0,03 keV aufgebracht werden, sodass zum Beispiel die Strahlung des Elementes Bor mit 0,185 keV ca. 6 Paare und die K_α-Strahlung des Molybdäns mit 17,5 keV ca. 583 Paare erzeugt (Weber-Diefenbach 2000, 119; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 16 f.).

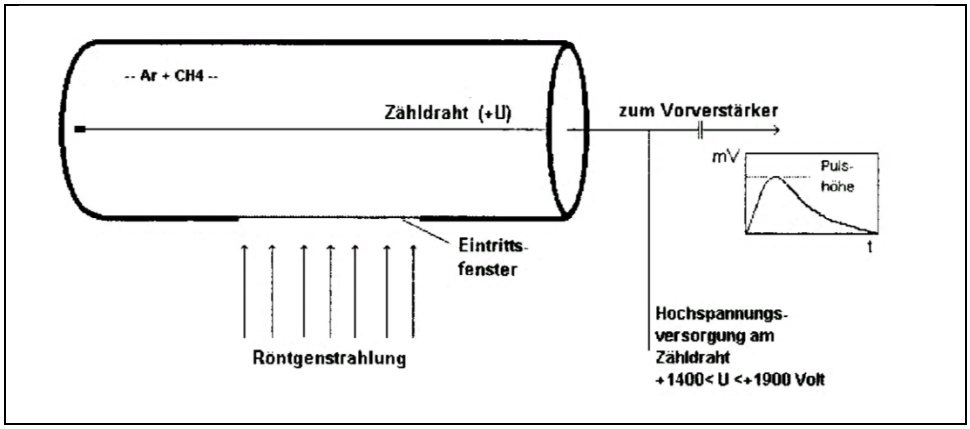


Abb. 85: Bau und Funktion des Proportionszählers (Schlotz & Uhlig 2000/2001 Abb. 8).

Die Elektronen sind auf ihrem Weg zum Zähldraht einem ansteigenden elektrischen Feld ausgesetzt; aufgrund der Hochspannung gewinnen sie genug Energie, um weitere Gasteilchen zu ionisieren. Ein einzelnes Elektron kann so bis zu 10 000 Sekundär-Elektron-Ionenpaare erzeugen. Ohne diese durch Stoßionisation entstandene Elektronenlawine wären Signale, zum Beispiel des Bors oder des Molybdäns, nicht messbar, sie würden sich vom elektronischen „Rauschen“ nicht signifikant abheben (sog. Gasverstärkung). Die Verstärkung ist über die Höhe der Hochspannung einstellbar; sie wird verständlicherweise zum Beispiel für die Messung von Bor etwas höher eingestellt als für die Messung von Molybdän (Weber-Diefenbach 2000, 119; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 16 f.).

Der Szintillationszähler (Abb. 86) besteht aus einem Szintillationskristall ① und einem Sekundärelektronen-Vervielfacher, dem Photo-Multiplier ③.

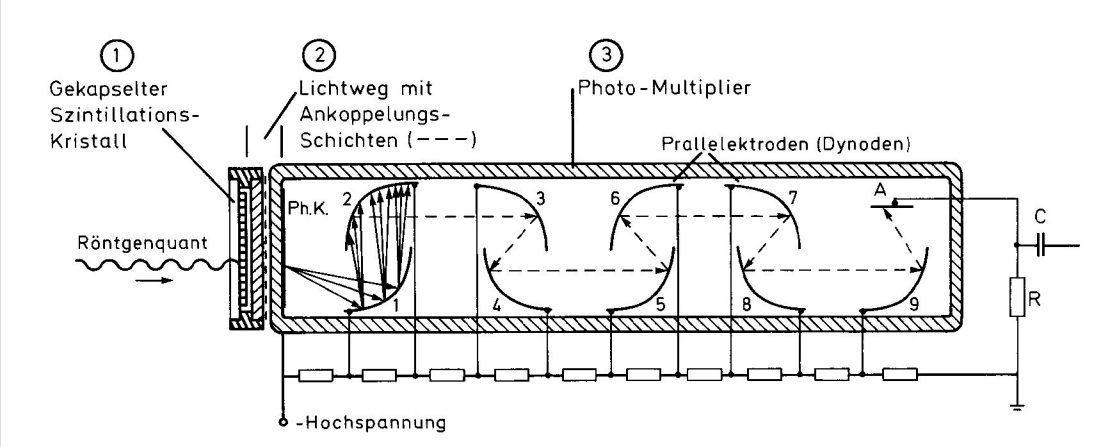


Abb. 86: Bau und Funktion eines Szintillationszählers (Weber-Diefenbach 2000 Abb. 3.3.5).

Die Energie der eindringenden Röntgenquanten wird schrittweise auf die Kristallatome des Thallium-dotierten Natriumiodid-Kristall *NaI*(*Tl*) übertragen ①, die ihrerseits Licht abstrahlen und in ihrer Gesamtheit einen Lichtblitz bilden (Abb. 86). Die Lichtmenge dieses Szintillationsblitzes ist zur Energie, die das Röntgenquant an den Kristall abgegeben hat, proportional. Das entstandene Licht trifft auf eine Photokathode, aus der sehr leicht Elektronen abzuspalten sind (Ph.K. 1). Diese Elektronen werden in einem Sekundärelektronen-Vervielfacher, dem Photo-Multiplier, beschleunigt (Ph.K. 2-9). Ihm liegt eine Hochspannung von 600 bis 1.000 V an, die von einer Widerstandskette unterteilt wird. Über diesen Widerstandsteiler werden die Dynoden 1-9 (Ph.K. 1-9) so mit Spannung versorgt, dass sich die von Dynode zu Dynode wandernden Sekundärelektronen in einem ständigen Potentialgefälle befinden. Da jedes einfallende Elektron aus der Dynode zwei bis vier Sekundärelektronen herausschlägt, erzeugt diese Anordnung von Dynoden Sekundärelektronen, die am Ende, zu einer Lawine angewachsen, am Kondensator C ein messbares ca. 10^6-fach verstärktes Signal liefern. Die Höhe des erzeugten Spannungsimpulses ist, wie im Falle des Gasproportionalzählers, zur Energie des detektierten Röntgenquants proportional (Hahn-Weinheimer et al. 1995, 25; Weber-Diefenbach 2000, 119f.; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 17).

Proportionszähler werden für den langwelligen Bereich (*Be* K_α - *Ti* K_α) sowie für die L-Linien der schweren Elemente eingesetzt, Szintillationszählrohre für kurzwellige Strahlung ab *Cr* K_α. Im Übergangsbereich *Ti* bis *As* empfiehlt sich der „Tandembetrieb“ (Vgl. Weber-Diefenbach 2000, 122; 128; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 49 f.).

5.2.4 Periphere Datenauswertung

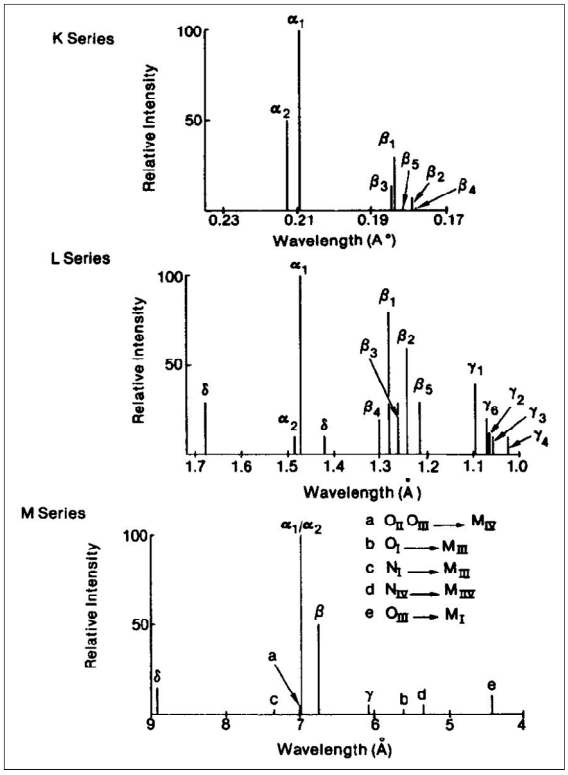


Abb. 87: Hauptlinien der K-, L-, und M-Serien für Wolfram (Jenkins 1988, Abb. 8-3).

Die in den Detektoren durch Röntgenstrahlung erzeugten und bereits verstärkten Impulse werden in einer nachfolgenden Elektronik verarbeitet und gezählt (Schlotz & Uhlig 2000/2001, 51).

Damit die Fluoreszenz-Hauptlinien der K-, L- und M-Serien sicher einzelnen Elementen zugeordnet werden können, muss ihre relative Intensität in Bezug auf die jeweils stärkste Linie, die α_1 (bzw. α_1/α_2) = 100 % bezogen werden, wie Abb. 87 für Wolfram zeigt. Das erledigt der Hauptverstärker, ein Sinusverstärker. Er macht den Verstärkungsfaktor V des Hauptverstärkers für den jeweiligen Bragg-Kristall (2d-Wert) und die gewählte Reflexionsordnung (n) vom Sinus des Einfallswinkels abhängig: V ~ sin θ. Damit erscheint die jeweils eingestellte Linie eines Elementes im Impulshöhenspektrum immer mit gleicher Impulshöhe an derselben Stelle (Jenkins 1988, 121-123; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 51).

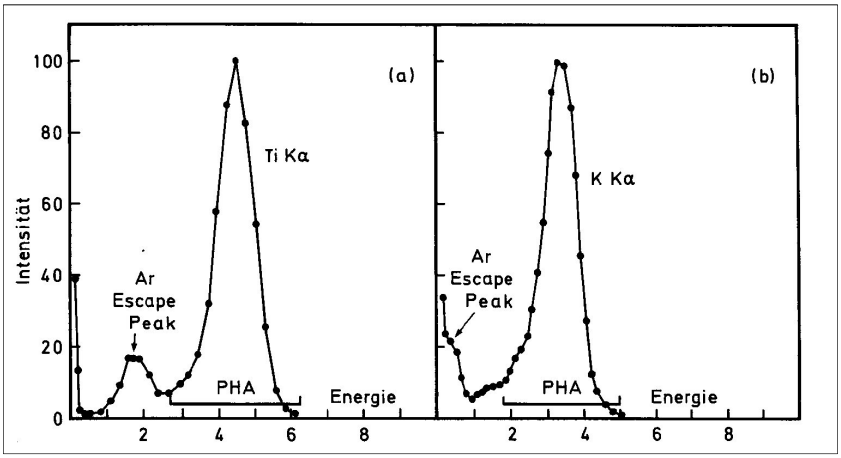


Abb. 88: Titan Kα-Peak und Kalium Kα-Peak als Beispiel für Impulshöhenanalyse (Pulse Height Analysis PHA) bei der WDRFA (Weber-Diefenbach 2000, Abb. 3.3.12).

Um Störsignale zu unterdrücken, zum Beispiel niederenergetisches Rauschen von Detektoren und Elektronik, Escape-Peaks oder Linien 2. Ordnung, werden die „Nutzsignale“ einzelner Elemente durch die Impulshöhenanalyse (PHA = Pulse High Analysis) gekennzeichnet (Abb. 88 für Titan Kα und Kalium Kα). Der möglichst symmetrisch erfasste Impulshöhenpeak und sein nahezu vollständig erfasster Flächeninhalt sollen innerhalb eines Fensters, des Diskriminatorfensters, liegen, dessen unterer und oberer Schwellenwert die Fensterbreite be-

stimmen. Ein Richtwert für die Fensterbreite ist der 2,5-fache Wert der Halbwertbreite der Impulshöhenverteilung der „Nutzwerte“. Nur die Impulshöhen gelangen zur Zählung, die innerhalb dieser Schwellen liegen. Besonders in den Vielstoffanalysen geologischer Proben ist eine sorgsame Einstellung zwischen unterem und oberem Schwellenwert des Diskriminatorfensters für jede einzelne Elementlinie von großer Bedeutung (Hahn-Weinheimer et al. 1995, 37; Weber-Diefenbach 2000, 128; Schlotz & Uhlig 2000/2001, 51).

Aufgrund der zahlreichen Elemente in geologischen Proben kommt es zum gleichzeitigen Auftreten verschiedener sich überlappender Linien, zu Linienkoinzidenzen, die beachtet und eliminiert werden müssen. Weber-Diefenbach (2000, 128 f.) fasst die Linieninterferenzen folgendermaßen zusammen:

- „Überlappung der verschiedenen Ordnungen der Röntgenlinien und der Comptonstrahlung“ (*Rh*-Quanten der Rhodiumröhre)
- „Überlappung und teilweise direkte Überlagerung der ersten Ordnung von K-, L- und M-Linien der Probenstrahlung“
- „Koinzidenzen der zweiten und dritten Ordnungen von Linien der Hauptelemente einer Probe mit Linien von Spurenelementen“
- „Interferenzen von Linien „schwerer Absorber“ (z. B. La_2O_3) mit Elementlinien der Probe“

In Rechnern moderner RFA-Geräte sind detaillierte Bibliotheken aller theoretisch möglichen Störlinien gespeichert (Weber-Diefenbach 2000, 129).

Besonders bei hohen Messraten wirken sich zusätzlich die Totzeiten des Detektors und der Messelektronik auf das Messergebnis aus. Die Totzeit ist die Zeit, die Detektor und Messelektronik benötigen, um nach Erfassen eines Ereignisses wieder zum Ausgangspunkt zurück zu kehren. Die Totzeit geht somit der Realzeit verloren und muss deshalb von der Messelektronik korrigiert werden (Hahn-Weinheimer et al. 1995, 21; 38; Weber-Diefenbach 2000, 128).

5.3 Bestimmung der elementaren Zusammensetzung des Hornsteins mittels WDRFA

Die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung des Hornsteins mittels WDRFA umfasst das Mahlen von Hornstein, die Verdünnung des Hornsteinpulvers mit Dilithiumtetraborat und Lithiummetaborat, die Herstellung von Schmelztabletten und danach die quantitative Hornsteinanalyse mittels WDRFA.

5.3.1 Vorbereitungen für die WDRFA

- Aussägen von 20 g (mindestens 2,5 g) aus dem Inneren jedes Hornsteins überwiegend mit der Schleifsäge vom Typ Norton Clipper in ca. 25 min. bis 4 Stunden (Abb. 89); kleinere Proben, wie Borg. 1, Borg. 3, Wipp. 2, Witt. 1, Arnh. 1, Arnh. 2, mit einer kleinen, in der Werkstatt der Geologie im Lothar-Meyer Bau (Universität Tübingen) hergestellten, Säge aus den Jahren 1990-1992.



Abb. 89: Große Gesteinssäge der Firma Norton Clipper.





Abb. 90: Schleifmühle der Firma Siebtechnik oben, unten dazu gehöriges Mahlgefäß aus Wolframcarbid.

- Zerkleinern mit dem Backenbrecher und anschließend Pulverisieren von je 20 g Hornstein in der Schleifmühle der Firma Siebtechnik in einem Mahlgefäß aus Wolframcarbid in jeweils 3 min. (Abb. 90)
- Trocknen bei 105 °C: 24 Stunden
- Einwiegen von 7,5 ± 0,0002 g Spectromelt A12 (Dilithiumtetraborat $Li_2B_4O_{10}$ *10 H_2O und Lithiummetaborat $LiBO_2$ (66:34) der Fa. Merck als Schmelzmittel und 1,5 g Hornsteinpulver ± 0,0002 g. Das Verdünnungsverhältnis 1:5 eignet sich besonders für die gleichzeitige Analyse von mengenmäßigen Haupt- und Spurenelementen (Weber-Diefenbach 2000, 126)
- Herstellung der RFA-Tabletten mit dem OmniFluxsystem der Firma CBR Analyse Service (Abb. 91):
  Gesteinspulver und Schmelzmittel locker mischen und in Tiegel aus einer Gold-Platinlegierung geben,
  - dreimal je 9 min. bei ansteigender Temperatur von 400 °C bis 700 °C offen erhitzen,
  - zugedeckt 9 min. bei ca. 1.000 °C erhitzen, nach 3 min. eine Spatelspitze Ammoniumfluorid (NH_4F) zugeben, nach weiteren 3 min. Blasen durch Schräghalten des Tiegels entfernen,
  - zugedeckt 9 weitere Minuten auf ca. 1.150 °C erhitzen,
  - in vorgeheizte Pt-Abgießschale gießen und langsam abkühlen lassen,
  - Schmelztabletten herausstürzen und beschriften (Abb. 92).



Abb. 91: OmniFluxsystem zur Herstellung der RFA-Tabletten von links nach rechts bei ansteigenden Temperaturen.

- Glühverluste LOI (**L**oss **O**n **I**gnition) bestimmen, da beim Erhitzen des Hornsteinpulvers vor allem Wasser und Kohlenstoffdioxid (aus Carbonat) entweichen, die bei der Elementaranalyse fehlen:
    - Porzellantiegel wiegen, 1 g Gesteinspulver zugeben und wieder wiegen,
    - 1 Stunde im Ofen bei 1.050 °C erhitzen,
    - herausnehmen und im Exsikkator zum Abkühlen stehen lassen,
    - wieder wiegen,
    - Glühverlust LOI berechnen und in (%) angeben.



Abb. 92: Fertige RFA-Tablette zum Abkühlen auf dem Graphituntersatz.

5.3.2 Quantitative Bestimmung mit dem S4 PIONEER



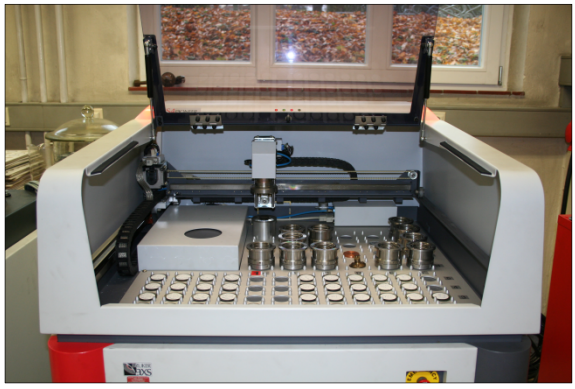


Abb. 93 & 94: Bruker AXS S4 PIONIER (Rh-Röhre mit 4 kW Anregung) für die Wellenlängen-dispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (WDRFA) mit 32 standardisierten Proben.

links Abb. 93: Gerät insgesamt.
oben Abb. 94: Im Gerät oben bei geöffnetem Deckel: Eingabevorrichtung für RFA-Tabletten.

Grundsätzlich gilt für die RFA, dass die Intensität der Fluoreszenzstrahlung proportional zur Konzentration der Probenelemente ist. Diese kann nicht direkt gemessen werden, sondern ihre Intensität muss mit Referenzkurven verglichen und rechnerisch korrigiert werden. Als Referenzkurve wurden internationale Gestein-Standards verwendet. Diese sind in Govindarau (1989) zusammengestellt. Die Standards sollen, nach dem Prinzip des „nahen" Standards, den Konzentrationsbereich der zu messenden Elemente vollständig überdecken und in der Matrix den Untersuchungsproben weitgehend ähnlich sein (Weber-Diefenbach 2000, 131).

Es wurden zwei Messungen durchgeführt.
Die erste Messung war eine Vollanalyse für die Elementoxide von *Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P*; sie war gekoppelt mit einer Spurenelementanalyse von *Ba, Co, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Y, Zn, Zr, Ce, Eu, La, Nb, Nd, Sm* und *Yb*. Da die Referenzkurve auf maximal 80 % SiO_2 geeicht ist, Hornstein aber ca. 98 % SiO_2 enthält, erfolgte eine weitere Vollanalyse mit dem geräteeigenen Standard, einem sog. standardlosen Programm. Unter Berücksichtigung der verwendeten Standards wurden die optimalen Messparameter festgelegt. Mit der Multi-Res-Vac34-Messung wurde dann die genaue Menge an SiO_2 bestimmt (Dr. H. Taubald, Isotopengeochemie, Universität Tübingen, mündlich).
Die Ergebnisse wurden auf der Festplatte gespeichert und konnten als Kurven und Tabelle aus der EDV abgerufen werden (Abb. 95).

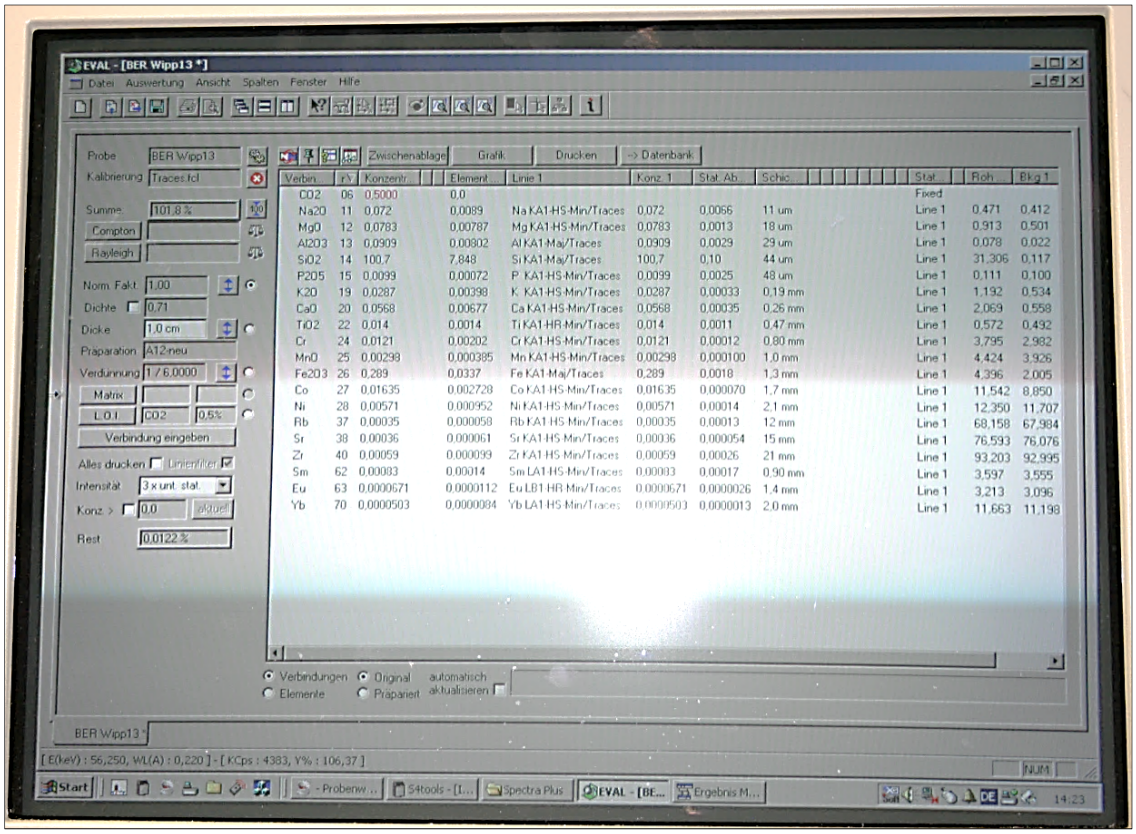


Abb. 95: Digitale Anzeige der Messwerte: Konzentr: Konzentrationen in %; Element: Elementkonzentration in der Verdünnung mit Spectromelt; Linie 1: zur Messung verwendete Fluoreszenzwellenlängen der RFA; Konz. 1: Messergebnis der Linie 1 in %; Stat Ab: Statistische Abweichung 3σ; Schic: Fluoreszenz aus der angegebenen Schichtdicke; Stat: für diese Messung festgelegtes Programm Linie 1.

5.4 Auswahl verwendbarer WDRFA-Daten

Eine erste Testuntersuchung lief mit 34 Haupt- und Spurenelementen in 25 Jurahornsteinproben aus vier schwäbischen und bayerischen Fundstellen. Endgültig wurden 75 Hornsteine, davon 65 aus den vier schwäbischen und bayerischen Fundplätzen und fünf Chertproben aus Ungarn auf je 27 chemische Elemente und auf LOI untersucht, zusätzlich fünf Artefakte aus der jungsteinzeitlichen Siedlung Grund auf der Schwäbischen Alb. Die tabellarischen Ergebnisse der WDRFA befinden sich im Anhang D1 (D1.1-D1.5).

Die statistischen Abweichungen 3σ vom Mittelwert der Mehrfachmessungen der WDRFA-Werte je Elementoxid/Element und Hornstein sind unterschiedlich hoch, sie liegen zwischen 0,1 % und 50,0 % des mittleren Messwertes. Die Messwertabweichungen zeigen, dass im Hornstein, einem natürlichen Material, die chemischen Elemente keineswegs gleichmäßig verteilt sein müssen. Besonders stark erscheinen diese Abweichungen vor allem bei sehr niedrigen Elementkonzentrationen, da dort bereits wenige ungleich verteilte Elementoxide oder Elemente eine starke Wirkung auf die Messung der Elementkonzentration haben. Im Gegensatz zum üblichen standardisierten Verfahren wurden in diesem Fall die mittleren Messwertabweichungen aller Elemente jeder Hornsteinprobe einzeln von der Messelektronik abgelesen.

Aus den Tabellen der Messwertmittelwerte der WDRFA der Fundorte Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen, Wittlingen, Sonderbuch und der ungarischen Cherts (und ihren 3σ Standardabweichungen) im Anhang D1 ergibt sich, dass Hornstein durchschnittlich zu ca. 98 % aus SiO_2 besteht. Die Konzentration an Siliciumdioxid SiO_2 dient unter anderem auch der Kalibration der Messreihen. Dieser Mittelwert kann sich bei jeder der erfolgten fünf Messreihen leicht verändern. Aufgrund der sehr geringen Mengen der übrigen Elementoxide und Elemente wirken sich jedoch diese Unterschiede durch die Kalibration mit SiO_2 auf die übrigen Messwerte kaum aus und sind vernachlässigbar (Dr. H. Taubald, Isotopengeochemie, Universität Tübingen, mündlich).

Für vier Spurenelemente: Niob *Nb*, Cer *Ce*, Yttrium *Y* und Zink *Zn* lagen die Konzentrationen für fast alle Hornsteine an allen fünf Fundorten zu 97,3-100 % jeweils unterhalb der Nachweisgrenze. Sie wurden deshalb von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Das Gleiche geschah mit den Spurenelementen Zirkonium *Zr*, Lanthan *La* und Neodym *Nd*. Sie lagen an der Nachweisgrenze. Letzteres zeigte sich darin, dass zwischen 23 % und 70 % der Elementkonzentrationen so gering waren, dass sie nicht mehr gemessen werden konnten. Bei den Hauptelementen konnten die Konzentrationen von Manganoxid *MnO* im Bereich von 10 bis 60 ppm zwar noch gemessen werden, aber nur noch in 10 ppm-Stufen, also weniger genau. *MnO* bleibt in der weiteren Analyse erhalten; die Ungenauigkeit der Messung muss jedoch beobachtet werden.

So bleiben für die weiteren Untersuchungen, außer Siliciumdioxid SiO_2, noch neun weitere mengenmäßige Hauptelementoxide: Titanoxid TiO_2, Aluminiumoxid Al_2O_3, Eisen(III)oxid Fe_2O_3, Mangan(II)oxid *MnO*, Magnesiumoxid *MgO*, Calciumoxid *CaO*, Natriumoxid Na_2O, Kaliumoxid K_2O, Phosphorpentoxid P_2O_5; ferner *LOI* (**L**oss **O**n **I**gnition, Glühverlust) (vor allem Carbonat CO_3^{2-}, ferner u. a. S^{2-} aus Sulfid, Fluorid F^-); und neun Spurenelemente: Barium *Ba*, Chrom *Cr*, Nickel *Ni*, Rubidium *Rb*, Strontium *Sr*, Vanadium *V*, Europium *Eu*, Samarium *Sm* und Ytterbium *Yb*; insgesamt also 18 chemische Elemente und Elementoxide, zusätzlich *LOI*. Ca. 1,3 % der Gesamtkonzentrationen entfallen jeweils auf die in der Analyse befindlichen Oxide der Hauptelemente (außer SiO_2) und den Glühverlust *LOI*, auf die neun verbliebenen Spurenelemente gerade einmal insgesamt ca. 0,04 % der Gesamtkonzentrationen.

Kobalt *Co* fehlt unter den zu verwendenden Analyseelementen. Die WDRFA-Daten liefern dafür stark überhöhte Konzentrationen gegenüber den normalerweise in der Natur vorkommenden Werten (Hollemann & Wiberg 2007, 78). Diese müssen durch das Mahlen der Hornsteine in der Wolframcarbidmühle entstanden sein. Wolframcarbid *WC* enthält als Beimengung *Co*, *Ti*, *Nb*, *Ta* und *Fe*, wobei die relative Konzentration an *Co* unter den Beimengungen im Wolframcarbid am höchsten und die Kontamination durch *Co* beim Mahlen am stärksten ist (Auskunft der Firma Siebtechnik)[15].

[15] Nach Mitteilung der Firma SIEBTECHNIK per e-Mail vom 24.01.2012 hat das Wolframcarbid-Mahlgefäß folgende Analysedaten: 90% *WC*, 9% *Co*, 0,5% *Ti*, Spuren von *Nb, Ta, Fe.*

Titan wurde dagegen in der Analyse belassen, da seine WDRFA-Werte und die Standardabweichungen vom Mittelwert nicht auffällig waren und da TiO_2 nicht durch hohe Korrelation mit *Co* auffällt (Binäres Diagramm *Co* vs. TiO_2 im Anhang B5)[16].

Die Hornsteine wurden je nach Größe mit zwei verschieden großen Stahlsägen gesägt und mit dem stählernen Backenbrecher zerkleinert. Nur die jeweiligen Randbereiche der zerkleinerten Hornsteine kamen damit in Berührung. Auch wegen der starken Verdünnung im Pulver können die WDRFA-Werte von Fe_2O_3, *Cr*, *Ni* und *V* wohl nur geringfügig erhöht sein. Wenn dem so wäre, müsste eine hohe Korrelation zwischen den vier Metallen festzustellen sein (vgl. Statistische Untersuchungen der WDRFA-Daten in Kapitel 6.6).

5.5 Trennung von Hornsteinfundorten durch binäre Diagramme

Eine graphische Trennung durch binäre Diagramme kann nur dann erfolgen, wenn sich die Streuungen der Messwerte zweier Variablen (Elementoxide, LOI, Elemente) verschiedener Fundorte, um ihre Mittelwerte nicht überlappen.

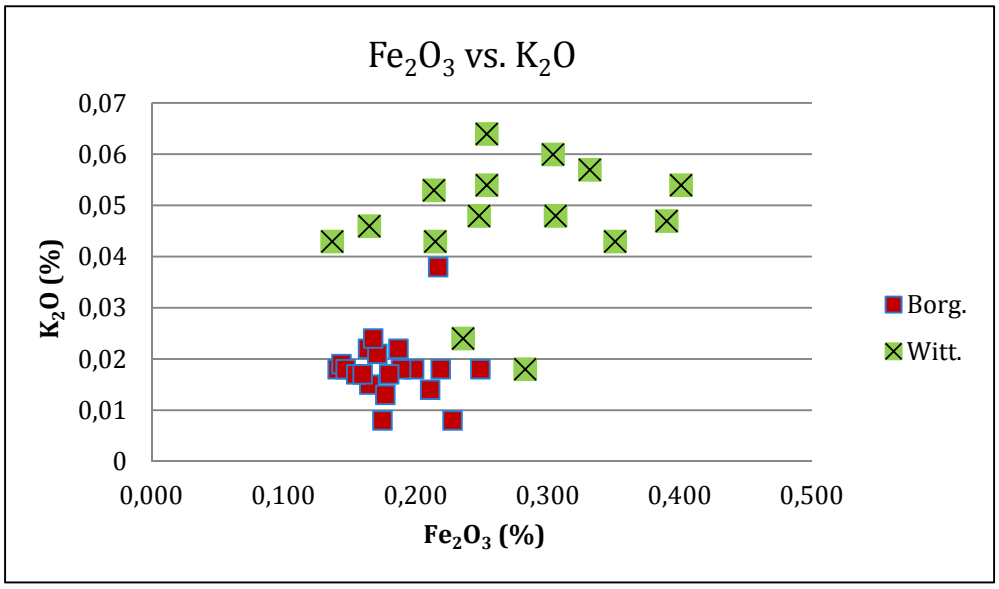


Abb. 96: Trennung von „Borgerhau“ und Wittlingen durch K_2O und Fe_3O_3.

Die Konzentrationen an Fe_2O_3 liegen im „Borgerhau“ zwischen 0,141 % und 0,249 %, in Wittlingen streuen sie zwischen 0,137 % und 0,401 %. Das K_2O kommt im Wesentlichen im „Borgerhau“ in Konzentrationen zwischen 0,008 % und 0,024 %, in Wittlingen zwischen 0,043 % und 0,064 % vor. Beim K_2O-Gehalt beider Fundorte gibt es einen Extremwert: Borg. 10 mit 0,038 % und zwei Ausreißerwerte: Witt. 8 mit 0,018 % und Witt. 14 mit 0,024 %. „Borgerhau“ und Wittlingen lassen sich mittels der beiden Elementoxide Fe_2O_3 und

[16] Auch die Konzentration an TiO_2 könnte durch Kontamination mit der Gesteinsmühle geringfügig erhöht sein. Während im Durchschnitt geschätzte 100 ppm *Co* aus der Gesteinsmühle die *Co*-Konzentrationen der Hornsteine erhöhen (den geschätzten durchschnittlichen ursprünglichen Mittelwert von ca. 120 ppm fast verdoppeln), dürften das bei Titan nur durchschnittlich 1/18 davon sein, beim TiO_2 1/11 = 9,1 ppm, was sich bei den in Prozent angegebenen Konzentrationen an TiO_2 durchschnittlich an der vierten Stelle hinter dem Komma, also im Rundungsbereich auswirken würde.

K_2O im Streudiagramm recht gut trennen (Abb. 96). Drei von 35 Hornsteinen lassen sich wegen der Extrem- und Ausreißerwerte der K_2O-Konzentrationen nicht „richtig“ zuordnen.

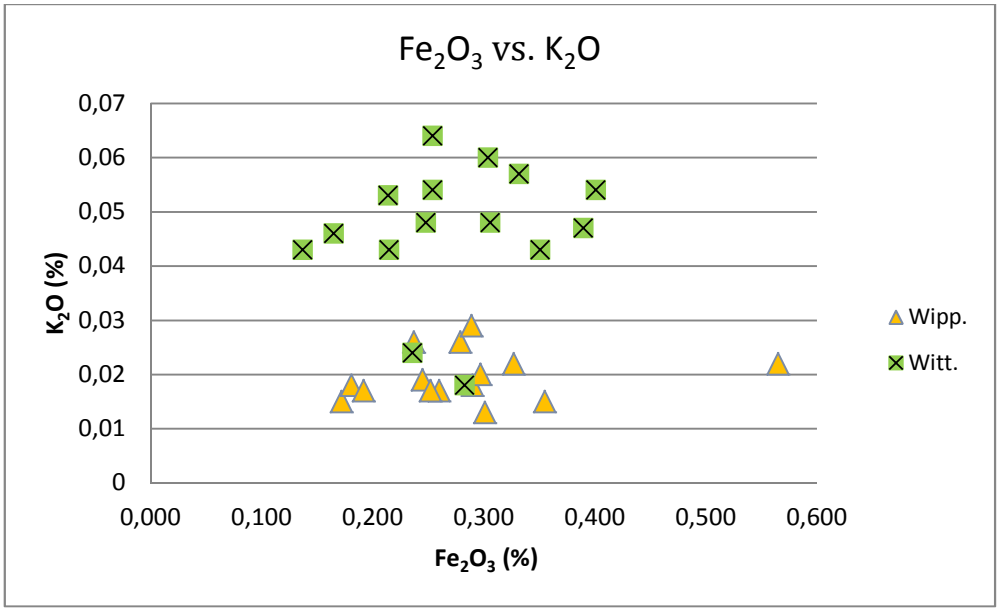


Abb. 97: Trennung von Wippingen und Wittlingen durch K_2O und Fe_3O_3.

In Wippingen liegen fast alle Konzentrationen von Fe_3O_3 zwischen 0,172 % und 0,355 % außer der von Wipp. 9 mit 0,565 %, einem Extremwert. Ähnlich wie im „Borgerhau“ sind die K_2O-Werte in Wippingen zwischen 0,013 % und 0,029 % und niedriger als in Wittlingen. Ähnlich gut wie zwischen „Borgerhau“ und Wittlingen gelingt die Trennung von Wittlingen und Wippingen mit denselben Elementoxiden im binären Diagramm (Abb. 97). Die Ausreißerwerte von Witt. 8 und Witt. 14 streuen zwischen den Messwerten aus Wippingen.

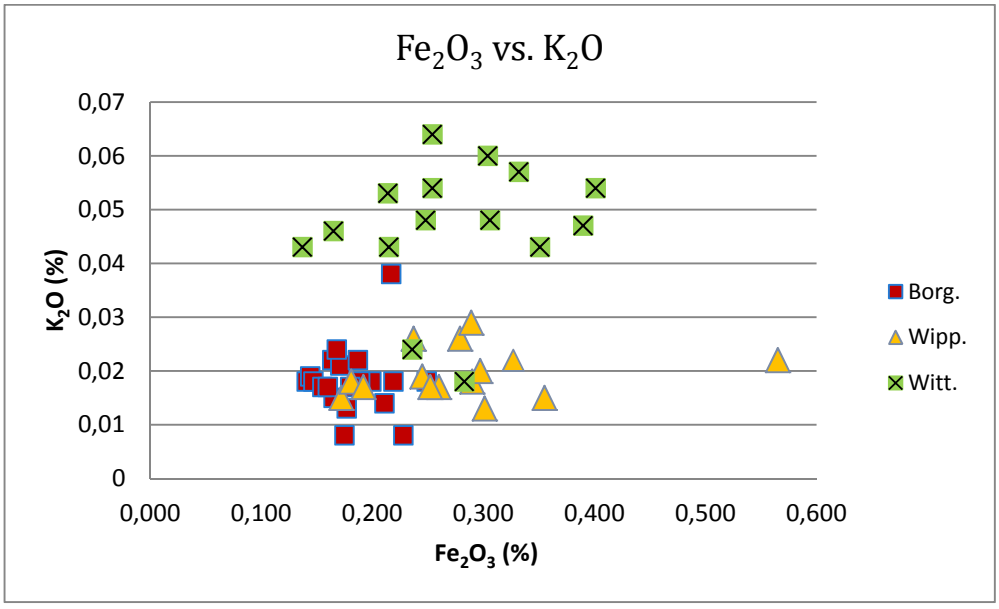


Abb. 98: Versuch einer binären Trennung der Fundorte „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen mittels Fe_2O_3 und K_2O.

Da die K_2O-Konzentrationen von „Borgerhau“ und Wippingen in einem ähnlichen Bereich liegen und sich auch die Fe_3O_3-Werte teilweise überlagern, lassen sich die nah zueinander ge-

legenen Fundorte „Borgerhau“ und Wippingen im binären Diagramm nur unscharf trennen (Abb. 98).
In ähnlicher Weise wie K_2O gegen Fe_2O_3 trennen K_2O gegen *CaO*, *Ni* und sogar *MgO* oder *Cr* Wittlingen von „Borgerhau“ (Anhang B1) und Wittlingen von Wippingen (Anhang B2).
Wie oben bereits gesehen, sind die nahe zueinander gelegenen Fundorte „Borgerhau“ und Wippingen schwierig zu trennen, am besten noch mit *Ni* gegen *LOI* (Abb. 99), *Ni* gegen Fe_2O_3 oder *CaO* (Anhang B3).

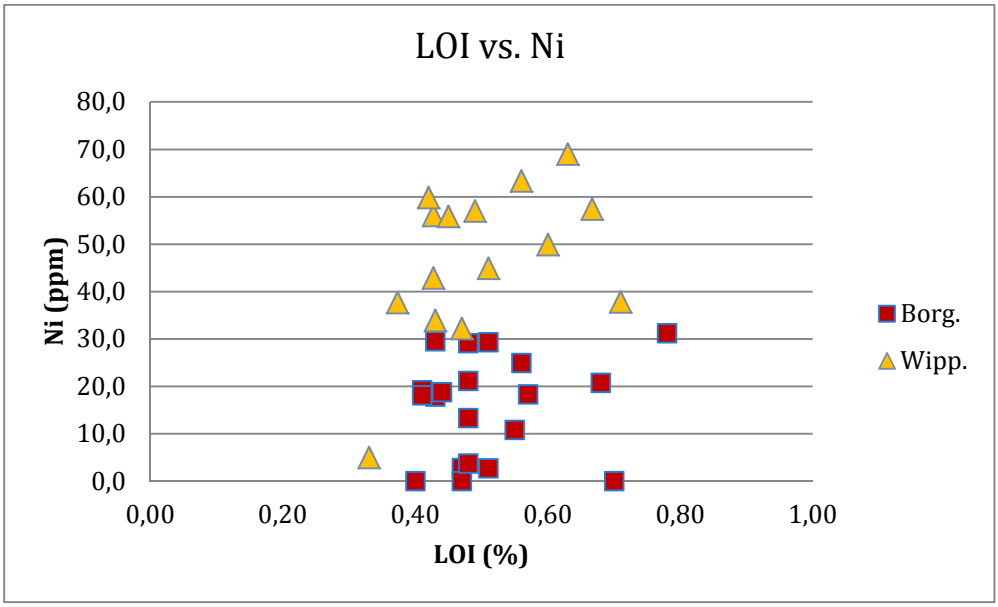


Abb. 99: Trennung der Hornsteine aus Arnhofen von denen aus dem „Borgerhau“ und Wippingen durch LOI und Ni.

Die Konzentration an *Ni* liegt im „Borgerhau“ zwischen nicht messbar und 31,2 ppm, in Wippingen fast ausschließlich zwischen 32,2 ppm und 69,0 ppm. Die niedrige Ni-Konzentration von 5,0 ppm von Wipp. 1 ist ein Ausreißerwert. Die Konzentrationen von LOI im „Borgerhau“ befinden sich zwischen 0,40 % und 0,78 %, in Wippingen zwischen 0,33 % und 0,71 %, sie sind in einem ähnlichen Bereich. Die Trennung im binären Diagramm ist deshalb auch nicht scharf (Abb. 99).

Da viele der Elemente und Elementoxide in Arnhofen sehr breit streuen, erwies sich eine Trennung der übrigen Fundorte von Arnhofen ebenfalls als schwierig. Mit *LOI* gegen *Eu* (Abb. 100) oder *Sm* (Anhang B4) lässt sich Arnhofen von „Borgerhau“ und Wippingen recht gut trennen. Die Konzentrationen von Eu sind für Arnhofen: 0,4 ppm bis 1,8 ppm; für Borg. und Wipp: 0,3 ppm bis 1,1 ppm; die von LOI für Arnhofen: 0,55 % bis 0,91 %; für Borg. und Wipp: 0,33 % bis 0,78 %. Im binären Diagramm fällt Borg. 18 (schwarz umrandet) mit der hohen Konzentration von 0,78 % an *LOI* (Ausreißerwert) auf. Für den Hornstein Wipp. 9 (schwarz umrandet), der sich am Rande des Arnh.-Clusters befindet, gibt es keine einleuchtende Erklärung.

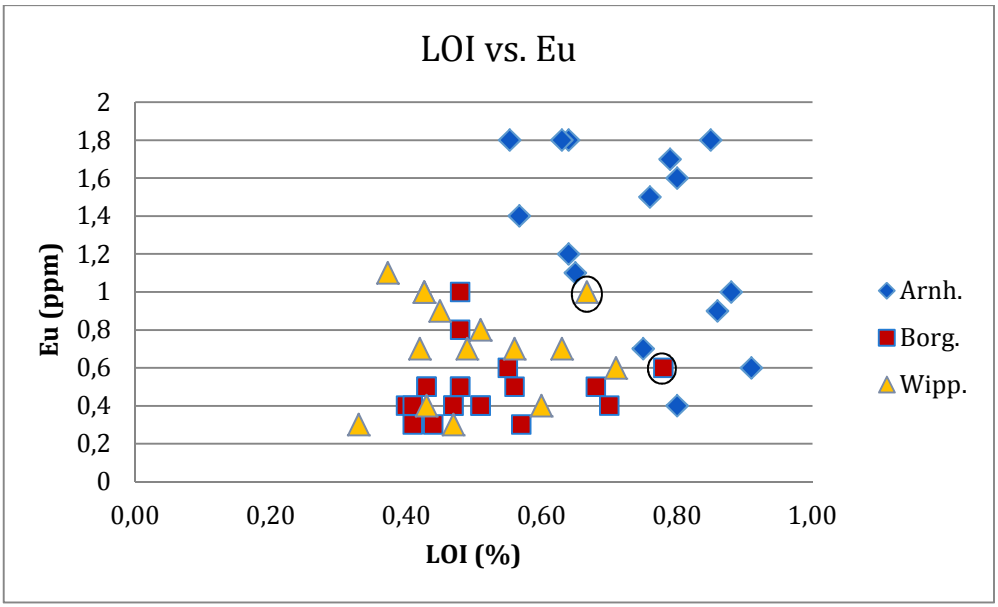


Abb. 100: Trennung der Hornsteine aus Arnhofen von denen aus dem „Borgerhau“ und aus Wippingen durch Eu und LOI. LOI von Borg. 18 (schwarz eingekreist) ist ein Ausreißerwert; weiterhin stört Wipp. 9 (schwarz eingekreist).

Eine angemessene Trennung von Arnhofen und Wittlingen durch ein binäres Diagramm war nicht möglich. Auch eine Trennung aller vier Fundorte durch ein binäres Diagramm scheiterte.

Festzuhalten ist, dass einige Elemente und Elementoxide häufiger in relativ guten binären Diagrammen vorkommen. Es sind dies vor allem *K_2O*, *Fe_2O_3*, *Sm*, *Eu* und *Ni*, ferner *LOI*. Es sind Elementoxide, LOI und Elemente, bei denen sich häufig Mittelwerte verschiedener Fundorte stärker unterscheiden (Tabelle 26)[17].

	K_2O (%)		Fe_2O_3 (%)		LOI (%)		Sm (ppm)		Eu (ppm)		Ni (ppm)	
	Var.	Mittel	Var.	Mittel	Var.	Mittel	Var.	Mittel	Var.	Mittel	Var.	Mittel
Arnh.	0,018-0,045	0,034	0,133-0,343	0,255	0,55-0,91	0,74	4,7-23,3	16,2	0,4-1,8	1,3	bis 49,1	24,4
Borg.	0,008-0,038	0,018	0,141-0,294	0,182	0,40-0,78	0,51	3,1-12,4	5,7	0,3-1,0	0,5	bis 31,2	15,6
Wipp.	0,013-0,029	0,020	0,172-0,565	0,283	0,33-0,71	0,50	3,8-14,0	8,7	0,3-1,1	0,7	5,0-69,0	46,8
Witt.	0,018-0,064	0,047	0.137-0,401	0,273	0,50-1,02	0,66	4,4-25,4	11,0	0,4-2,0	0,9	bis 106,9	52,8

Tab. 26: Variationsbreite (Var.) und Mittelwerte (Mittel) einiger Elementoxide, Elemente und LOI.

[17] Zu Ausreißer- und Extremwerte siehe Kapitel 6.3. Einige der Hornsteine, die in binären Diagrammen bei der Zuordnung zu bestimmten Fundorten störten, machten auch bei den multivariaten Methoden Schwierigkeiten: Witt. 8 und Witt. 14 wurden bei der Diskriminanzanalyse Wippingen, Wipp. 1 dem „Borgerhau“ zugeordnet. Witt. 14, Wipp. 1 und Borg. 18 waren in der Clusteranalyse schwierig zuzuordnen.

5.6 Zusammenfassung

Untersucht wurden insgesamt 28 Elementoxide, LOI und Spurenelemente. Davon fallen für die Trennung der Hornsteinfundorte mittels chemischer Marker die folgenden Elementoxide und Elemente weg:

Elementoxide und Spurenelemente	Begründungen
Nb, Ce, Y, Zn	unterhalb der Nachweisgrenze der WDRFA für fast alle Hornsteinproben
Zr, La, Nd	an der unteren Nachweisgrenze der WDRFA, die unteren Abweichungen vom Messmittelwert x̄i konnten nicht mehr bestimmt werden; deshalb keine sicheren Vertreter der Population der Fundorte
Co	deutlich überhöht, da zu 9 % im Wolframcarbid der Gesteinsmühle enthalten
SiO_2	unterlag der Kalibration der Messwerthöhe bei fünf verschiedenen WDRFA-Messungen und enthält damit gewisse Ungenauigkeiten zwischen den jeweiligen Messwerten der fünf Messungen

Tab. 27: Begründungen für den Wegfall der Messwerte von Elementoxiden und Elementen der WDRFA für die weiteren Untersuchungen.

Zur chemischen Trennung der Hornsteinfundorte eignen sich damit grundsätzlich die folgenden neun Elementoxide und LOI: TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, *MnO, MgO, CaO,* Na_2O, K_2O, P_2O5, *LOI*; sowie neun Spurenelemente: *Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb.*

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass, bei einem konstant hohen Anteil an SiO_2 von durchschnittlich 98 %, die Hornsteine stark in der chemischen Zusammensetzung der übrigen Elemente variieren. Trotz der großen Variabilität der Elementkonzentrationen der Hornsteine innerhalb eines Fundortes sind durchaus auch Unterschiede zwischen Hornsteinen verschiedener Fundorte zu finden, das zeigen unter anderem binäre Diagramme, zum Beispiel K_2O vs. Fe_2O_3 oder *MgO, CaO, Cr, Ni*; *LOI* vs. *Ni* oder *Eu, Sm*; *Ni* vs. Fe_2O_3 oder *CaO*. Die gesamten binären Diagramme führten jedoch zu keiner sicheren Trennung von Hornsteinen aller untersuchten Fundorte, aber sie machten Mut, eine Trennung von Hornsteinen verschiedener Fundorte mit multivariater Statistik zu versuchen.

Multivariate Statistik verwendet im Gegensatz zu binären Diagrammen nicht nur zwei, sondern möglichst viele Parameter für eine Unterscheidung verschiedener Fundorte.

6 Statistische Untersuchungen der WDRFA-Daten

Da jede „Population“, wie die Jurahornsteine der Fundorte Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen, charakteristische Eigenschaften hat, ist die Variation ihrer einzelnen Werte begrenzt. Deshalb sollte es auch möglich sein, mit einer relativ kleinen, zufälligen Stichprobe ein adäquates Bild der Eigenschaften der Population (= Grundgesamtheit) zu bekommen. Eine Stichprobe im statistischen Sinne ist eine Teilmenge, die von einer Population, also den Hornsteinen eines Fundortes, genommen wurde. Wichtig ist, dass die Population zufällig und unvoreingenommen beprobt wurde, was hier geschah. Dann entsteht bei zunehmender Anzahl von Hornsteinexemplaren in der Probe ein immer besseres Bild der Population, also der Hornsteine der einzelnen Fundorte (Davis 2002, 28 f.). Wegen der geringen Anzahl der ungarischen Cherts, die sich zusätzlich auf verschiedene Fundorte in Ungarn verteilten, wurden diese aus der statistischen Untersuchung ausgeschlossen.

In mehreren Schritten wurden die WDRFA-Daten statistisch auf Unterschiede der Variablen (Elementoxide, LOI und Elemente) verschiedener Fundorte untersucht. Dabei ging es um statistisch signifikante Merkmale oder Merkmalskombinationen, die zu einer Trennung der Hornsteine verschiedener Fundorte führen können. Als Voraussetzung für einige statistische Verfahren war eine Untersuchung auf Normalverteilung nötig, dabei wurden auch Ausreißer- bzw. Extremwerte bestimmt. Es folgten Vergleiche der Mittelwerte, ferner der Mittelwerte mit Standardabweichungen. Unterschiede bei Korrelationen der Variablen verschiedener Fundorte und die Faktorenanalyse gaben weitere notwendige Hinweise auf unterschiedliche chemische Strukturen an verschiedenen Fundplätzen, und sie bereiteten damit auch weitere multivariate Verfahren zur Trennung von Hornsteinen durch Diskriminanz- und Clusteranalyse vor.

6.1 Einige statistische Werte und ihre Definition

		MgO **„Borgerhau“ (%)**	***Al_2O_3*** **„Borgerhau“ (%)**
N	Gültig	20	20
	Fehlend	0	0
Mittelwert		0,07300	0,08115
Standardfehler des Mittelwertes		0,001129	0,020663
Median		0,07200	0,06450
Modus		0,072	0,000
Standardabweichung		0,005047	0,092408
Varianz		0,000	0,009
Schiefe		0,993	3,809
Kurtosis		0,375	16,114
Spannweite		0,019	0,456
Minimum		0,066	0,000
Maximum		0,085	0,456
Perzentile	25	0,06925	0,05025
	50	0,07200	0,06450
	75	0,07675	0,08675

Tab. 28: Verschiedene statistische Werte am Beispiel von MgO und Al_2O_3 aus dem „Borgerhau“ mit dem Statistikprogramm SPSS 19.

Stellvertretend für alle Elementverteilungen an den vier Fundorten wurden in Tab. 28 einige statistische Begriffe und deren Werte am Beispiel von Magnesiumoxid (*MgO*) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) am Fundort „Borgerhau“ aufgezeigt.
In Tab. 29 sind wichtige statistische Werte definiert.

Mittelwert	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$	n = Anzahl x_i = Messwert (Mittelwert der Einzel-Messungen)
Varianz	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n}$	
Standardabweichung	$s = \sqrt{s^2}$	
Standardfehler des Mittelwertes	$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$	
Variationskoeffizient	$V = \frac{s}{\bar{x}}$	
Relativer Variations-koeffizient	$V_r = \frac{s/\bar{x}}{\sqrt{n}} * 100\ (\%)$	
Median, Zentralwert	Md = mittlerer Wert in der Häufigkeitsverteilung	
Modus	Mo = häufigster Messwert	
Schiefe	$Sch = \frac{\bar{x} - Mo}{s}$	Maß für symmetrische Verteilung um den Median: Sch = 0: symmetrisch Sch = positiv: rechtsschief (linkssteil) Sch = negativ: linksschief (rechtssteil)
Kurtosis, Exzess	Ex = gibt die Form der Gipfelwölbung an:	Ex = 0: Exzess der Normalverteilung Ex = positiv: schmalgipfeliger als die Normalverteilung Ex = negativ: breitgipfeliger als die Normalverteilung
Spannweite	R = Differenz zwischen dem größten und kleinsten Wert in der Stichprobe	
Perzentile	P_5 bis P_{95} = Stichprobenwerte, die so in der Häufigkeitsverteilung liegen, dass ein gegebener Prozentsatz der anderen Werte unterhalb, der Rest oberhalb liegt	

Tab. 29: Definition häufig verwendeter statistischer Begriffe (vgl. Gottwald 2000, 10-30; Davis 2002, 35-39; Bortz 2005, 34-46; Fitch Software 2009, 21; 26-28; Brosius 2011, 366-372).

Lagemaße wie Mittelwert und Median, Streuungsmaße wie Standardabweichung, Varianz, Spannweite und Standardfehler des Mittelwertes, Verteilungsmaße wie Schiefe und Kurtosis sind die Grundlagen der Verteilungskurve einer Variablen (Elementoxid, LOI oder Element) aller Hornsteine eines Fundortes (vgl. Gottwald 2000, 10-30; Davis 2002, 35-39; Bortz 2005, 34-46; Fitch Software 2009, 21; 26-28; Brosius 2011, 366-372).

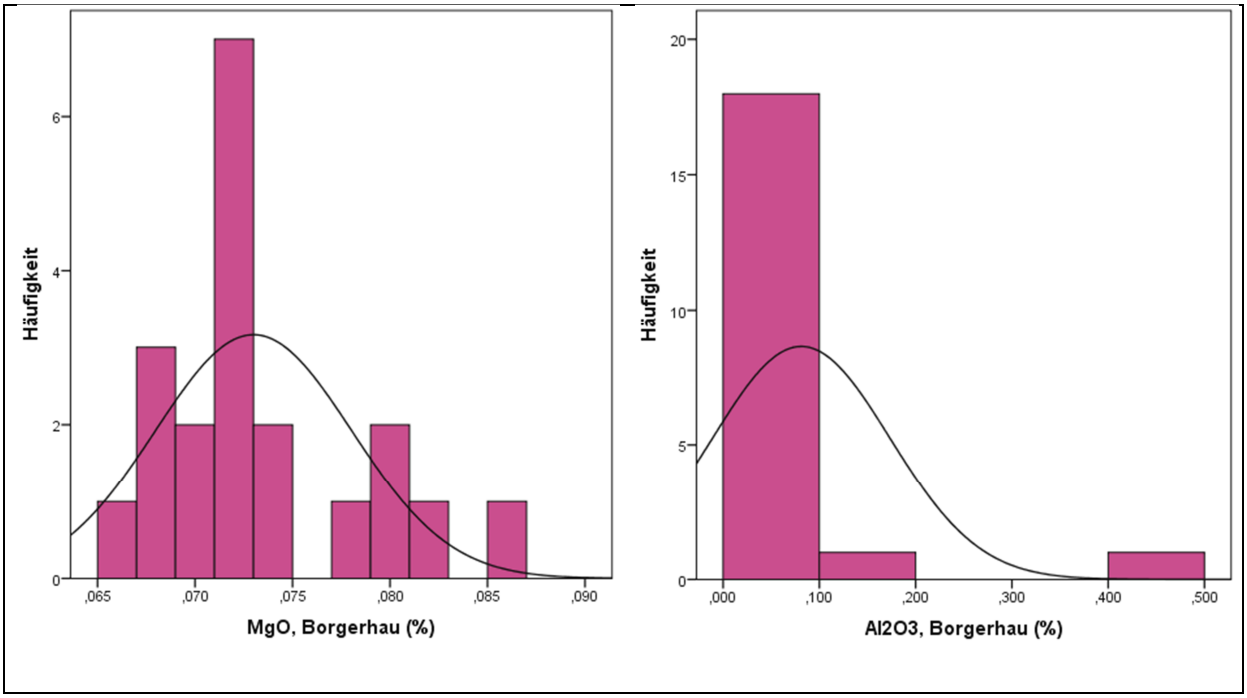


Abb. 101: Histogramme der Elementoxide MgO und Al_2O_3 der Hornsteine aus dem „Borgerhau“ und geschätzte Normalverteilungskurve (durchgezogene Linie, SPSS).

Beim *MgO* der Hornsteine aus dem „Borgerhau“ fallen unter anderem Mittelwert und Median fast zusammen, die Verteilungskurve ist etwas rechtsschief (linkssteil) (Sch = 0,993) und die Gipfelwölbung ist mit Ex = 0,375 etwas schmaler als für die Normalverteilung gefordert. Anders sieht es bei Al_2O_3 der Hornsteine aus dem „Borgerhau“ aus. Die Spannweite und damit die Streuung der Messwerte sind gegenüber *MgO* sehr viel größer, was unter anderem durch einen Extremwert verursacht wird. Darüber hinaus weichen Mittelwert und Median deutlich von einander ab, der Median ist dabei deutlich kleiner, was auf eine deutlich linkssteile Verteilung hinweist. Das wird durch den hohen Wert der Schiefe (Sch = 3,809) bestätigt. Auch die Kurtosis (Ex = 16,114) weicht stark von null ab. *MgO* ist demnach im „Borgerhau“ einer Normalverteilung (durchgezogene schwarze Linie) deutlich näher als Al_2O_3 (Tab. 28, Abb. 101).

6.2 Untersuchung auf Normalverteilung

Eine Normalverteilung der Messwerte jeder Variablen einer zufälligen Stichprobe wie in Abb. 102 ist wünschenswert und für viele statistische Untersuchungen Voraussetzung (Davis 2002, 58-60; Brosius 2011, 403). Ab 30 bis 40 zufällig gewählten Exemplaren, hier Hornsteinen, einer Stichprobe je Population rechnet man damit, dass deren Messwerte normalverteilt sind und das Bild der jeweiligen Population richtig wiedergeben (Bortz 2005, 112; Backhaus et al. 2008, 90 f.). Die Prüfung der Normalverteilung der Variablen, hier der Elemente, Elemento-

xide und LOI, steht deshalb am Anfang der Untersuchung der Hornsteindaten der vier Fundorte Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen.
Die Normalverteilung N (Gaußsche Verteilung) ist durch die folgende Funktion und den dazu gehörigen Graph definiert (Abb. 102):

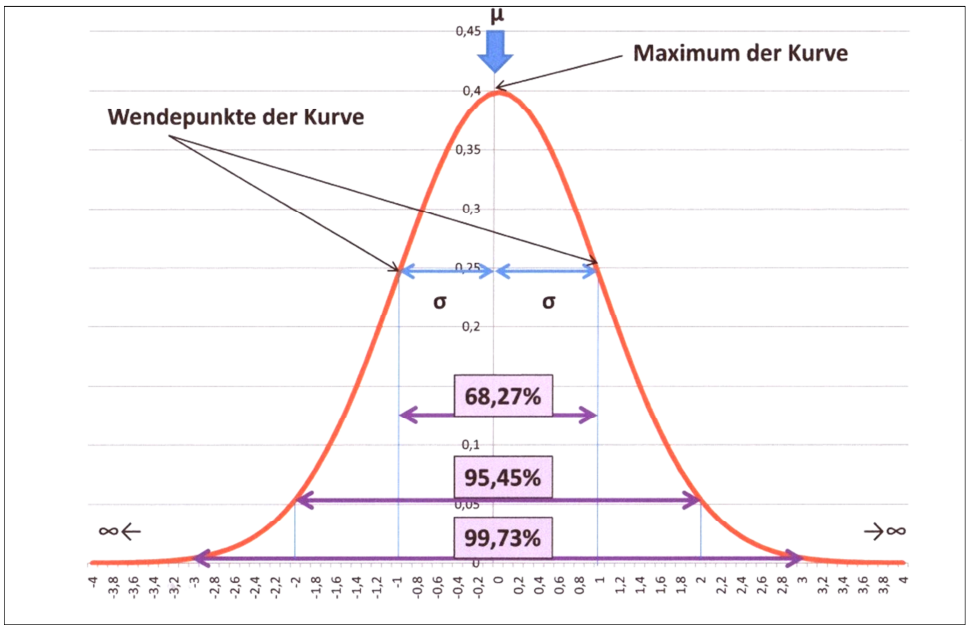


Abb. 102: Gaußsche Normalverteilung (N) (Pfretzschner, Vorlesungsskript 2009).

$$N = \frac{1}{\sqrt{2\pi * \sigma^2}} * e^{-\frac{(\bar{x}-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

μ = Erwartungswert (Mittelwert) einer theoretischen Verteilung
σ = Standardabweichung einer theoretischen Verteilung

Die Normalverteilung wird also durch die Parameter μ und σ eindeutig festgelegt (Bortz 2005, 74). Die Wendepunkte der Kurve liegen bei $\bar{x} - 1\sigma$ und $\bar{x} + 1\sigma$, also dem Mittelwert minus bzw. plus der einfachen Standardabweichung. Die Fläche unter der Normalverteilungskurve zwischen $\bar{x} - 1\sigma$ und $\bar{x} + 1\sigma$ bedeckt etwa 68 %, die zwischen $\bar{x} - 2\sigma$ und $\bar{x} + 2\sigma$ ca. 95 % und die zwischen $\bar{x} - 3\sigma$ und $\bar{x} + 3\sigma$ mehr als 99 %.

Die Histogramme der untersuchten Hornstein-Variablen, zum Beispiel des *MgO* und Al_2O_3 aus dem „Borgerhau“ (Abb. 101), zeigen dagegen dass diese mehr oder weniger deutlich von der Normalverteilung abweichen. Da die Anzahl von 15 bzw. 20 untersuchten Hornsteinen je Fundort deutlich unter der für eine Normalverteilung geforderten Mindestmenge von 30 liegt, muss das nicht besonders verwundern (Bortz 2005, 112). Der Kurvenverlauf der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen der Variablen kann von den Statistikprogrammen aus den vorliegenden Werten mathematisch geschätzt und anschließend mit der Normalverteilungskurve verglichen werden. Die Schätzung von μ, dem Erwartungswert, kann bei verschiedenen Statistikprogrammen durchaus auch etwas unterschiedlich ausfallen (vgl. Excel; WinSTAT für Excel; SPSS 19).

Von den statistisch gewonnenen Werten ist der Signifikanzwert P aus der Prüfung der Nullhypothese H_0 auf Normalverteilung der wichtigste. In diesem Fall besteht das besondere Interesse, H_0 beizubehalten (und nicht wie in den meisten Fällen H_0 abzulehnen). Beim Signifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ würden Hornsteinvariable bei $P > 0{,}05$ als normalverteilt gelten. Allerdings ist dann, besonders bei den kleinen Proben ($n \leq 20$), der unbekannte ß-Fehler relativ groß. Um den unbekannten ß-Fehler gering zu halten, muss der α-Fehler vergrößert werden (Bortz 2005, 165; Köhler et al. 2007, 81-84). Je höher der Signifikanzwert P, desto sicherer kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden (Brosius 2011, 405). In Anlehnung an SPSS wird der α-Fehler sicherheitshalber auf das 20 %-Niveau angehoben; bei $P < 0{,}20$ wird also bei den Hornsteinuntersuchungen die Normalverteilung zurückgewiesen.
Als Signifikanztest auf Normalverteilung wurden der Kolmogorov-Smirnov-Test (WinSTAT für Excel-Statistik), Kolmogorov-Smirnov-Test mit einer Signifikanzkorrektur nach Lilliefors (für große Stichproben) (SPSS-Statistik) und der Shapiro-Wilk-Test (für Stichproben < 50) (SPSS-Statistik) verwendet (Fitch 2009, 17-23; 39-44; Brosius 2011, 403-405; 411-413).
Zudem wurde auch der David-Test: D = R/s (Spannweite / Standardabweichung) auf angenäherte Normalverteilung per Taschenrechner durchgeführt. Als Signifikanzschranken ($\alpha = 0{,}10$) zur Prüfung auf angenäherte Normalverteilung sind beim David-Test Grenzwerte festgelegt. Für n = 20 liegt ihre untere Grenze bei 3,29, ihre obere bei 4,32; für n = 15 bei 3,07 bzw. 4,02; und für n = 65 bei 4,14 bzw. 5,35 (Gottwald 2000, 38; Clauss et al. 2011, 198 f.; 450 Taf. 21).

Signifikanz der Normalverteilung	*MgO*, Borg.	Al_2O_3, Borg.	Al_2O_3, Borg. ohne 11
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,164	0,013	0,995
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors	0,002	0,000	0,200
Shapiro-Wilk-Test	0,031	0,000	0,180
David-Test, angenähert normalverteilt	3,80	4,94	3,82

Tab. 30: Verschiedene Signifikanztests auf Normalverteilung im Vergleich an drei Beispielen. In der Tabelle wurden signifikante Werte grün markiert.

Die Konzentrationen von *MgO* und Al_2O_3 sind in den Hornsteinen des „Borgerhau“ demnach nicht normalverteilt; *MgO* ist aber annähernd normalverteilt, wie auch die Verteilungskurve zeigt. Entfernt man jedoch den Extremwert von 0,456 % bei Al_2O_3 von Borg. 11, ist Aluminiumoxid im „Borgerhau“ hinreichend normal verteilt.
Wie zu erwarten war, unterschieden sich die Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov-Tests, des Kolmogorov-Smirnov-Tests mit einer Signifikanzkorrektur nach Lilliefors und des Shapiro-Wilk-Tests aller chemischen Elemente, Elementoxide und von LOI an allen Fundorten. Der David-Test bewertete die angenäherte Normalverteilung der Elemente, -oxide und LOI verschiedener Fundorte ebenfalls teilweise anders (Vgl. Anhang E1.1-E1.2).
Wo in der statistischen Arbeit nur angenäherte Normalverteilung erforderlich ist, werden deshalb alle Variablen (Elementoxide, LOI und Elemente) verwendet, die in mindestens einem dieser Tests je Fundort als normal- oder angenähert normalverteilt gelten. Es sind dies der überwiegende Teil der Elementoxide und Elemente der vier süddeutschen Fundorte: TiO_2,

Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, K_2O, Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb, ferner *LOI*. Auch die Variablen *MnO, Na_2O und P_2O_5,* die an mindestens der Hälfte der Fundorte eine (angenäherte) Normalverteilung haben und deren Histogramme für alle Fundorte nicht allzu asymmetrisch waren, wurden im Datensatz belassen (Tabelle E1.1 im Anhang).

Bei der Untersuchung aller 65 Hornsteine der vier Fundorte Arnhofen, „Borgerhau", Wippingen und Wittlingen zusammen auf Normalverteilung könnten, entsprechend der großen Anzahl, theoretisch alle 19 Elemente, Elementoxide und LOI normalverteilt sein. Dem war nicht so (Anhang E1.1-E1.2). Von 19 Variablen waren nur 13 normalverteilt oder annähernd normalverteilt. Das gibt einen deutlichen Hinweis darauf, dass es sich nicht um eine weitgehend homogene Grundgesamtheit schwäbisch-bayerischer Jurahornsteine handelt, sondern dass es verschiedene Grundgesamtheiten von Jurahornsteinen gibt und dass sich die Hornsteine verschiedener Fundorte unterscheiden können.

Eine Normalverteilung ist für den T-Test auf signifikante Unterscheidung verschiedener Fundorte und den F-Test zur Prüfung der Nullhypothese erforderlich (Backhaus et al. 2008, 90 f.). Diese Tests sollten bei der vorhandenen Datenlage nicht oder höchstens eingeschränkt verwendet werden. Da die Elementoxide, LOI und die Elemente nur annähernd normalverteilt sind, eignen sich für eine mögliche Trennung vor allem die multivariaten statistischen Methoden, die unter anderem auch kleinere Konzentrationsunterschiede in den Zusammensetzungen der Hornsteine aufsummieren. Sie sind relativ stabil gegenüber leichteren Abweichungen von der Normalverteilung (Baxter & Buck 2000, 721; Backhaus et al. 2008, 90 f.). Multivariate statistische Verfahren wie Korrelations-, Faktoren-, Diskriminanz- und Clusteranalyse werden deshalb in dieser Arbeit zur Trennung der Hornsteine verschiedener Fundorte verwendet.

Für die multivariaten statistischen Verfahren mussten die WDRFA-Messwerte aufbereitet werden. Insbesondere, wenn die Standardabweichungen mit dem Mittelwert anwachsen wie auch teilweise in unserem Fall, ist eine Logarithmierung erforderlich. Exponentialfunktionen werden dadurch linearisiert, wodurch schiefe Verteilungen symmetrisch werden (Köhler et al. 2007, 68-71). Da es sich im Fall der Hornstein-Variablen um sehr kleine Werte handelt, in geringem Umfang auch um Nullwerte, wurde zusätzlich +1 addiert: lg-normal x entspricht dann $\tilde{x} = \lg(x + 1)$ (Köhler et al. 2007, 75). Bei allen Analysen, bei denen eine Normalverteilung empfehlenswert oder linearisierte Werte erforderlich waren, wurden deshalb die lg-normalen Werte verwendet, so bei der ANOVA (**AN**alysis **O**f **VA**riance), Korrelations-, Faktoren-, Diskriminanz- und Clusteranalyse (Tabelle D2.1-D2.2 im Anhang).

6.3 Ausreißerwerte, Extremwerte

Wie am Beispiel des Al_2O_3 aus den Hornsteinen des „Borgerhau" gezeigt (Abb. 101), stören Ausreißerwerte und Extremwerte die Wahrscheinlichkeit einer Normalverteilung grundsätzlich, oder sie haben einen durchaus positiven oder negativen Einfluss darauf.
Als Ausreißerwerte bezeichne ich nach Brosius (2011, 401 f.) die Variablenwerte, die mehr als das 1,5 fache der mittleren 50 % über dem 75 %-Perzentil bzw. unter dem 25 %-Perzentil der Boxplots liegen, als Extremwerte die, die um mehr als das Dreifache darüber bzw.

darunter liegen. Die Ausreißer- und Extremwerte sind nachfolgend tabellarisch aufgeführt (Tab. 31).

Fundort	**Hornsteinnummer**	**Ausreißerwert**	**Extremwert**
Arnhofen	Arnh. 1	Fe_2O_3	
	Arnh. 3	P_2O_5	
	Arnh. 4	TiO_2	
	Arnh. 6	P_2O_5	
	Arnh. 7	*CaO, Ba, Sr, Yb*	
	Arnh. 8	*V*	*Rb*
	Arnh. 9		*Rb*
	Arnh. 10	*V*	*Rb*
	Arnh. 11	*Rb*	Na_2O, P_2O_5
	Arnh. 12	*MgO*, Na_2O	
	Arnh. 15		Na_2O
Borgerhau	Borg. 2		*Yb*
	Borg. 6		*Rb*
	Borg. 10	TiO_2, *MgO, CaO*, Na_2O	K_2O
	Borg. 11		Al_2O_3
	Borg. 12	K_2O	
	Borg. 15	*Yb*	
	Borg. 17	*CaO*, K_2O	
	Borg. 18	*MnO, LOI*	*Rb*
	Borg. 19	*MnO, Sm*	*Rb, Eu*
	Borg. 20		*Sr, Eu, Sm*
Wippingen	Wipp. 1	*CaO, Ni*	
	Wipp. 5	*V*	
	Wipp. 7	P_2O_5, *V*	*Ba*
	Wipp. 8	TiO_2, *Sr*	
	Wipp. 9		Fe_2O_3, P_2O_5, *Ba, V*
	Wipp. 10	*Sr*	TiO_2
	Wipp. 14	P_2O_5	
	Wipp. 15		Na_2O
Wittlingen	Witt. 1	*Ni*	Na_2O
	Witt. 6	*LOI*	
	Witt. 7	*Ni*	*Ba, Rb*
	Witt. 8	K_2O, *Ni*	*Ba, Rb*
	Witt. 12	TiO_2, *Eu, Sm*	
	Witt. 13	*MgO*	
	Witt. 14	K_2O	
	Witt. 15	*MgO*	Na_2O

Tab. 31: Ausreißer- und Extremwerte der Hornsteine verschiedener Fundorte.

Insgesamt 6 % der verwendeten Messwerte x_i sind Extrem- oder Ausreißerwerte, 2,3 % (29 von 1235) davon Extrem- und 3,6 % (45 von 1235) Ausreißerwerte.
Von den Elementen und Elementoxiden hat *Rb* mit neun die meisten Ausreißer- und Extremwerte (13,8 %). Das liegt sicher daran, dass sich Rubidium an der Messgrenze befindet, wofür auch die große mittlere Standardabweichung von 32,9 % vom Messmittelwert spricht. Auch Na_2O liegt mit sieben Ausreißer- und Extremwerten (10,8 %) oberhalb der 10 %-Marke. Hier muss wohl eine ungleiche Verteilung von natriumhaltigen Salzen in der Hornsteinumgebung während seiner Bildung vorgelegen haben. Keine oder nur eine oder zwei Ausreißer- und/oder Extremwerte wurden bei *Cr*, Al_2O_3, Fe_2O_3, *MnO* und *LOI* gefunden.

Arnh. 7 und Borg. 10 sind die Hornsteine mit den meisten Ausreißerwerten (je 4), Wipp. 9 der Hornstein mit den meisten Extremwerten (ebenfalls vier). Insgesamt ist Borg. 10 der am stärksten herausfallende Hornstein mit zusammen fünf = 26,3 % Ausreißer- und Extremwerten; Arnh. 7, Borg. 19, Wipp. 9 und Witt. 8 fallen durch jeweils vier = 21 % Ausreißer- und Extremwerte auf.

6.4 Vergleich der Mittelwerte mittels ANOVA

Wie Tabelle 32 zeigt, unterscheiden sich alle Mittelwerte der Hauptelemente, das gleiche gilt für die Spurenelemente.

Fundort	*TiO2* (%)	*Al2O3* (%)	*Fe2O3* (%)	*MnO* (%)	*MgO* (%)	*CaO* (%)	*Na2O* (%)	*K2O* (%)	*P2O5* (%)	*LOI* (%)
Arnhofen	0,0169	0,1322	0,2549	0,0026	0,0792	0,0909	0,0969	0,0335	0,0207	0,680
Borgerhau	0,0153	0,0812	0,1823	0,0016	0,0730	0,0686	0,0700	0,0182	0,0125	0,512
Wippingen	0,0158	0,0647	0,2828	0,0027	0,0714	0,0375	0,0681	0,0196	0,0107	0,500
Wittlingen	0,0209	0,1767	0,2727	0,0033	0,0750	0,0338	0,0967	0,0468	0,0117	0,661
insgesamt	0,0170	0,1112	0,2431	0,0024	0,0745	0,0585	0,0819	0,0286	0,0138	0,582

Tab. 32: Mittelwerte der Hauptelemente.

Es muss jedoch die Frage geklärt werden, ob diese Unterschiede zufällig sind oder ob signifikante Unterschiede vorliegen. Dafür kann theoretisch der T-Test oder die ANOVA verwendet werden.
Während der T-Test jeweils nur zwei Mittelwerte miteinander vergleichen kann, können mit der ANOVA mehrere Mittelwerte gleichzeitig statistisch überprüft werden (Köhler et al. 2007, 112; Brosius 2011, 499). Damit wird eine Verzerrung durch multiple Signifikanzschätzungen vermieden. Das ist deshalb besonders wichtig, weil mit steigender Anzahl der Mittelwerte der α-Fehler des multiplen T-Tests zunimmt (Pfretzschner, Vorlesungsskript 2009; Brosius 2011, 505 f.).

Die ANOVA (**AN**alysis **O**f **VA**riance) in der univariaten Grundform untersucht, ob sich die Mittelwerte einer abhängigen numerischen Variablen (Elementoxid, LOI oder Element) zwischen verschiedenen Gruppen von Hornsteinen (Faktorvariable = einzelne Fundorte) einer

unabhängigen Variablen, dem Faktor (Fundort), unterscheiden. Für jede abhängige Variable (Elementoxid, LOI oder Element) wird dabei ein eigener Test durchgeführt (Köhler et al. 2007, 112; Backhaus et al. 2008, 152; Brosius 2011, 508 f.).

Voraussetzungen für die ANOVA:
- normalverteilte Grundgesamtheiten
- homogene Varianzen (Homoskedastizität), für alle Fundorte gleich
  (Köhler et al. 2007, 118; Brosius 2011, 500)

Wie unter 6.2 festgestellt wurde, sind die Variablen der Hornsteine an den einzelnen Fundorten nur annähernd normalverteilt. Mit dem Levene-Test, der unabhängig von der Normalverteilung ist (Köhler et al. 2007, 139), wurde die Voraussetzung der homogenen Varianzen (Homoskedastizität) geprüft. Es zeigte sich, dass nur neun von 19 Variablen homogene Varianzen haben. Beide Voraussetzungen sind demnach nicht erfüllt, weshalb die Aussagen der AVOVA mit Vorsicht zu verwenden sind.

Die ANOVA geht zunächst vom arithmetischen Mittel jeder abhängigen Variablen (Elementoxide, LOI und Elemente) aus. Zusätzlich berechnet sie die Varianzen für jeden Fundort und die Gesamtvarianz. Die Gesamtvariabilität wird in den Bestandteil Streuung, der auf der Variabilität innerhalb der Fundorte (Zufallsvariabilität) ($SS_{w(ithin)}$) beruht, zerlegt und in den Bestandteil Streuung, der auf den Unterschieden zwischen den Fundorten (feste Effekte) ($SS_{b(etween)}$) zurückzuführen ist. Danach wird untersucht, ob und wie stark sich die Summe der Varianzen innerhalb der Fundorte von der Gesamtvarianz unterscheidet. Wenn nun die Streuung zwischen den Fundorten $SS_{b(etween)}$ nicht größer ist als die Streuung innerhalb der Fundorte $SS_{w(ithin)}$, kann man annehmen, dass die gemessenen Mittelwertunterschiede zufällig, also nicht signifikant verschieden sind (Köhler et al. 2007, 114-121; Backhaus et al. 2008, 154-158).

Varianzerklärung: (nach Backhaus et al. 2008, 156)

$SS_{t(otal)}$	=	$SS_{b(etween)}$	+	$SS_{w(ithin)}$
Gesamtabweichung	=	erklärte Abweichung	+	nicht erklärte Abweichung

Ob das Verhältnis der beiden Streuungskomponenten noch im Rahmen der Zufallsvariabilität bleibt, entscheidet SPSS mit dem F-Test oder anderen multiplen Vergleichstests (Brosius 2011, 509-511). Da in unserem Fall weder von normalverteilten Grundgesamtheiten noch von Varianzgleichheit ausgegangen werden kann, wurde von den multiplen Vergleichstests der Tamhane-T2-Test, der keine Varianzgleichheit erfordert, verwendet. Dieser verwendet allerdings die t-Statistik mit eher konservativen Schätzungen (Brosius 2011, 511).

Die Post-Hoc-Mehrfachvergleichs-Tabelle der ANOVA für die untersuchten Hornsteine befindet sich im Anhang E2. Tabelle 33 gibt die Ergebnisse auf der Basis der 5 % Signifikanz-Grenze verkürzt wieder: x = signifikant ungleiche Mittelwerte.

	Arnh.-Borg.	Arnh.-Wipp.	Arnh.-Witt.	Borg.-Wipp.	Borg.-Witt.	Wipp.-Witt.
TiO_2			x		x	x
Al_2O_3		x			x	x
Fe_2O_3	x			x	x	
MnO	x			x	x	
MgO						
CaO			x		x	
Na_2O						
K_2O	x	x	x		x	x
P_2O_5						
LOI	x	x			x	x
Ba	x	x	x			
Cr	x	x	x			
Ni		x	x	x	x	
Rb						
Sr	x					
V						
Eu	x	x			x	
Sm	x	x		x	x	
Yb		x	x	x		
Summe	9x	9x	7x	5x	10x	4x

Tab. 33: Signifikant ungleiche Mittelwerte der Variablen verschiedener Fundorte durch x *gekennzeichnet.*

Da nur angenähert normalverteilte Grundgesamtheiten untersucht wurden, ist die ANOVA nur eingeschränkt aussagefähig. Die multivariat erworbenen Werte werden weitgehend durch den gesunden Menschenverstand bestätigt, nachdem die meisten Fundortpaare mit hohen Mittelwertdifferenzen derselben Variablen auch signifikant unterschiedliche Mittelwerte haben.
Wie Tabelle 33 zeigt, unterscheiden sich die Mittelwerte von *MgO, Na_2O, P_2O_5, Rb* und *V* der Hornsteine an keinem der Fundortpaare signifikant. Berücksichtigt man diese fünf Elementoxide und Elemente nicht weiter, bleiben noch 14 Variablen übrig, bei denen an mindestens einem Fundortpaar die Streuung zwischen zwei Fundorten größer ist als innerhalb der Fundorte. 10 der 14 Variablen haben signifikante Mittelwerte für das Fundortpaar Borg./Witt., neun bzw. sieben der 14 Variablen haben signifikante Mittelwerte für alle möglichen Fundortpaare mit Arnhofen. Die wenigsten signifikanten Mittelwerte, fünf bzw. vier von 14 Variablen, wurden bei den Fundortpaaren Borg./Wipp. und auch bei Wipp./Witt. gefunden.
Für kein einziges Elementoxid, LOI oder Element sind die Mittelwerte aller sechs Fundortpaare signifikant (Signifikanzgrenze 5 %). Aber an fünf von sechs Fundortpaaren sind die Mittelwerte der K_2O-Konzentrationen signifikant: Arnh./Borg., Arnh./Wipp., Arnh./Witt., Borg./Witt. und Wipp./Witt. Nur die Mittelwertdifferenzen der am nächsten gelegenen Fundstellen „Borgerhau“ und Wippingen sind für K_2O nicht signifikant. An vier von sechs Fundortpaaren sind die Mittelwerte von *LOI, Ni* und *Sm* signifikant verschieden, auch diese Variablen fielen schon, ebenso wie K_2O bei den binären Diagrammen positiv auf. Das ist kein Zufall, beruht doch bei den binären Diagrammen eine erfolgreiche Trennung auch auf signifikant verschiedenen Mittelwerten.

6.5 Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung

Ausschließlich mit Mittelwerten ist offensichtlich keine sichere Fundort-Trennung möglich. Deshalb wurde hier die Kombination von Mittelwert und Standardabweichung tabellarisch und mittels Grafiken untersucht (Tab. 34; 35; Abb. 103; 104).

Fundort		TiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	P_2O_5 (%)	LOI (%)
Arnhofen	Mittelwert	0,0169	0,1322	0,2549	0,0026	0,0792	0,0909	0,0969	0,0335	0,0207	0,680
	Standardabweichung	0,0020	0,0516	0,0529	0,0007	0,0112	0,0682	0,0568	0,0099	0,0146	0,218
Borgerhau	Mittelwert	0,0153	0,0812	0,1823	0,0016	0,0730	0,0686	0,0700	0,0182	0,0125	0,512
	Standardabweichung	0,0034	0,0924	0,0299	0,0010	0,0050	0,0431	0,0119	0,0062	0,0030	0,103
Wippingen	Mittelwert	0,0158	0,0647	0,2828	0,0027	0,0714	0,0375	0,0681	0,0196	0,0107	0,500
	Standardabweichung	0,0031	0,0376	0,0939	0,0009	0,0050	0,0256	0,0055	0,0046	0,0019	0,111
Wittlingen	Mittelwert	0,0209	0,1767	0,2727	0,0033	0,0750	0,0338	0,0967	0,0468	0,0117	0,661
	Standardabweichung	0,0030	0,0511	0,0763	0,0013	0,0063	0,0135	0,0568	0,0123	0,0014	0,146
insgesamt	Mittelwert	0,0170	0,1112	0,2431	0,0024	0,0745	0,0585	0,0819	0,0286	0,0138	0,582
	Standardabweichung	0,0036	0,0768	0,0764	0,0012	0,0076	0,0477	0,0407	0,0144	0,0081	0,166

Tab. 34: Mittelwert und Standardabweichungen der Hauptelementoxide verschiedener Fundorte.

Fundort		Ba (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	V (ppm)	Eu (ppm)	Sm (ppm)	Yb (ppm)
Arnhofen	Mittelwert	64,99	61,10	24,43	2,86	7,27	3,61	1,29	16,19	0,65
	Standardabweichung	11,89	33,23	17,00	1,56	2,73	1,84	0,48	6,35	0,24
Borgerhau	Mittelwert	33,38	94,37	15,57	2,96	3,83	3,11	0,49	5,71	0,49
	Standardabweichung	7,87	33,19	10,81	1,32	1,94	2,47	0,17	2,23	0,30
Wippingen	Mittelwert	26,83	111,33	46,84	1,83	4,37	5,52	0,71	8,69	0,23
	Standardabweichung	11,29	34,82	16,11	1,78	2,93	3,84	0,27	3,38	0,18
Wittlingen	Mittelwert	34,71	142,13	52,80	3,48	5,61	4,75	0,89	11,11	0,32
	Standardabweichung	14,92	76,17	29,21	1,55	2,88	2,46	0,42	5,50	0,26
insgesamt	Mittelwert	39,47	101,63	33,42	2,80	5,16	4,16	0,82	10,06	0,43
	Standardabweichung	18,25	53,95	24,29	1,62	2,87	2,83	0,45	5,90	0,29

Tab. 35: Mittelwert und Standardabweichungen der Spurenelemente verschiedener Fundorte.

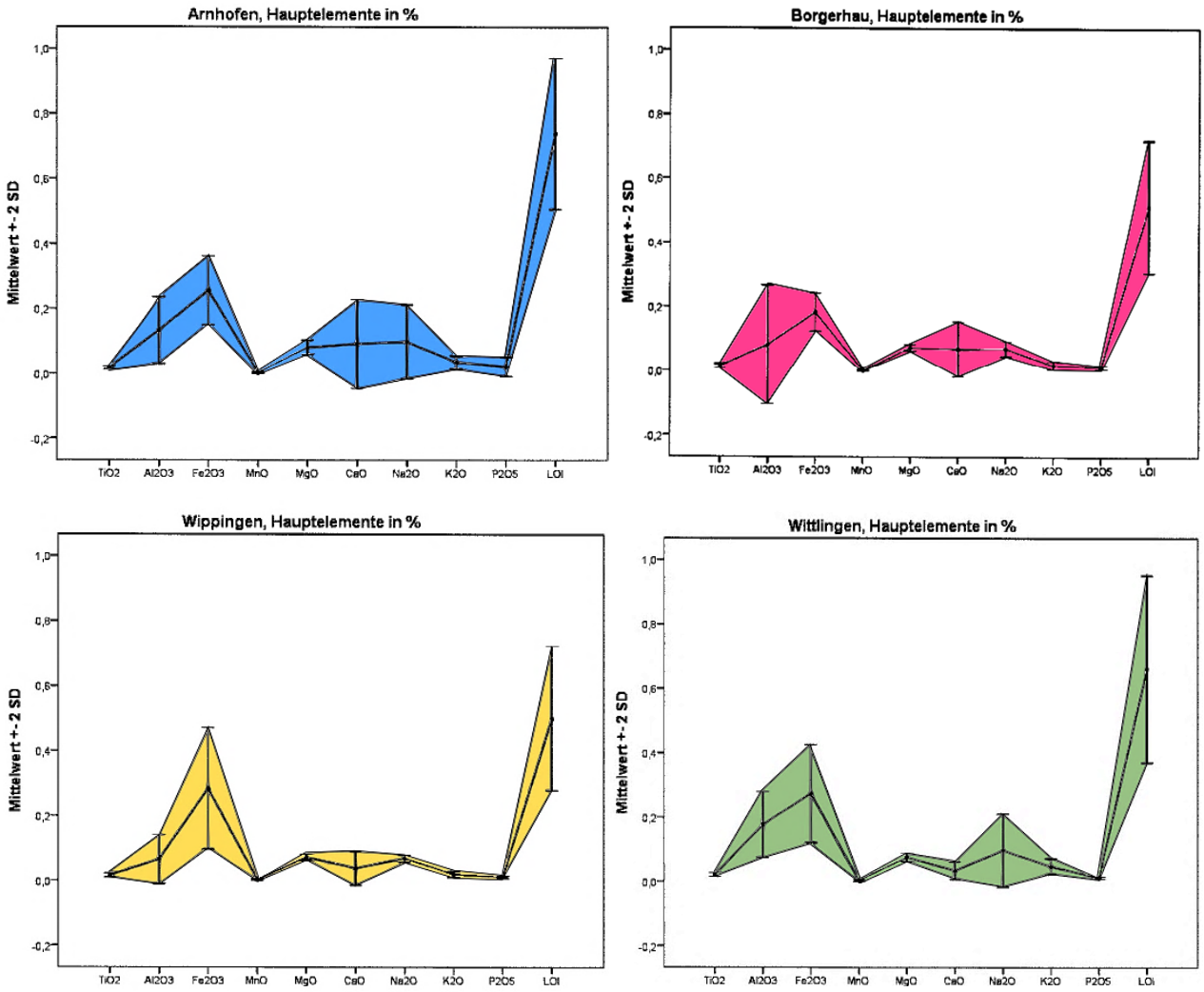


Abb. 103: Mittelwert und zwei Standardabweichungen (2 SD) der Hauptelemente verschiedener Fundorte. Zur besseren Sichtbarkeit der Unterschiede sind die 2 SD benachbarter Variablen in der Grafik verbunden.

Die Tabelle der Elementoxide und LOI (Tab. 34) und die Tabelle der Spurenelemente (Tab. 35), jeweils mit Mittelwert und Standardabweichung, zeigen deutlichere Unterschiede und im Allgemeinen, besonders ins Auge springend, die Grafiken der Haupt- und Spurenelemente (y-Achse: Mittelwert ± 2 SD ≙ $\overline{x} \pm 2s$) (Abb. 103; 104).

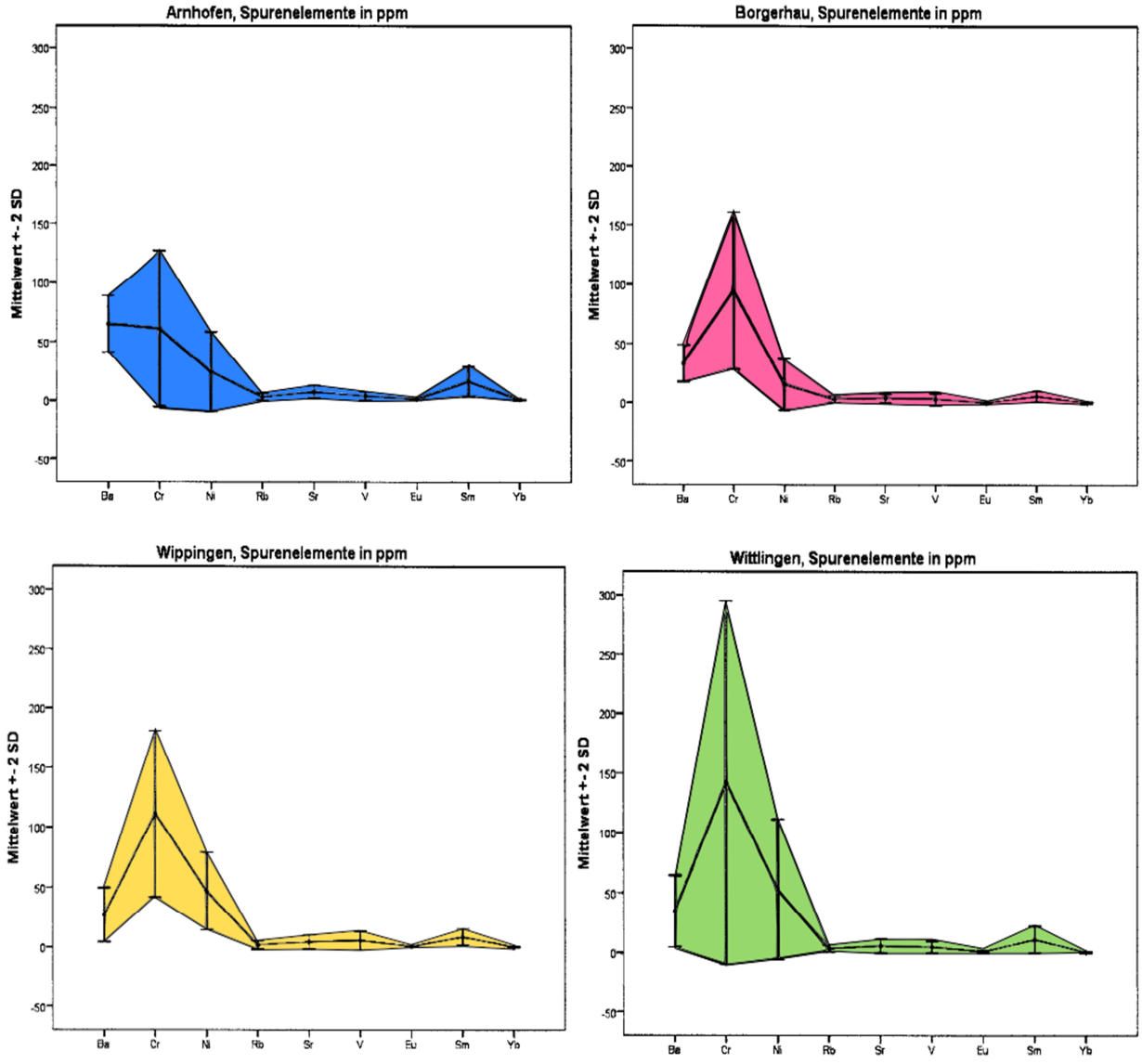


Abb. 104: Mittelwert und zwei Standardabweichungen (2 SD) der Spurenelemente verschiedener Fundorte. Zur besseren Sichtbarkeit der Unterschiede sind die 2 SD benachbarter Variablen in der Grafik verbunden.

Leider kommen Unterschiede der Standardabweichungen der Hauptelemente TiO_2, *MnO*, K_2O und P_2O_5 und der Spurenelemente *Rb*, *Sr*, *V*, *Eu* und *Yb* in den Grafiken nicht so deutlich heraus, da diese Standardabweichungen jeweils im Verhältnis zu den übrigen sehr niedrig sind[18]. Trotzdem sind sie sehr wichtig, wie sich noch zeigen wird (Tab. 34; 35).

[18] Die durchschnittlichen Standardabweichungen liegen bei den Elementoxiden TiO_2, *MnO*, *MgO*, K_2O, P_2O_5 < 0,02%, bei den Elementen *Rb*, *Sr*, *V*, *Eu*, *Yb* < 10 ppm.

Von den signifikant unterschiedlichen Mittelwerten verschiedener Fundortpaare haben die folgenden auch deutlich unterschiedliche Standardabweichungen des Mittelwertes[19]:

Arnh./Borg.: *Fe_2O_3, K_2O, LOI, Ba, Sr, Eu, Sm*
Arnh./Wipp.: *Al_2O_3, K_2O, LOI, Eu, Sm, Yb*
Arnh./Witt.: *TiO_2, CaO, Cr, Ni*
Borg./Wipp.: *Fe_2O_3, Ni, Sm, Yb*
Borg./Witt.: *Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, CaO, K_2O, LOI, Ni, Eu, Sm*
Wipp./Witt.: *Al_2O_3, K_2O, LOI*

Am günstigsten zur Trennung der verschiedenen Fundorte erwiesen sich hier *K_2O, LOI* und *Sm*. Sie eignen sich zur Trennung von jeweils vier der sechs Fundortpaare. Für drei Fundortkombinationen eignen sich *Al_2O_3, Fe_2O_3, Ni, Eu*.

Auch diese Unterschiede zwischen einzelnen Variablen weisen darauf hin, dass eine Trennung von Hornsteinen verschiedener Fundorte nicht ganz auszuschließen ist.

6.6 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse bestimmt die Beziehungen der einzelnen Variablen untereinander.

6.6.1 Korrelation in binären Diagrammen

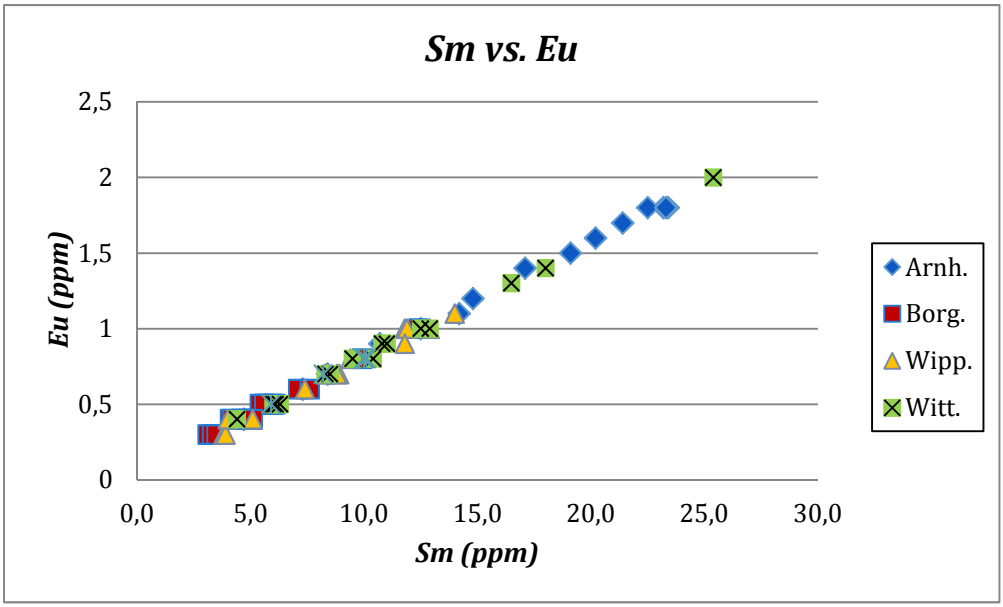


Abb. 105: Fast perfekte Korrelation von Eu und Sm an allen Fundorten.

Schon binäre Diagramme zeigten, dass zwischen einigen Elementoxiden und Elementen eine lineare Beziehung besteht; die Variablen aller Fundstellen liegen um die Diagonale angeordnet, was Hinweise darauf gibt, dass diese Elemente korrelieren (Abb. 105). Bei einer geringen

[19] Die Größe der deutlich unterschiedlichen Standardabweichungen der Mittelwerte wurde willkürlich festgelegt: sie weichen um > 20 % von der höheren Standardabweichung der Mittelwerte der jeweiligen Variablen der beiden betrachteten Fundorte ab.

Korrelation sind die Variablen dagegen in einem realtiv breiten Bereich oberhalb und unterhalb der Geraden gelegen (Köhler et al. 2007, 46). Für alle Fundorte (einschließlich der ungarischen) besteht eine solche lineare Beziehung zwischen Samarium und Europium (Abb. 105).

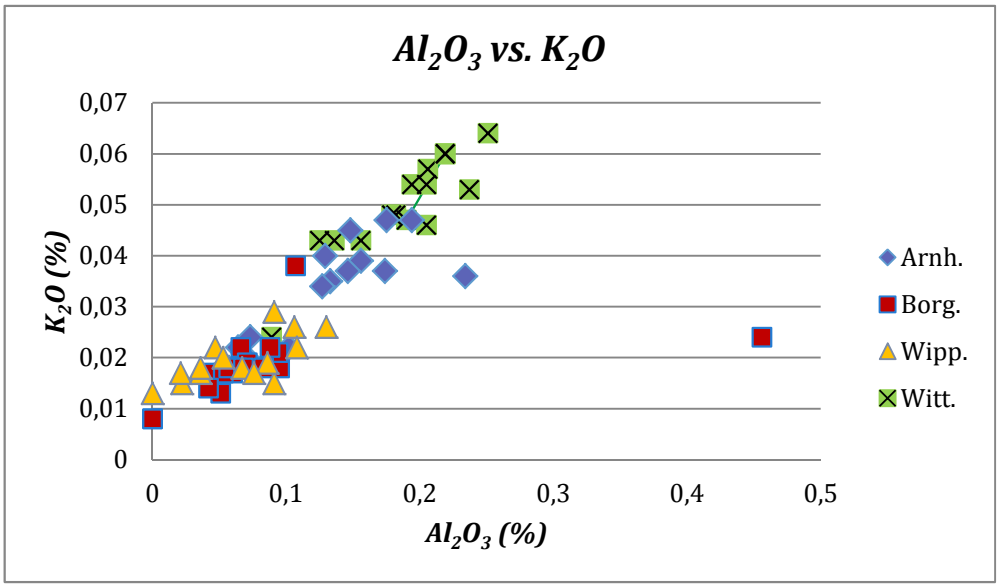


Abb. 106: Hohe Korrelation zwischen Al_2O_3 und K_2O an allen Fundorten.

Immer noch deutlich ist die Korrelation zwischen Al_2O_3 und K_2O (Abb. 106). Die Stärke der Korrelation ist jedoch an einzelnen Fundorten verschieden. Sie nimmt von „Borgerhau“ und Wippingen über Arnhofen nach Wittlingen zu. Auch hier fällt der Extremwert von Borg. 11 wieder deutlich heraus.
Außerdem korrelieren auch *Sm* und *Eu* jeweils mit *Sr*, wobei auch hier Wittlingen am stärksten korreliert. Die Diagramme von Al_2O_3 vs. K_2O (Abb. 106) und *Sm* vs. *Sr* zeigen durch ihre je Fundort dreiecksförmig angeordneten Punktwolken eine Zunahme der Varianz mit der Zunahme der Konzentration, also eine Varianzungleichheit (Heteroskedastizität) an (Backhaus et al. 2008, 85 f.).

6.6.2 Korrelationsanalyse nach Bravais und Pearson

Die Korrelationsanalyse misst Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhanges. Der Maßkorrelationskoeffizient r, der von Bravais und Pearson eingeführt wurde, errechnet sich aus der Abweichung vom Mittelwert von jeweils zwei Variablen desselben Hornsteins (Köhler et al. 2007, 47; Brosius 2011, 517). Der Maßkorrelationskoeffizient r ist folgendermaßen definiert (Köhler et al. 2007, 47):

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

x_i = Messwert der Variablen x am i-ten Hornstein
y_i = Messwert der Variablen y am i-ten Hornstein
$\bar{x}$ bzw. $\bar{y}$ = Mittelwerte der Variablen x und y

Die Stärke des linearen Zusammenhanges r ergibt eine Maßzahl zwischen -1 und +1 (Brosius 2011, 517). Das Vorzeichen von r ergibt sich aus der Steigung der Korrelationsgeraden. Wenn mit der Zunahme der Variablen x auch eine Zunahme der Variablen y verbunden ist, ist r positiv; wenn die Zunahme einer Variablen mit der Abnahme der anderen einhergeht, ist r negativ (Köhler et al. 2007, 49). Je größer der absolute Wert des Koeffizienten r ist, desto stärker ist der lineare Zusammenhang zwischen den Variablen (Brosius 2011, 521).

Die Korrelationsanalyse prüft lineare Zusammenhänge; bei nicht linearen Zusammenhängen von Variablen sind andere Ergebnisse zu erwarten, als wenn dieselben Variablen linear zusammenhängen würden (Brosius 2011, 517). Aus diesem Grund wurden alle Messdaten der WDRFA durch Logarithmieren linearisiert, wodurch exponentielle Beziehungen zwischen den Variablen in lineare überführt werden (Köhler et al. 2007, 68-71). Mit den transformierten Messwerten $\tilde{x} = \lg(x + 1)$ wurde die weitere Statistik durchgeführt (Köhler et al. 2007, 75) (Anhang D2).

Der Betrag des Korrelationskoeffizienten wird zur Interpretation in unterschiedliche Stufen unterteilt (Brosius 2011, 523). Folgende Interpretationen werden in der vorliegenden Arbeit verwendet:

Betrag des Korrelationskoeffizienten	**Interpretation**
0 – 0,2	keine bzw. sehr geringe Korrelation
0,2 – 0,5	geringe Korrelation
0,5 – 0,7	mittlere Korrelation
0,7 – 1	hohe Korrelation

Tab. 36: Definition der Beträge des Korrelationskoeffizienten r (verändert nach Brosius 2011).

In der SPSS-Tabelle im Anhang der Arbeit (E3 auf CD) befinden sich die Korrelationskoeffizienten für die gesamten untersuchten Hornsteine verschiedener Fundorte.

Außer der absoluten Höhe des Korrelationskoeffizienten ist vor allem die Frage, ob überhaupt ein signifikanter Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen vorliegt, von großer Bedeutung. Es geht dabei um die Frage, ob aus den Stichprobenwerten geschlossen werden kann, dass ein solcher linearer Zusammenhang in der Grundgesamtheit, also der Hornsteine eines Fundortes, besteht. Die Nullhypothese bedeutet hier, dass in der Grundgesamtheit kein Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen besteht. Bei einer in der Ergebnistabelle ausgewiesenen zweiseitigen Signifikanz von 0,000 begeht man mit der Ablehnung der Nullhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,000 bzw. 0,0 % einen Irrtum (Brosius 2011, 523 f.). Das bedeutet dann, anders ausgedrückt, dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % einen Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen gibt.

Die folgenden Diagramme (Abb. 107-111) signifikanter Beziehungen beschränken sich auf mittlere und hohe Korrelationen, in die Betrachtungen gehen vor allem die letzteren als die wichtigsten ein.

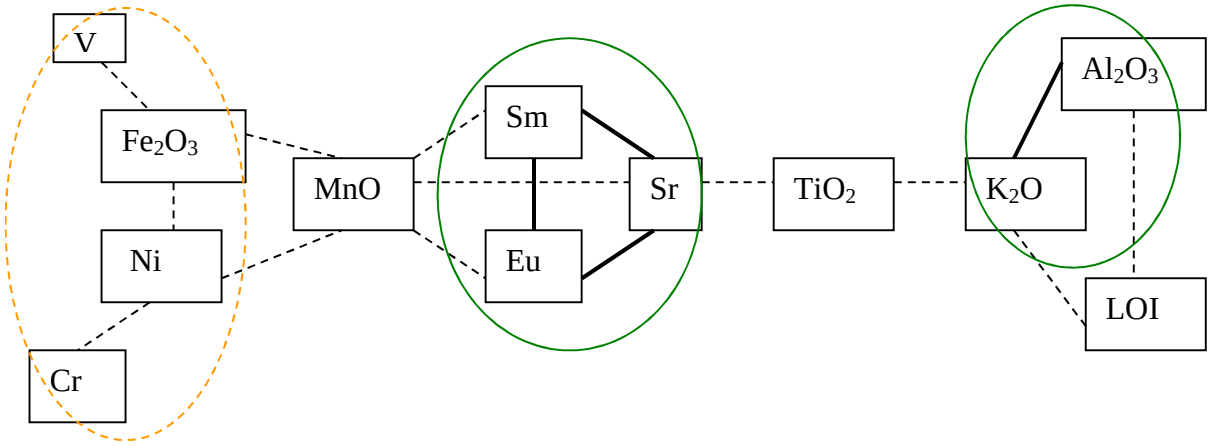


Abb. 107: Korrelationen aller für die Statistik verwendeten Hornsteine. Hohe Korrelation = durchgezogene Linie, mittlere Korrelation = gestrichelte Linie; grün umrahmt = hoch korrelierende Gruppe; gelb umrahmt = mittel korrelierende Gruppe.

Aus der Korrelationsmatrix der logarithmierten Variablenwerte aller für die Statistik verwendeten Hornsteinwerte (Abb. 107) ist ersichtlich, dass *Eu/Sm*, *Eu/Sr*, *Sm/Sr* und K_2O/Al_2O_3 signifikant positiv hoch korrelieren. Weitere Elemente korrelieren mittel und ebenfalls positiv.

Das Muster der Korrelationen für die Arnhofener Hornsteine (Abb. 108) unterscheidet sich deutlich von dem der gesamten Hornsteine.

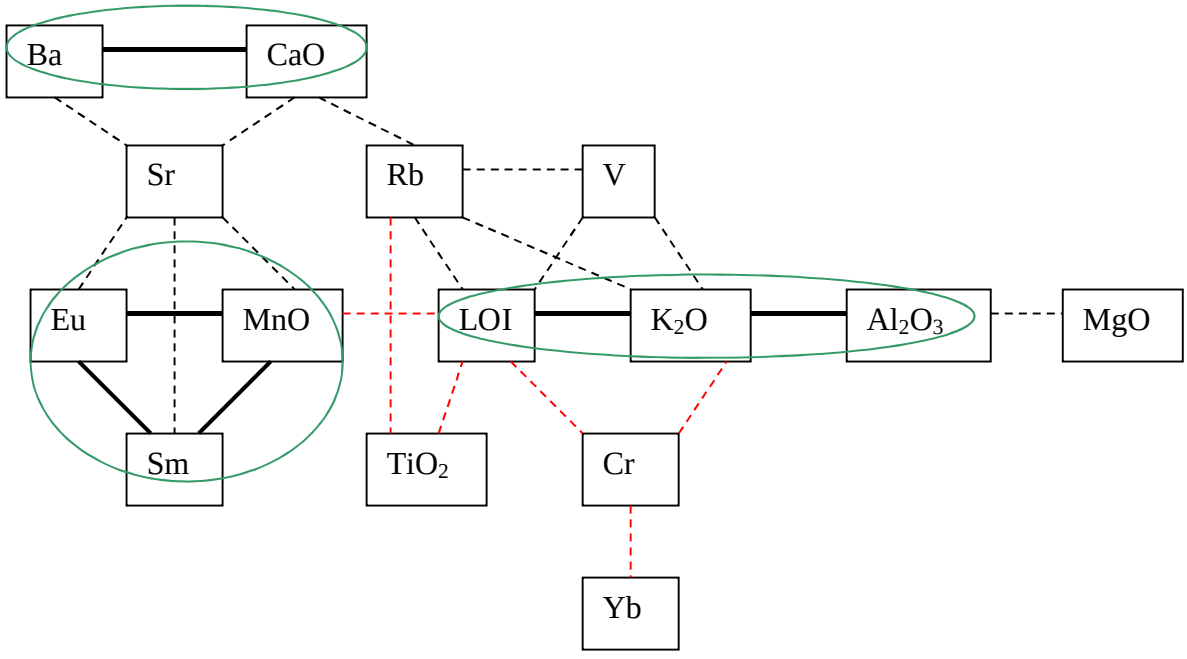


Abb. 108: Korrelationen der Hornsteine aus Arnhofen . Hohe Korrelation = durchgezogene Linie, mittlere Korrelation = gestrichelte Linie, schwarz = positiv, rot = negativ; grün umrahmt = hoch korrelierende Gruppe.

Hoch korrelieren in Arnhofen zwei Gruppen (wie bei den gesamten Hornsteinen), allerdings mit leichten Veränderungen: mit *Eu* und *Sm* korreliert hier *MnO* hoch und mit K_2O und Al_2O_3

der Verbrennungsverlust *LOI*, zusätzlich gibt es noch die hoch korrelierende Gruppe *Ba* und *CaO* (Abb. 108).

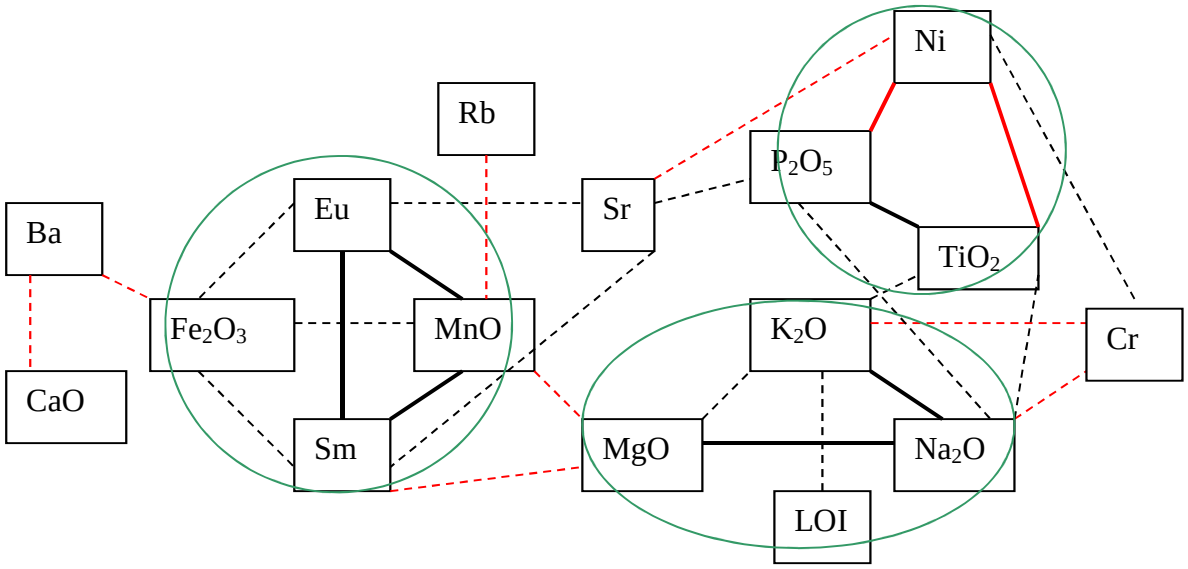


Abb. 109: Korrelationen der Hornsteine aus dem „Borgerhau“. Hohe Korrelation = durchgezogene Linie, mittlere Korrelation = gestrichelte Linie, schwarz = positiv, rot = negativ; grün umrahmt = hoch korrelierende Gruppe.

Im „Borgerhau“ gibt es im Wesentlichen drei hoch korrelierende Gruppen (Abb. 109). Die hoch korrelierende Gruppe um die *Seltenen Erden* mit *MnO* tritt hier ebenfalls auf. *K_2O* korreliert diesmal hoch mit *Na_2O* und dieses mit *MgO*. Außerdem korrelieren *P_2O_5* und *TiO_2* hoch und beide negativ hoch mit *Ni*.

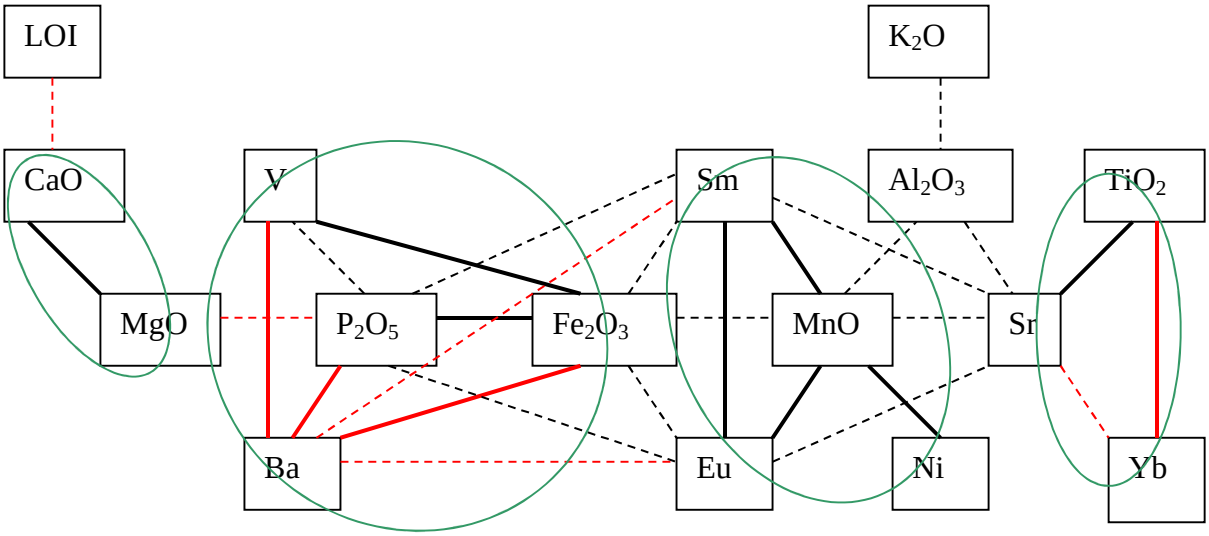


Abb. 110: Korrelationen der Hornsteine aus Wippingen. Hohe Korrelation = durchgezogene Linie, mittlere Korrelation = gestrichelte Linie, positiv = schwarz, negativ = rot; grün umrahmt = hoch korrelierende Gruppe.

In Wippingen gibt es vier Gruppen mit hoher Korrelation (Abb. 110). Die Gruppe der *Seltenen Erden* und *MnO* korrelieren zusätzlich hoch mit *Ni*. Eine weitere Gruppe bilden *MgO* und *CaO*. *TiO_2* korreliert hoch negativ mit *Yb* und positiv mit *Sr*. Ganz neu ist hier die positiv

hoch korrelierende Reihe von *V* mit Fe_2O_3 und dieses mit P_2O_5, alle drei Elemente und Elementoxide korrelieren hoch negativ mit *Ba*.

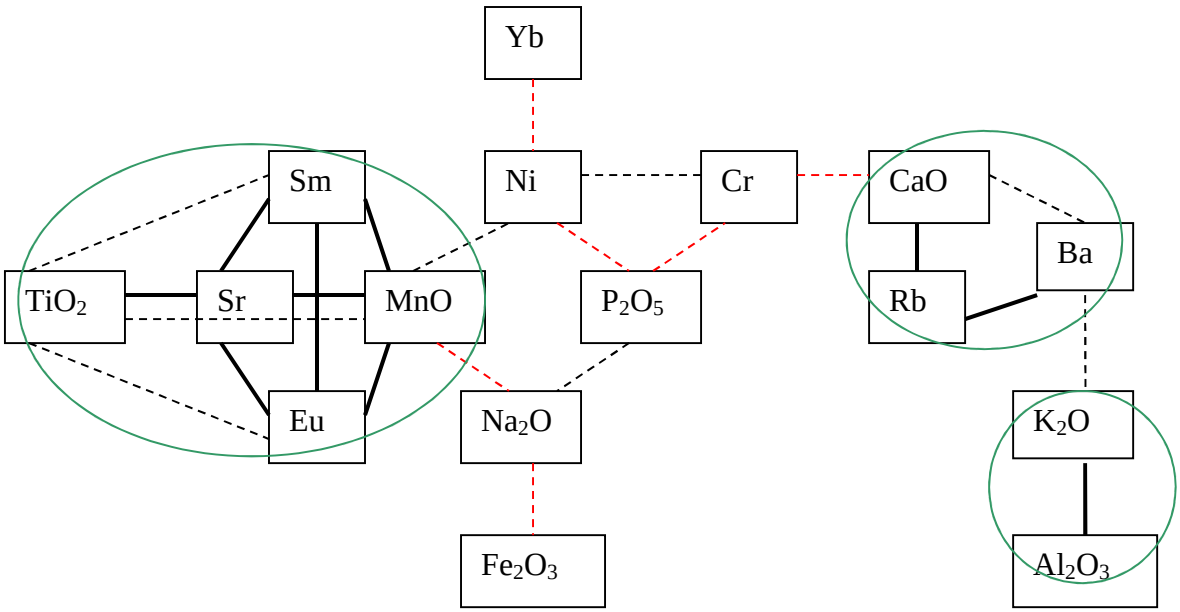


Abb. 111: Korrelationen der Hornsteine aus Wittlingen. Hohe Korrelation = durchgezogene Linie, mittlere Korrelation = gestrichelte Linie, positiv = schwarz, negativ = rot; grün umrahmt = hohe Korrelation.

Bei den Wittlinger Hornsteinen gibt es drei hoch korrelierende Gruppen (Abb. 111). Die Gruppe der *Seltenen Erden* mit *MnO* und *Sr* hat noch eine zusätzliche hohe Korrelation zwischen TiO_2 und *Sr*. Al_2O_3 korreliert wieder hoch mit K_2O wie in Arnhofen und den Hornsteinen insgesamt. Neu ist die Korrelationsreihe von *CaO* mit *Rb* und letzteres mit *Ba*.

Die Diagramme zeigen deutlich, dass es Gemeinsamkeiten an signifikanten hoch korrelierenden Beziehungen an allen vier Fundorten gibt. Überall gibt es hohe Korrelationen zwischen den Seltenen Erden *Sm* und *Eu* untereinander und zu *MnO*. An allen Fundorten, außer dem „Borgerhau“, bildet sich eine hoch korrelierende Gruppe um *CaO*. Eine weitere solche um K_2O findet man überall, außer in Wippingen.
Die Korrelationsdiagramme zeigen aber auch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Fundorten. So sind sehr unterschiedliche Gruppierungen um TiO_2 im „Borgerhau“, in Wippingen und Wittlingen zu beobachten. Einmalig ist die negative Korrelation von *Ba* zu Fe_2O_3, P_2O_5 und *V* in Wippingen. Unterschiede betreffen sowohl die Korrelationspartner, als auch die Stärke der Korrelation zwischen gleichen Variablen verschiedener Fundorte.

Neben der direkten Korrelation, die zum Beispiel zwischen Samarium und Europium auftritt, sind weitere Möglichkeiten zu unterscheiden. Die formale Korrelation, bei der sich zwei Faktoren immer zu 100 % ergänzen, kann bei dieser Untersuchung ausgeschlossen werden, vor allem deshalb, weil SiO_2 nicht in die Korrelationsanalyse aufgenommen wurde.
Den Korrelationsdiagrammen ist aber zu entnehmen, dass indirekte Korrelation über einen oder mehrere Zwischenfaktoren, Gemeinsamkeitskorrelation mit einem weiteren Faktor und

wechselseitige Abhängigkeit überaus häufig sind (Köhler et al, 2007, 50-52; Brosius 2011, 523).

Bei Zusammenhängen zwischen mehr als zwei Variablen gibt der Korrelationskoeffizient r aber nur Auskunft über die Stärke des Zusammenhangs von zwei Merkmalen. In einem solchen Fall wird r nur richtig geschätzt, falls es gelingt, die anderen Einflussfaktoren nahezu konstant zu halten (Köhler et al. 2007, 53). Aus diesem Grund kann sich die Stärke einer Korrelation im Verlauf der Faktoren- und der Diskriminanzanalyse durch Entfernung einzelner Elemente, LOI oder Elementoxide auch immer wieder ändern.

6.7 Zusammenfassung

Wie die Untersuchung der *Normalverteilung* der gesamten 65 Hornsteine gezeigt hat, waren nur 13 von 19 Variablen normalverteilt oder annähernd normalverteilt. Damit ist bei der großen Gesamtmenge an untersuchten Hornsteinen bereits der Beweis erbracht, dass es keine Grundgesamtheit aller Hornsteine der vier Fundorte gibt. Die 19 Variablen der Hornsteine verschiedener Fundorte, je 15 bzw. 20 Exemplare, sind dagegen normalverteilt oder annähernd normalverteilt, es handelt sich also um vier Grundgesamtheiten. Insgesamt gab es 6 % Ausreißer- und Extremwerte.

Mit der einfaktoriellen ANOVA wurden die *Mittelwerte* der Variablen von je zwei Fundorten verglichen und signifikante Unterschiede gesucht. Es fanden sich signifikante Mittelwertunterschiede:
- an keinem Fundortpaar für: *MgO, Na_2O, P_2O_5, Rb, V*;
- an drei Fundortpaaren für: *TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, Ba, Cr, Eu, Yb*;
- an vier Fundortpaaren für: *LOI, Ni, Sm*;
- an allen Fundortpaaren außer „Borgerhau"/Wippingen (ca. 2 km Entfernung) für: *K_2O*.

Mit Mittelwerten alleine sind die vier Hornstein-Fundorte nicht zu trennen, aber es zeigen sich teilweise signifikante Unterschiede.

Die Diagramme von *Mittelwert + doppelter Standardabweichung* weisen anschaulich auf Unterschiede zwischen den Fundorten hin.

Streudiagramme, vor allem von *Sm* gegen *Eu*, wiesen schon auf *Korrelationen* hin. Die Korrelationsanalyse nach Bravais und Pearson, die lineare Beziehungen der Variablen untereinander untersucht, zeigte dann auch für jeden Fundort ein eigenes typisches Korrelationsmuster. Dabei kamen drei oder vier hoch korrelierende Variablengruppen, immer wieder etwas variiert, an allen vier Fundorten vor:
- „Seltene Erden" mit *Sm, Eu, …*
- „Tonerdegruppe" mit *Al_2O_3, K_2O, …*
- „Erdalkaligruppe" mit *CaO, MgO, Ba,…*
- „Magmagruppe" mit *Ba, Yb*.

Fasst man die gesamten Untersuchungen zur Struktur der WDRFA-Daten noch einmal zusammen, so geht daraus hervor, dass *MgO, Na_2O, P_2O_5, Rb* und *V* keinen wesentlichen Beitrag zur Trennung der untersuchten Fundorte leisten können. Gute Trenneigenschaften für alle Hornsteine besitzen dagegen folgende Variablen: *K_2O, LOI, Ni, Sm, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, Ba, Cr, Eu* und *Yb*, die jedoch teilweise stark untereinander korrelieren, was bei einer Trennung stören kann. Die besten Trenneigenschaften können damit nach der Untersuchung der Datenstruktur acht der folgenden Variablen zugewiesen werden: *K_2O; LOI; Ni; Sm* oder *Eu; TiO_2; Fe_2O_3; Ba* oder *Yb; Cr*.

7 Trennung der Hornsteinfundorte durch multivariate statistische Methoden

Aufgrund der vielen Variablen und ihrer Beziehungen untereinander, der signifikanten Mittelwertunterschiede und der unterschiedlichen Varianzen bieten sich multivariate statistische Methoden wie die Faktorenanalyse, die Diskriminanzanalyse und die Clusteranalyse zur Trennung von Hornsteinfundorten an.

7.1 Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse basiert auf der Korrelationsanalyse. Ihre Entwicklung begann ab 1904 durch Spearman, an ihrer Weiterentwicklung war vor allem Thurstone (1931, 1947) beteiligt. Die heute am weitesten verbreitete Form der Faktorenanalyse, die Hauptkomponentenanalyse (PCA = **P**rincipal **C**omponent **A**nalysis), geht auf Hotelling (1933) und Kelly (1935) zurück (Bortz 2005, 514).

Die Faktorenanalyse ist ein Strukturen entdeckendes und Hypothesen generierendes Verfahren, das auch die Datenmenge reduzieren kann (Bortz 2005, 511-514). Sie sucht auf der Basis der Ergebnisse der Korrelationsanalyse für Gruppen von Variablen komplexe Hintergrundvariablen, die Faktoren oder Hauptkomponenten genannt werden (Brosius 2011, 787).

Da die einzelnen Fundorte, wie bereits gezeigt (s. Kapitel 6.6), unterschiedliche Korrelationsmuster zeigen, werden je Fundort zwei bis drei typische Faktoren gebildet, auf die einzelne Variablen unterschiedlich hoch laden. Da die Variablen, die auf einen Faktor hoch laden, weitaus die meisten Informationen enthalten, können die niedrig auf einen Faktor ladenden Variablen vernachlässigt und so die Variablenzahl reduziert werden (Backhaus et al. 2008, 324; Pfretzschner Vorlesungsskript 2009; Brosius 2011, 789-791; 801).

7.1.1 Grundlegendes zur Faktorenanalyse

Zur Ermittlung der Faktoren aus den Variablen geht die Faktorenanalyse von der grundlegenden Annahme aus, dass sich jeder Beobachtungswert (Messwert) einer Ausgangsvariablen x_i als Linearkombination mehrerer (hypothetischer) Faktoren p nach folgender mathematischen Gleichung beschreiben lässt (Backhaus et al. 2008, 338):

$$x_{ik} = a_{i1} * p_{k1} + a_{i2} * p_{k2} + ... + a_{iq} * p_{kq}$$

i = Variablen
k = Hornstein
a = Gewichtung bzw. Faktorenladung beim Elementoxid, LOI oder Element i, z. B. für Faktor 1 a_{i1}, für Faktor 2 a_{i2}…, für Faktor q a_{iq}
p = Faktor (p_1…. p_q)

Die Faktorladung a_{iq} gibt an, wieviel ein Faktor mit einer Ausgangsvariablen zu tun hat (Backhaus et al. 2008, 338).

Zum Beispiel kann der Messwert x für Al_2O_3 des Hornsteins Borg. 10, $x_{Al2O3,\ Borg.\ 10}$ = 0,456 %, bei drei gewählten Faktoren zerlegt werden in:

$$x_{Al2O3,\ Borg.\ 10} = a_{1\,Al2O3} * p_{1\,Borg.\ 10} + a_{2\,Al2O3} * p_{2\,Borg.\ 10} + a_{3\,Al2O3} * p_{3\,Borg.\ 10} < 0,456\ \%.$$

Statistisch können Faktorladungen deshalb als Korrelationskoeffizienten zwischen dem Faktor p und der Variablen i aufgefasst werden. Statistikprogramme schätzen dann in der Faktorenextraktion mit Hilfe des Fundamentaltheorems der Faktorenanalyse von Thurstone die Faktorenwerte (Backhaus et al. 2008, 338).
Durch die Bildung von Faktoren aus Mittelwerten und die geringe Zahl der zu extrahierenden Faktoren wird bewusst ein Verlust an erklärter Varianz in Kauf genommen. Der Umfang der Varianzerklärung, den die Faktoren gemeinsam für eine Ausgangsvariable liefern, wird als Kommunalität bezeichnet (Backhaus et al. 2008, 327).

Zu Beginn der Faktorenanalyse sollte die Korrelationsmatrix zunächst statistisch auf ihre Eignung überprüft werden (Backhaus et al. 2008, 330; Brosius 2011, 791). Das wichtigste Maß für die Stichprobeneignung der in die Faktorenanalyse einbezogenen Variablen ist der MSA-Wert (**M**easure of **S**ampling **A**dequacy). Er basiert, wie bei der Korrelationsanalyse, auf den Korrelationskoeffizienten r von Variablenpaaren. Der Grad der Korrelation zwischen den Variablen ist folgendermaßen definiert:

$$MSA_i = \frac{\Sigma\, r_{ij}^2}{\Sigma\, r_{ij}^2 + \Sigma\, a_{ij}^2} \qquad \text{für } i \neq j$$

r_{ij} = Korrelationskoeffizient zwischen den Variablen i und j
a_{ij} = Partieller Korrelationskoeffizient zwischen den Variablen i und j, wenn der Einfluss aller übrigen Variablen ausgeschaltet wird (Brosius 2011, 796).

Für jede Variable i wird der MSA-Wert für die Stichprobeneignung berechnet und ist in der Hauptdiagonalen der Anti-Image-Korrelations-Matrix ablesbar (Anhang E4.1). Er sollte jeweils über 0,6 liegen, muss aber mindestens 0,5 betragen (Backhaus et al. 2008, 336 f.; Brosius 2011, 794-796). Variablen mit einem MSA-Wert < 0,5 sollten in der Faktorenanalyse unberücksichtigt bleiben, da sie mit den übrigen nur sehr geringe Korrelationen aufweisen (Brosius 2011, 791). Der Ausschluss dieser Variablen sollte jedoch sukzessive nach jeweiliger Prüfung der MSA- und KMO-Werte erfolgen (Backhaus et al. 2008, 337).

Die Gesamtvarianz einer Variablen lässt sich in einen jeweils durch die andere Variable erklärbaren Teil (Image) und einen nicht erklärbaren Teil (Anti-Image) unterteilen. Die Anti-Image-Korrelationsmatrix enthält die negativen Werte der partiellen Korrelationskoeffizienten. Bei einem niedrigen Anti-Image-Wert zweier Variablen besteht demnach eine hohe Korrelation, diese Werte sollten deshalb sehr klein sein (Backhaus et al. 2008, 335 f.; Brosius 2011, 794 f.).

Damit auch das **K**aiser-**M**eyer-**O**lkin-Kriterium (KMO), welches auf dem MSA-Wert basiert, deutlich über 0,5 liegt, werden stufenweise jeweils die Variablen mit dem niedrigsten MSA-Wert für Stichprobeneignung heraus genommen, solange bis alle verbliebenen Variablen das MSA-Kriterium erfüllen (Backhaus et al. 2008, 336 f.; Brosius 2011, 795 f.).

Das KMO-Kriterium ist ≤ 1 und folgendermaßen definiert (Brosius 2011, 795):

$$\mathrm{KMO} = \frac{\Sigma\,\Sigma\,r_{ij}^2}{\Sigma\,\Sigma\,r_{ij}^2 \;+\; \Sigma\,\Sigma\,a_{ij}^2}$$

Der KMO-Wert wird wie der MSA-Wert berechnet mit dem Unterschied, dass er sich auf alle Variablen insgesamt anstatt lediglich jeweils auf eine Variable bezieht (Brosius 2011, 795 f.).

KMO-Test	
Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin	0,708

Tab. 37: KMO-Test auf Stichprobeneignung für die Variablen der Hornsteine aus Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen (ohne Al_2O_3 und CaO).

Die MSA-Werte für alle Variablen (außer CaO und V) aller Hornsteine aus Arnhofen, dem „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen liegen oberhalb von 0,6 (Anhang E4.1). Das KMO-Maß beträgt 0,708 (Tab. 37) und wird als mittel angesehen (Brosius 2011, 796).

Die für die Faktorenanalyse jedes Hornsteinfundortes gewählten wichtigen Variablen sind jeweils in der Tabelle „rotierte Komponentenmatrix“ zu finden (7.1.2 und 7.1.3). Sie enthält die Faktorladungen der einzelnen Variablen für die rotierten Faktoren. Dabei wurden nur Variablen berücksichtigt, bei denen r > 0,5 ist und die somit mittel bis hoch auf einen Faktor laden. Da Faktoren Kunstgebilde sind, können sie verzerrungsfrei transformiert werden. Bei der Rotation wird die Lage, aber nicht der Winkel $\alpha = \cos r$ der im Koordinatensystem angeordneten Faktoren durch Drehen der Achsen verändert und so auch im Diagramm leichter interpretierbar (Brosius 2011, 791; 804).

7.1.2 Faktorenanalyse der untersuchten Hornsteine insgesamt

Bei der Interpretation der Faktoren (Tab. 38) beschränkt sich diese Arbeit überwiegend auf die hoch auf den jeweiligen Faktor ladenden Variablen (≥ 0,7).

Auf Faktor 1 laden *Sm* und *Eu*, *MnO* und *Sr*. Sm^{3+} und Eu^{3+} sind chemisch sehr homogen und können sich gegenseitig ersetzen, *Sr* und *Eu* ebenfalls, da Sr^{2+} und Eu^{2+} gleiche Ladung und ähnlichen Radius haben. Zunächst erstaunt, dass *Sr* und *Sm* auf denselben Faktor hoch laden, da *Sm* eher selten Sm^{2+}-Ionen bildet (Hollemann & Wiberg 2007, 1928-1945). Die Ursache dafür muss eine überwiegend indirekte Korrelation sein: *Sm* → *Eu* → *Sr*. Da Mangan auch im Gestein verschiedene Ladungen haben kann, vor allem Mn^{2+} und Mn^{3+} und in MnO_2 die Oxidationszahl +IV hat, trägt es mit zum Ladungsausgleich dieser Gruppierung bei. Faktor 1 bei allen Hornsteinen wird in der vorliegenden Arbeit vereinfachend „Seltene Erden“ genannt.

Auf Faktor 3 laden Al_2O_3 und K_2O hoch. Es sind Bestandteile der Tonerde, wie zum Beispiel Glaukonit $(Na,K)(Fe^{3+},Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$, wobei Al^{3+} mengenmäßig gegenüber K^+ in der Tonerde dominiert (Markl 2008, 64; 66; 597). Diese Gruppierung bekommt, ebenfalls vereinfachend, den Namen „Tonerde“.

Rotierte Komponentenmatrix

	Komponente		
	1	2	3
Eu	0,927		
Sm	0,925		
MnO	0,817		
Sr	0,784		
Fe_2O_3	0,582		
Cr		-0,730	
Ni		-0,704	
Yb		0,697	
Ba		0,683	
P_2O_5		0,554	
MgO			
Na_2O			
K_2O			0,909
Al_2O_3			0,818
LOI			0,615
Rb			0,589
TiO_2			0,513

Tab. 38: Jeweils hoch auf einen Faktor ladende Variablen = Hauptkomponenten der statistisch untersuchten Hornsteinfundorte: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse; Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

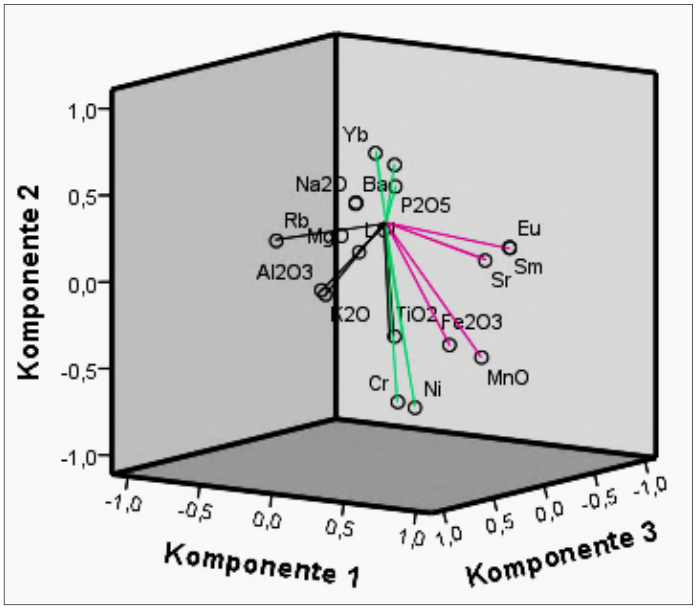


Abb. 112: Hauptkomponenten aller statistisch untersuchten Hornsteinfundorte (ohne Ungarn und Grund) nach Rotation im dreidimensionalen Raum: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün mit Cr und Ni, die stark negativ zu Yb, Ba und P_2O_5 korrelieren; Faktor 3 schwarz.

Auf Faktor 2 laden Chrom und Nickel negativ hoch. Eine mittelstark korrelierende Gruppe der Korrelationsanalyse (Abb. 107) aus Eisen, Nickel, Vanadium und Chrom legt den Gedanken nahe, dass es sich dabei um Sägeblattabrieb handeln könnte. Dagegen spricht allerdings, dass diese Gruppe keineswegs mit den anderen Variablen negativ korreliert. Ein möglicher Sägeblattabrieb müsste außerdem stark verdünnt sein aufgrund des Aussägens von jeweils ca. 20 g Hornstein und der Verwendung von jeweils nur 1,5 g in der RFA. Die Tabelle der fünf besonders harten Hornsteine mit einer Sägezeit von 3 bis 4 Stunden (Tab. 39) zeigt ebenfalls, dass es keinen deutlichen Einfluss des Sägeblattes auf die Konzentrationen von Fe_2O_3, *Cr*, *Ni* und *V* gibt.

	Fe_2O_3 (%)	*Cr* (ppm)	*Ni* (ppm)	*V* (ppm)
Borg. Ø	0,183	94,4	18,3	4,4
Borg. 10	0,217	7,2	0	5,5
Borg, 13	0,155	83,5	18,8	0
Wipp. Ø	0,283	111,3	46,8	5,5
Wipp. 1	0,172	122,4	5,0	5,0
Witt. Ø	0,273	142,1	56,6	4,8
Witt. 8	0,283	275,4	106,9	4,8
Witt. 14	0,236	146,9	67,5	0

Tab. 39: Konzentration von Fe_2O_3, Cr, Ni und V bei besonders harten Hornsteinen mit besonders langer Sägezeit.

Faktor 2 erklärt dagegen: je weniger Chrom und Nickel, desto mehr Barium und Ytterbium enthält der Hornstein durchschnittlich und umgekehrt. Barium ist ein seltenes Element, es kommt vor allem in hydrothermalen Erzgängen und auch magmatisch in Karbonatiten vor (Markl 2008, 46). Yb-haltiges Xenotim $(Y,Yb)PO_4$ ist ein häufiges akzessorisches Mineral in Magmatiten (Markl 2008, 48). Diese Gruppierung bekommt vereinfachend den Namen „Magma“.

Die Tabelle „erklärte Gesamtvarianz“ (Tab. 40) für alle statistisch untersuchten Hornsteine, gibt für jeden Faktor (Komponente) die Eigenwerte sowie den Anteil an erklärter Varianz in der anfänglichen und in der rotierten Lösung an. Der Eigenwert gibt an, welcher Betrag der Gesamtstreuung aller beobachteten Variablen durch diesen Faktor erklärt wird (Brosius 2011, 797). Es wurden jeweils die drei Faktoren mit dem höchsten Erklärungswert berücksichtigt (zusammen > 50 %) (A. Kögel, zdv Tübingen mündlich Mai 2011).

	Anfängliche Eigenwerte			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
Komponente	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	4,954	29,143	29,143	4,039	23,758	23,758
2	3,454	20,317	49,460	3,312	19,484	43,242
3	1,964	11,556	61,016	3,022	17,774	61,016
4	1,153	6,783	67,799			
5	,939	5,521	73,320			
6	,800	4,707	78,027			
7	,754	4,436	82,463			
8	,643	3,779	86,242			
9	,627	3,689	89,931			
10	,486	2,859	92,791			
11	,404	2,377	95,168			
12	,224	1,315	96,483			
13	,212	1,249	97,732			
14	,165	,973	98,705			
15	,133	,780	99,485			
16	,086	,507	99,992			
17	,001	,008	100,000			

Tab. 40: Erklärte Gesamtvarianz aller statistisch untersuchten Hornsteine. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

7.1.3 Faktorenanalyse der Hornsteine einzelner Fundorte

Wie nachfolgend zu sehen ist und was zu vermuten war, unterscheiden sich die Ergebnisse der Faktorenanalyse der einzelnen Fundorte ebenfalls wie bei der Korrelationsanalyse. Die Faktorenanalysen wurden nach denselben Prinzipien wie bei den Hornsteinen insgesamt durchgeführt. Es wurde stets darauf geachtet, dass der KMO-Wert > 0,600 (Anhang E4.3), der MSA-Wert für alle aufgenommenen Variablen > 0,500 (Anti-Image-Matrizen: Anhang E4.1) und < 50 % der Residuen > 0,05 waren. Residuen geben die Abweichungen zwischen dem Korrelationskoeffizienten und der auf der Basis der Faktorladungen geschätzten Korrelation wieder (Brosius 2011, 802).

Rotierte Komponentenmatrix

	Komponente		
	1	2	3
K_2O	0,940		
Al_2O_3	0,866		
LOI	0,751		
Rb	0,744		
V	0,728		
Ba		0,952	
CaO		0,938	
Sr		0,709	0,519
Eu			0,976
Sm			0,976

Tab. 41: Hauptkomponentenanalyse der Hornsteine aus Arnhofen: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse; Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

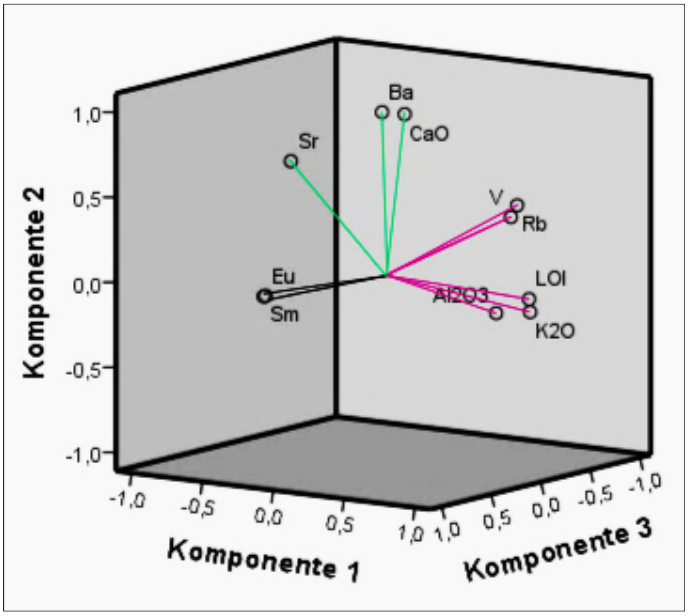


Abb. 113: Hauptkomponenten der Hornsteine aus Arnhofen nach Rotation im dreidimensionalen Raum: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz.

In *Arnhofen* (Tab. 41; Abb. 113) lädt der wichtigste Faktor, Faktor 1, auf „Tonerde“ mit Al_2O_3 und K_2O als wichtigsten Variablen. Zusätzlich lädt *LOI*, vor allem Carbonat, relativ stark auf diesen Faktor. Die Konzentration an *LOI* und damit vor allem an negativ geladenem Carbonat ist in Arnhofen von allen vier Fundorten am höchsten und korrelliert mit dem hier stark positiv geladenen Faktor 1. Faktor 2 lädt stark auf Barium, Calcium und Strontium, was aufgrund einer starken Korrelation zwischen *Ba* und *Ca* und einer mittleren mit Strontium zu vermuten war (Abb. 108). Nachfolgend wird diese Gruppe „Kalk“-Gruppe genannt. Die Ionen der Erdalkalimetalle haben stets eine 2^+-Ladung. Faktor 3 lädt auf die bereits bekannte „Seltene Erden“-Gruppe mit *Eu* und *Sm*. Hohe Korrelationen der „Magma“-Gruppe fehlen.
Die Eigenwerte und die Gesamtvarianz für die Hornsteine aus Arnhofen befinden sich im Anhang E4.2.

Der wichtigste Faktor im *„Borgerhau“* (Tab. 42; Abb. 114) lädt wiederum hoch auf die „Seltene Erden“-Gruppe, diesmal wiederum mit *Sm, Eu, MnO* und Fe_2O_3. Faktor 3 enthält von der „Tonerde“- Gruppe nur K^+, es fehlt Al^{3+}, das im „Borgerhau“ und in Wippingen durchschnittlich deutlich seltener als in Arnhofen und Wittlingen vorkommt. Wie schon die Korrelationen

zeigen (Abb. 109), lädt Faktor 3 dafür hoch auf Na^+ und mittel auf Mg^{2+}, um die fehlenden positiven Ladungen auszugleichen, aber auch auf *LOI*. Eines der Minerale, in denen K^+, Na^+ und Mg^{2+} gleichzeitig vorkommen, ist Glaukonit $(Na,K)(Fe^{3+},Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$ (Markl 2008, 64; 597). Faktor 2 lädt nur mit *Ni* negativ hoch auf die fehlende „Magma"-Gruppe. Zusätzlich lädt er hoch auf *Sr* und P_2O_5. Eigenwerte und Gesamtvarianz befinden sich im Anhang E4.2.

Rotierte Komponentenmatrix[a]

	Komponente		
	1	2	3
Sm	0,921		
Eu	0,904		
MnO	0,886		
Fe_2O_3	0,761		
Ni		-0,901	
P_2O_5		0,798	
Sr	0,624	0,729	
TiO_2		0,655	0,616
Rb		0,622	
K_2O			0,870
Na_2O			0,777
LOI			0,698
MgO	-0,506		0,685

Tab. 42: Hauptkomponenten der Hornsteine aus dem „Borgerhau": Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse; Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

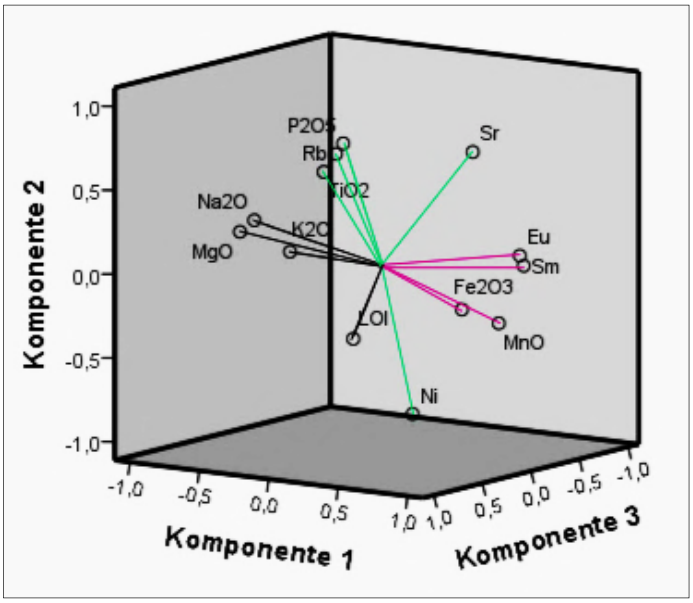


Abb. 114: Hauptkomponenten der Hornsteine aus dem „Borgerhau" nach Rotation im dreidimensionalen Raum: Faktor 1 pink, Faktor 2 grün, Faktor 3 schwarz.

Rotierte Komponentenmatrix

	Komponente		
	1	2	3
Ba	-0,929		
V	0,885		
P_2O_5	0,853		
Fe_2O_3	0,836		
Sr		0,947	
TiO_2		0,881	
Eu		0,737	
Sm		0,734	
Ni			0,936
LOI			0,699
MnO		0,564	0,681

Tab. 43: Hauptkomponenten der Hornsteine aus Wippingen: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz. Extraktionsmethode: Hauptkompontenanalyse; Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

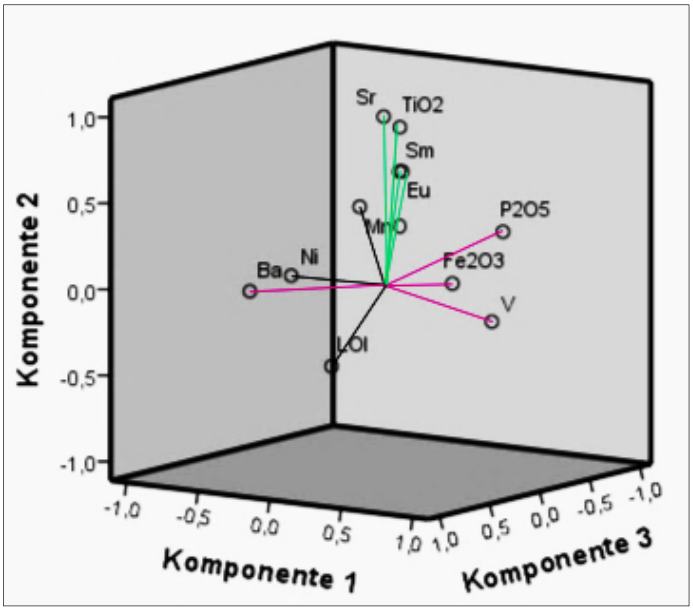


Abb. 115: Hauptkomponenten der Hornsteine aus Wippingen nach Rotation im dreidimensionalen Raum: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz.

In *Wippingen* (Tab. 43; Abb. 115) lädt Faktor 1 hoch auf die „Magma“-Gruppe mit Ba und zusätzlich *V* und P_2O_5, worauf auch die Korrelationsgrafik hinweist (Abb. 110). *Ba* korreliert auch wieder negativ mit den anderen Variablen, ist also nur vermehrt von Bedeutung, wenn diese in geringerem Umfang vorhanden sind. Faktor 2 lädt hoch auf die „Seltenen Erden“ mit *Eu, Sm*, außerdem auch auf *Sr* und TiO_2. Interessant ist, dass allerdings nur in der Korrelationsgrafik (Abb. 110) TiO_2 negativ hoch mit *Yb* korreliert, einem neben *Ba* ebenfalls magmatischen Element, was die These des magmatischen Ursprungs von *Yb* stützen könnte. Faktor 3 lädt hoch auf *Ni*. Eigenwerte und Gesamtvarianz befinden sich im Anhang E4.2.

Rotierte Komponentenmatrix[a]

	Komponente		
	1	2	3
Sr	0,939		
Sm	0,927		
Eu	0,926		
MnO	0,864		
TiO2	0,782		
Al2O3		0,877	
K2O		0,876	
Cr		-0,687	
Ba			0,911
Rb			0,886

Tab. 44: Hauptkomponenten der Hornsteine aus Wittlingen: Faktor 1 pink; Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse; Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

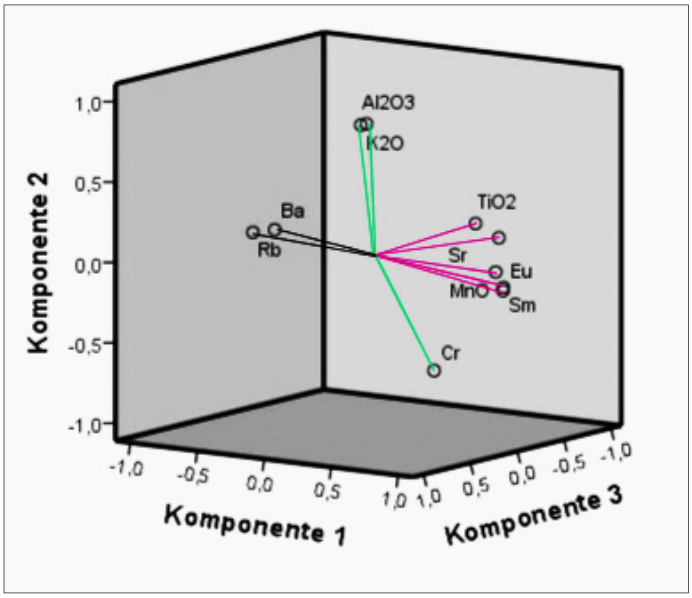


Abb. 116: Hauptkomponenten der Hornsteine aus Wittlingennach Rotation im dreidimensionalen Raum: Faktor 1 pink;Faktor 2 grün; Faktor 3 schwarz.

Faktor 1 in *Wittlingen* (Tab. 44; Abb. 116) lädt wieder hoch auf die „Seltene Erden“-Gruppe mit *Sm, Eu,* ferner *Sr, MnO* und auch TiO_2. Faktor 2 lädt hoch auf die „Tonerde“-Gruppe und Faktor 3 ebenfalls hoch auf *Ba* und *Rb*, die in der Korrelationsgrafik mit *CaO* mittel und stark korrelieren (Abb. 111). *Ba* und *CaO* im Korrelationsdiagramm sind wohl Reste der „Kalk“-Gruppe. Eigenwerte und Gesamtvarianz befinden sich im Anhang E4.2.

Die Faktorenanalysen der Hornsteine zeigen, dass es an allen vier Fundorten im Wesentlichen vier Gruppen gibt, die innerhalb ihrer Gruppe stark korrelieren und dadurch hoch auf einen Faktor laden. Die „Kalk“-Gruppe mit zweifach positiv geladenen *Ca*- und *Ba*-Ionen und die „Tonerde“ mit Al^{3+}- und K^{+}-Ionen gleichen vor allem die negativ geladenen Kieselsäurereste aus. Am höchsten korrelieren an allen Fundorten die „Seltenen Erden“, untereinander und mit *Sr*, häufig auch mit Mangan. Sie sind im Wesentlichen in der Lage durch Oxidation oder Reduktion und einem damit verbundenen Wechsel der positiven Ionenladungen vorhandene negative Ladungen auszugleichen.
Interessant ist die „Magma“-Gruppe um *Ba* und *Yb*, die zwischen *Cr* und *Ni* positiv und zwischen *Cr* bzw. *Ni* und jeweils *Ba* und *Yb* negativ hoch korrelierend, vollständig nur in der

Faktorenanalyse aller Hornsteine auftritt. Arnhofen hat die höchste durchschnittliche Konzentration an *Ba* und *Yb* und könnte damit am meisten magmatisches Material enthalten. Dort besagt die mittlere Korrelation überwiegend: je mehr *Yb*, desto weniger *Cr*. Wippingen dagegen hat die niedrigste durchschnittliche Konzentration an *Ba* und *Yb* und könnte damit am wenigsten magmatisches Material von allen Hornsteinen enthalten.

Die drei linearen Faktoren-Gleichungen jedes Fundortes enthalten den größten Teil der chemischen Informationen der Grundgesamtheit jedes Fundortes. An einzelnen Fundorten fallen die folgenden Faktoren und die am stärksten damit korrelierenden Variablen besonders auf:
- Arnhofen: „Erdalkali-Gruppe“ mit *Ba*
- „Borgerhau“: die Nickel- Phosphat-Strontiumgruppe mit *Ni*
- Wippingen: die Strontium-Titanoxidgruppe mit Sr, ferner eine Gruppe mit *LOI, MnO_2* und *Ni*
- Wittlingen: die „Seltene-Erden-Gruppe“ mit *Sr*

Die am stärksten auf einen Faktor ladenden Variablen tragen jeweils auch den größten Teil der Information des Faktors. Diese Variablen sind hier noch einmal zusammengestellt:

	Eu	*K_2O*	*Ba*	*Ni*	*Cr*	*Sr*	*Al_2O_3*
alle 4 Fundorte	x	x			x		
Arnhofen	x	x	x				
Borgerhau	x	x		x			
Wippingen			x	x		x	
Wittlingen			x			x	x

Tab. 45: Variablen mit dem höchsten Informationsgehalt an den einzelnen Fundorten.

Die am stärksten auf einen Faktor ladenden Variablen unterscheiden sich an den einzelnen Fundorten, sie ergeben ebenfalls typische Fundortmuster (Tab. 45). In dem man die Variablen auf die am höchsten auf einen Faktor ladenden Elementoxide oder Elemente beschränkt, hat man die wichtigsten Variablen, die sich zur Trennung der untersuchten Fundorte eignen, das sind: *Al_2O_3, K_2O, Ba, Cr, Ni, Sr, Eu*. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass von stark korrelierenden Paaren jeweils nur eine Variable in einen reduzierten Datensatz aufgenommen wird. So muss hier *Al_2O_3* durch *K_2O* wegen hoher Korrelation ersetzt werden, so dass *K_2O, Ba, Cr, Ni, Sr, Eu* für eine Variablenreduktion besonders geeignet erscheinen. Es spricht aber auch nichts dagegen, dass einzelne Variablen durch ähnlich hoch auf denselben Faktor ladende Variablen ersetzt werden können.

7.1.4 Vergleich der Faktorenmittelwerte der vier Fundorte mittels ANOVA

Ohne allzu großen Verlust konnten in der Faktorenanalyse die Informationen von jeweils 19 Variablen je Fundort auf die Gleichungswerte von jeweils drei Faktoren, die Regressionsfaktoren 1 bis 3 (REGR factor score 1-3), reduziert werden. Sie enthalten den größten Teil der chemischen Information der vier Fundstellen (Backhaus et al. 2008, 358-360). Im Gegensatz zum Korrelationsfaktor, der die Stärke des Zusammenhangs mathematisch-statistisch fasst,

enthält der Regressionsfaktor die Art des Zusammenhangs der Variablen (Köhler et al. 2007, 43).

Von dem reduzierten Datensatz der Regressionsfaktoren 1 bis 3 aller vier Hornsteinfundorte wurden die Faktorenmittelwerte wie in Kapitel 6.4 einer einfaktoriellen ANOVA (**A**nalysis **O**f **V**ariance) unterzogen. Auch hier ist die Voraussetzung homogener Varianzen (Homoskedastizität) nicht erfüllt (Levene-Test), deshalb wurde wieder der Tamhane-T2-Test verwendet, der keine Varianzgleichheit erfordert.

ONEWAY deskriptive Statistiken

		N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler	95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert	
						Untergrenze	Obergrenze
REGR factor score 1 for analysis 10	Arnhofen	15	0,7914	0,93407	0,24117	0,2742	1,3087
	Borgerhau	20	-0,7971	0,54245	0,12130	-1,0510	-0,5432
	Wippingen	15	0,0513	0,77024	0,19888	-0,3753	0,4778
	Wittlingen	15	0,2201	1,03576	0,26743	-0,3535	0,7937
REGR factor score 2 for analysis 10	Arnhofen	15	1,1991	0,73741	0,19040	0,7907	1,6075
	Borgerhau	20	0,1777	0,43823	0,09799	-0,0274	0,3828
	Wippingen	15	-0,6840	0,44837	0,11577	-0,9323	-0,4357
	Wittlingen	15	-0,7520	0,93441	0,24126	-1,2695	-0,2345
REGR factor score 3 for analysis 10	Arnhofen	15	0,1527	0,90011	0,23241	-0,3457	0,6512
	Borgerhau	20	-0,5123	0,69245	0,15484	-0,8364	-0,1883
	Wippingen	15	-0,6516	0,41482	0,10711	-0,8813	-0,4219
	Wittlingen	15	1,1820	0,76596	0,19777	0,7578	1,6061

Tab. 46: Statistische Werte der Regressionsfaktoren 1 bis 3 der untersuchten Hornsteinfundorte.

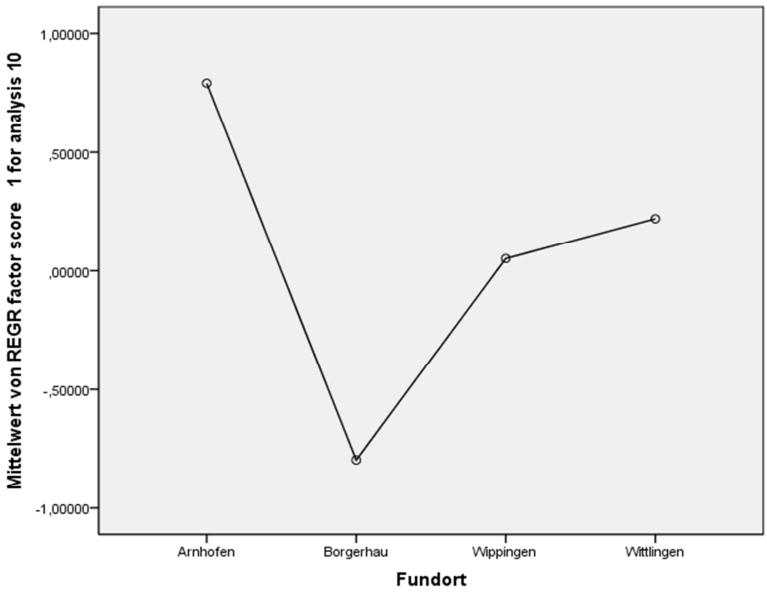


Abb. 117: Mittelwerte von Regressionsfaktor 1 für die vier Hornsteinfundorte.

Die deskriptive Statistik zeigt, dass sich die Mittelwerte der Regressionsfaktoren 1 bis 3 (REGR factor score 1-3) jeweils wieder an allen Fundorten unterscheiden (Tab. 46). Trägt man die Regressionsfaktorenmittelwerte einzeln gegen die Fundorte auf, fallen diese Unterschiede besonders stark auf (Abb. 117-119).
Allerdings sind auch die Standardabweichungen vom Mittelwert sehr hoch, was starke Streuungen anzeigt und zu Schwierigkeiten bei der Trennung führen könnte.

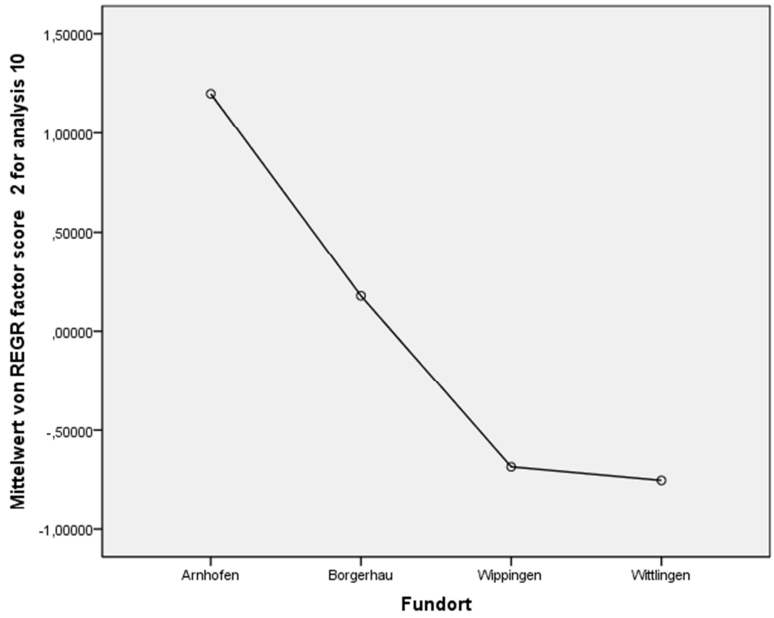


Abb. 118: Mittelwerte von Regressionsfaktor 2 für die vier Hornsteinfundorte.

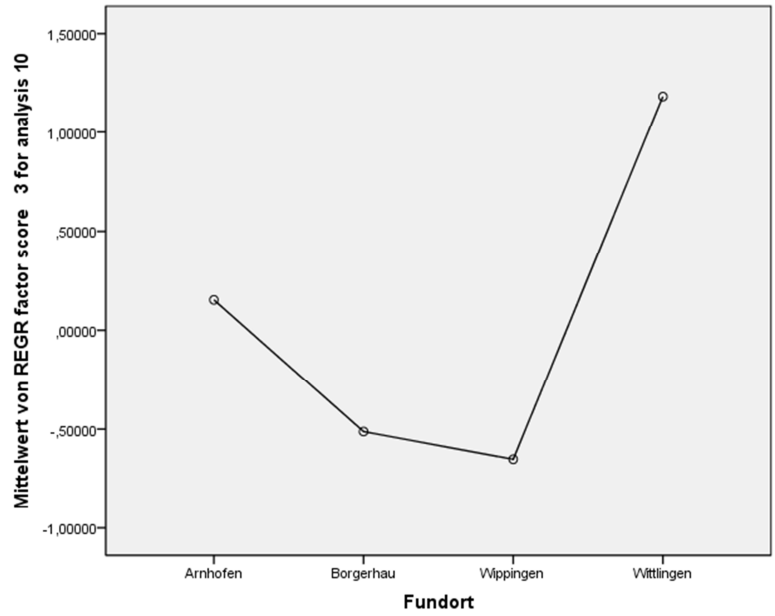


Abb. 119: Mittelwerte von Regressionsfaktor 3 für die vier Hornsteinfundorte.

Mit Hilfe der Tabelle 47 wurde durch Mehrfachvergleiche untersucht, ob sich die Mittelwerte der drei Regressionfaktoren jeweils eines Fundortpaares signifikant trennen lassen.

Mehrfachvergleiche

Tamhane

Abhängige Variable	(I) Fundort	(J) Fundort	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95 %-Konfidenzintervall Untergrenze	95 %-Konfidenzintervall Obergrenze
REGR factor score 1 for analysis 10	Arnhofen	Borgerhau	1,58855348*	0,26996	0,00	0,8049	2,3722
		Wippingen	0,74014426	0,31260	0,14	-0,1470	1,6273
		Wittlingen	0,57134355	0,36012	0,55	-0,4487	1,5913
	„Borgerhau“	Wippingen	-0,84840921*	0,23295	0,01	-1,5162	-0,1806
		Wittlingen	-1,01720993*	0,29365	0,02	-1,8752	-0,1592
	Wippingen	Wittlingen	-0,16880072	0,33327	1,00	-1,1179	0,7803
REGR factor score 2 for analysis 10	Arnhofen	Borgerhau	1,02136997*	0,21414	0,00	0,4007	1,6421
		Wippingen	1,88313328*	0,22283	0,00	1,2423	2,5240
		Wittlingen	1,95108084*	0,30734	0,00	1,0777	2,8245
	„Borgerhau“	Wippingen	0,86176331*	0,15167	0,00	0,4346	1,2890
		Wittlingen	0,92971087*	0,26040	0,01	0,1639	1,6956
	Wippingen	Wittlingen	0,06794756	0,26760	1,00	-0,7123	0,8482
REGR factor score 3 for analysis 10	Arnhofen	Borgerhau	0,66507616	0,27926	0,14	-0,1312	1,4613
		Wippingen	0,80433955*	0,25590	0,03	0,0565	1,5522
		Wittlingen	-1,02923087*	0,30517	0,01	-1,8946	-0,1639
	„Borgerhau“	Wippingen	0,13926338	0,18827	0,98	-0,3889	0,6675
		Wittlingen	-1,69430703*	0,25117	0,00	-2,4042	-0,9844
	Wippingen	Wittlingen	-1,83357042*	0,22491	0,00	-2,4847	-1,1825

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Tab. 47: Signifikante Mittelwert-Differenzen (grün) der drei Regressionsfaktoren verschiedener Fundortkombinationen.

Während sich die mittleren Differenzen des Regressionsfaktors 1 nur bei der Hälfte der Fundortkombinationen deutlich unterscheiden, sieht das für Regressionsfaktor 2 (REGR factor score 2) ganz anders aus (Tab. 47). Die mittleren Differenzen des Regressionsfaktors 2 unterscheiden sich signifikant für fünf von sechs möglichen Fundortkombinationen: Arnhofen/Borgerhau, Arnhofen/Wippingen, Arnhofen/Wittlingen, Borgerhau/Wippingen, Borgerhau/Wittlingen, aber *nicht* für Wippingen/Wittlingen (Tab. 47). Der Regressionsfaktor 2 reicht nicht für eine signifikante Trennung der Faktorenmittelwerte verschiedener Fundorte aus. Dafür trennt die mittlere Fundortdifferenz von Regressionsfaktor 3 (REGR factor score 3) Wippingen und Wittlingen signifikant (Tab. 47; Abb. 119).

Das zeigt auch ein binäres Diagramm der Mittelwerte der Regressionsfaktoren 2 und 3 (Abb. 120).

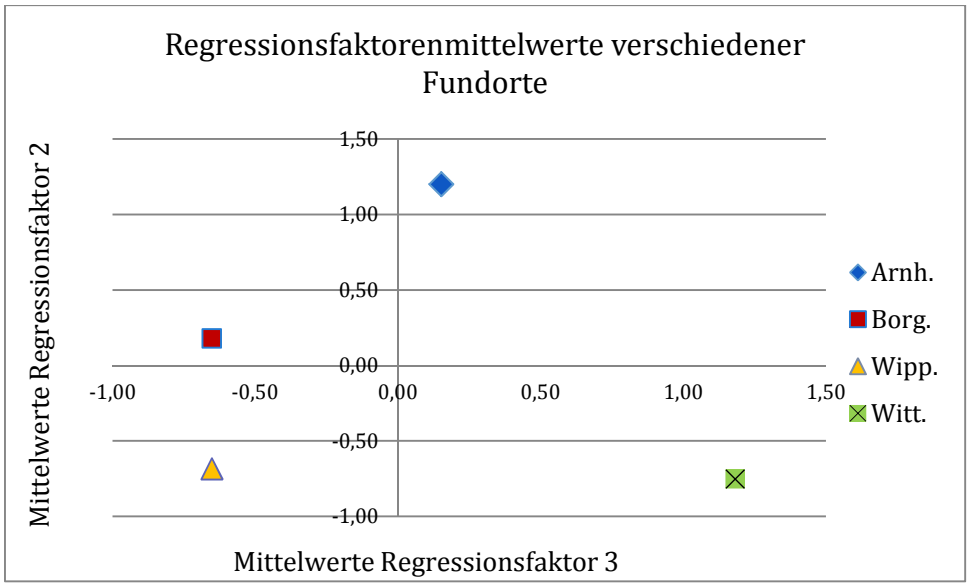


Abb. 120: Trennung der vier Fundorte auf der Basis der Mittelwerte der Regressionsfaktoren 2 und 3.

Während die Mittelwerte der Regressionsfaktoren 2 und 3 für Arnhofen und Wittlingen weit von einander und von „Borgerhau“ und Wippingen getrennt liegen, sind die von Wippingen und „Borgerhau“ relativ dicht beeinander, was auch ihrer räumlichen Nähe entspricht (Abb. 120).

Die insgesamt relativ großen Standardabweichungen von 0,41 bis 0,93 lassen befürchten, dass es zu Überlappungen der Punktwolken der Regressionsfaktorenwerte der Hornsteine der einzelnen Fundorte kommen könnte. Das zeigt dann auch Abb. 121. Dort wurden die Cluster für die einzelnen Fundorte um die Regressionsfaktorenmittelwerte mit doppelter Standardabweichung eingezeichnet. Mit 95 % Wahrscheinlichkeit ist damit zu rechnen, dass sich die Regressionsfaktorenwerte für die einzelnen Hornsteine innerhalb der farbig eingezeichneten Cluster befinden. Das war auch größtenteils der Fall. Sieben Hornsteine bildeten eine Ausnahme (10,8 % der hier betrachteten Hornsteine). Es sind die durch schwarze Kreise gekennzeichneten sieben Hornsteine: Arnh. 11, Borg. 2, Borg. 10, Borg. 11, Wipp. 9, Witt.1, Witt. 8. Diese fielen bereits früher durch Ausreißer- und/oder Extremwerte auf (s. Kapitel 6.3).

Abb. 121 zeigt, dass trotz signifikanter Mittelwertunterschiede der Regressionsfaktoren 2 und 3 keine klare Trennung von Hornsteinen nach Fundorten auch mit dem etwas reduzierten Informationsgehalt der Regressionsfaktoren 2 und 3 möglich ist. Es ist offensichtlich, dass die Ursache dafür die starke Streuung der Regressionsfaktorwerte, und damit letztlich der Variablen, innerhalb eines Fundortes ist.

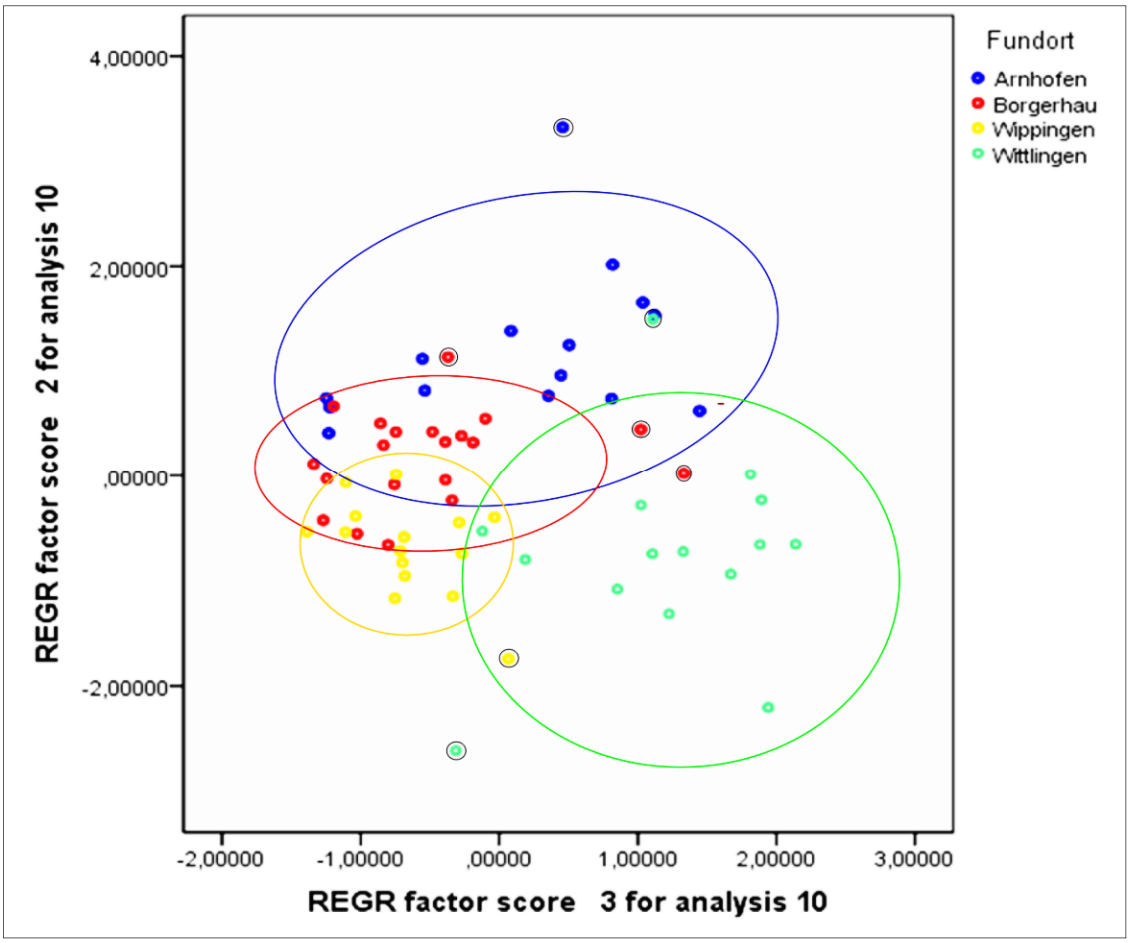


Abb. 121: Versuch einer Trennung der vier Fundorte aufgrund der Faktorwerte der einzelnen Hornsteine. Cluster um die Regressionsfaktorenmittelwerte mit doppelter Standardabweichung für die einzelnen Fundorte wurden farbig umrahmt. Sieben Hornsteine, die sich außerhalb der 95 % Aufenthaltswahrscheinlichkeit für ihren Fundort befanden, sind schwarz umrahmt.

7.2 Diskriminanzanalyse

Im Gegensatz zur Faktorenanalyse, durch die Hornsteine verschiedener Fundorte aufgrund verschiedener Korrelationsmuster der Variablen (Elementoxide, LOI, Elemente), den Faktoren, getrennt werden sollen, bewertet die Diskriminanzanalyse die Konzentrationen der Variablen (Elementoxide, LOI, Elemente) direkt auf ihre Eignung für eine mögliche Zuordnung zu bestimmten Fundorten (vgl. Bergs 1981, 5-7; Backhaus et al. 2008, 182 f. ; 324).
Nach Backhaus et al. (2008, 182) ist „Die Diskriminanzanalyse … ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppenunterschieden. Sie ermöglicht es, die Unterschiedlichkeit von zwei oder mehreren Gruppen hinsichtlich einer Mehrzahl von Variablen zu untersuchen.“ Es handelt sich um ein strukturen-prüfendes Verfahren (Backhaus et al. 2008, 182). „Ziel der Diskriminanzanalyse ist es, die Werte einer abhängigen (zu erklärenden) Variablen [*hier: Fundorte*] durch die Werte einer oder mehrerer unabhängiger (erklärender) Variablen [*hier:* Elementoxid-, LOI- und Elementkonzentrationen] zu erklären“ (Brosius 2011, 649). Dazu müssen zunächst die Zusammenhänge zwischen Fundorten und Elementoxid-, LOI- und Elementkonzentrationen aufgedeckt und algebraisch formuliert werden. Danach versucht die

Diskriminanzanalyse eine Zuordnung von Hornsteinen zu einem von mehreren alternativen Fundorten vorzunehmen (Brosius 2011, 649).
Durch die Diskriminanzanalyse soll geklärt werden, ob sich die Fundorte signifikant hinsichtlich der Variablen voneinander unterscheiden und welche Variablen zur Unterscheidung zwischen den Gruppen geeignet sind. Besonders interessant ist dann auch die Frage, welchem Fundort ein Hornstein, dessen Gruppenzugehörigkeit nicht bekannt ist, aufgrund seiner Merkmalsausprägungen zuzuordnen ist (Backhaus et al. 2008, 182).

7.2.1 Schritte der Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse lässt sich nach Backhaus et al. (2008, 181-239) und Brosius (2011, 649-692) in zwei Schritte unterteilen.
Im *ersten Schritt* werden für die Trennung der vier Fundstellen drei Diskriminanzfunktionen = Trennfunktionen D geschätzt. Diese sind linear und haben die allgemeine Form:

$$D = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + ... + b_n * x_n$$

D = kanonische Variable
x_i = erklärende Variablen (Elementoxide, LOI, Elemente)
b_i = Diskriminanzkoeffizient für die Merkmalsvariable i
b_0 = konstantes Glied

Aus dieser Gleichung wird die kanonische Variable D für jeden einzelnen Hornstein D_{gi} berechnet. Jeder Fundort (Gruppe) lässt sich dann durch seinen mittleren Diskiminanzwert, $\overline{D}_g$ = Centroid, beschreiben (Backhaus et al. 2008, 186f.):

$$\overline{D}_g = \frac{1}{I_g} \sum_{i=1}^{I_g} D_{gi}$$

I_g = Hornsteine eines Fundortes
D_{gi} = Diskriminanzwert der einzelnen Hornsteine einer Gruppe

Da das Programm der Diskriminanzanalyse von einer diskreten Gruppenzugehörigkeit, hier der Hornsteine zu bestimmten Fundorten, ausgeht, verwendet es zur Schätzung der Koeffizienten b_i eine Methode, die einen Zusammenhang zwischen den Funktionswerten D einerseits und der Zuordnung zu den Fundorten wahrscheinlich macht (Brosius 2011, 650 f.).
Die Koeffizienten der Diskriminanzfunktion b_0 bis b_n werden vom Statistikprogramm SPSS so gewählt, dass das Diskriminanzkriterium (QSZ dividiert durch QSI) maximal wird. Dadurch wird die Streuung der Variablen verschiedener Fundorte (Gruppen) einbezogen (Backhaus et al. 2008, 187-190; Brosius 2011, 650 f.):

$$\frac{QSZ}{QSI} = \frac{\text{Quadratsumme der Funktionswerte zwischen den Gruppen}}{\text{Quadratsumme der Funktionswerte innerhalb der Gruppen}} = \frac{\sum_{g=1}^{G} I_g(\overline{D}_g - \overline{D})^2}{\sum_{g=1}^{G}\sum_{i=1}^{Ig}(D_{gi} - \overline{D}_g)^2}$$

$\overline{D}_g$ = Gruppencentroid
$\overline{D}$ = Gesamtmittel
I_g = Hornsteine eines Fundortes
D_{gi} = Diskriminanzwert der einzelnen Hornsteine einer Gruppe

Die Streuung zwischen den Fundorten wird durch die quadrierten Abweichungen der Fundort-Centroide $\overline{D}_g$ vom Gesamtmittel $\overline{D}$ gemessen, für jeden Fundort gesondert. Um unterschiedliche Hornsteinmengen je Fundort zu berücksichtigen, werden die Abweichungen jeweils mit der Gruppengröße I_g multipliziert. Die Streuung innerhalb der Fundorte wird durch die quadrierten Abweichungen der Diskriminanzwerte der einzelnen Hornsteine D_{gi} vom jeweiligen Gruppencentroid gemessen (Backhaus et al. 2008, 189).
Damit ist auch die Gesamtstreuung SS nach Backhaus et al. (2008, 189 f.) folgendermaßen definiert:

Gesamtstreuung SS =	SS_b (=QSZ)	+	SS_w (=QSI)
	Streuung zwischen den Gruppen		Streuung innerhalb der Gruppen
	= erklärte Streuung		= nicht erklärte Streuung

Diese Vorgehensweise bewirkt, dass die resultierenden Funktionswerte der Diskriminanzfunktionen („Scores“) für die einzelnen Hornsteine, die unterschiedlichen Fundorten angehören, möglichst weit auseinander liegen (Brosius 2011, 651).

Der *zweite Schritt* nimmt eine Unterteilung der Hornsteine in verschiedene Gruppen, die Fundorte, vor. Das Ergebnis der Diskriminanzanalyse ist jedoch keine klare Gruppenzuordnung, sondern vielmehr ein „Score“, ein Funktionswert, der einen Hinweis darauf gibt, welcher Fundstelle ein Hornstein am wahrscheinlichsten angehört (Brosius 2011, 650 f.).
Die vorgenommenen Zuordnungen der einzelnen Hornsteine zu den verschiedenen Fundorten können dann mit den tatsächlichen Gruppenzugehörigkeiten tabellarisch und auch grafisch verglichen werden.

7.2.2 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse wurde nach zwei Verfahren durchgeführt, jeweils mit drei bzw. zwei Funktionen: zum einen mit allen verwendeten 19 Variablen, zum anderen mit selektiv ausgewählten sechs Variablen.
Die nicht standardisierten und die standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten dazu befinden sich im Anhang E5.3 und E5.4, ebenso wie die daraus resultierenden Strukturmatrices E5.5 und die Funktionen der Gruppencentroide E5.6.

7.2.2.1 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit allen Variablen

Tabelle 48 zeigt das Ergebnis mit *drei Diskriminanzfunktionen*:

	Fundort	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
		Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	
Anzahl	Arnhofen	15	0	0	0	15
	Borgerhau	0	20	0	0	20
	Wippingen	0	2	13	0	15
	Wittlingen	0	0	2	13	15
%	Arnhofen	100	0	0	0	100
	Borgerhau	0	100	0	0	100
	Wippingen	0	13,3	86,7	0	100
	Wittlingen	0	0	13,3	86,7	100

93,8 % der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert

Tab. 48: Ergebnisse der Zuordnung von Hornsteinen und Fundorten durch Diskriminanzanalyse für alle verwendeten 19 Variablen und 3 Funktionen. Vier Hornsteine wurden nicht den angegebenen Fundorten zugewiesen.

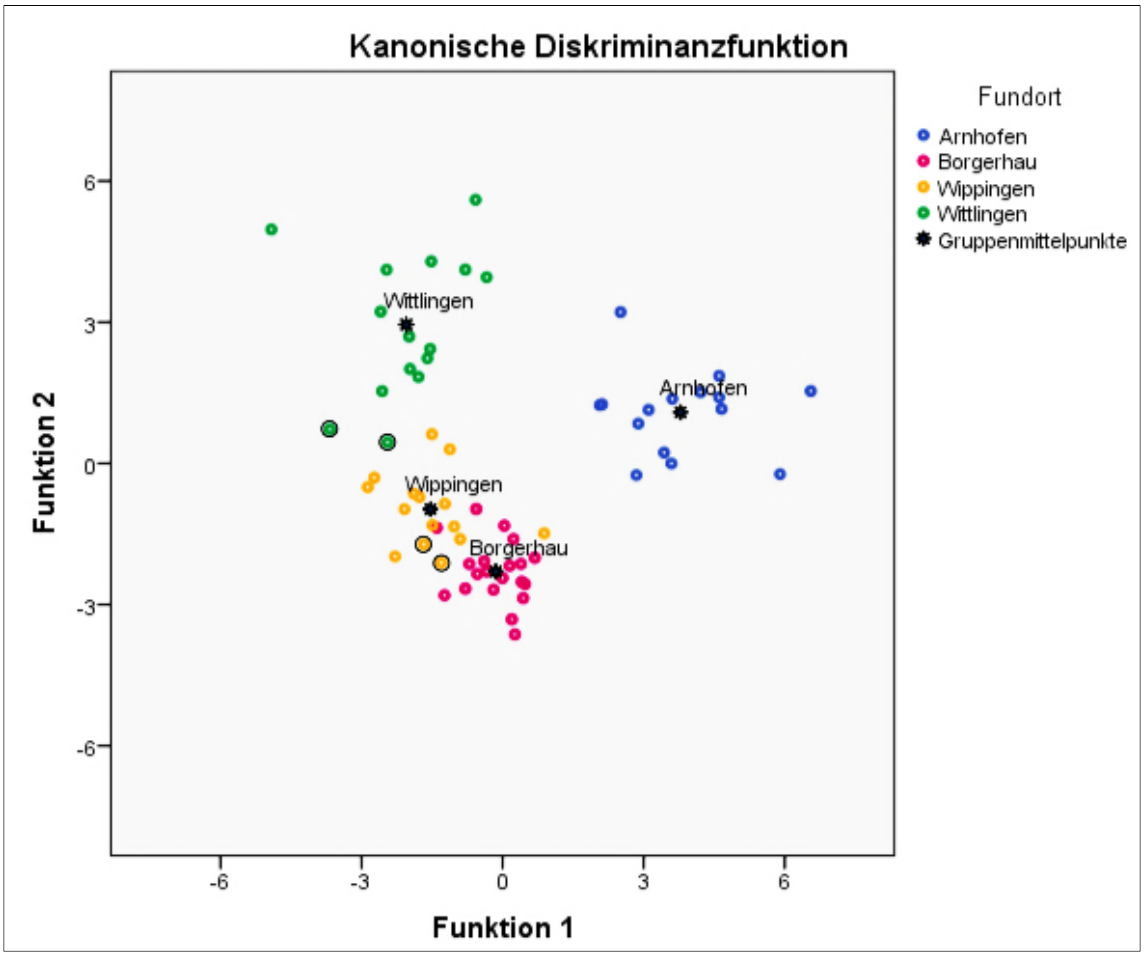


Abb. 122: Graphische Darstellung der Zuordnung von Hornsteinen und Fundorten durch Diskriminanzanalyse für alle verwendeten 19 Variablen und 3 Funktionen. Vier Hornsteine, schwarz umrahmt, wurden nicht den angegebenen Fundorten zugewiesen; 93,8 % „richtige“ Zuordnung zum Fundort.

Durch einen Vergleich der durch die Diskriminanzanalyse vorgenommenen Zuordnung zu einem Fundort mit dem tatsächlichen Fundort lässt sich ein Eindruck von der Güte der Diskriminanzfunktion gewinnen (Brosius 2011, 657). Bei einem solchen Vergleich mit allen in die Untersuchung aufgenommenen Elementoxid-, LOI- und Elementkonzentrationen und *drei Diskriminanzfunktionen* stimmten zugeordneter Fundort und archäologischer Fundort zu 93,8 % überein (Tab. 48; Abb. 122).

Bei der Verwendung von nur *zwei Diskriminanzfunktionen* zur Trennung der vier Fundorte ging etwas an Information verloren, aber immer noch 89,2 % der Hornsteine wurden ihrem archäologischen Fundort zugewiesen (Abb. 123). Das spricht für die besondere Güte der Diskriminanzschätzung für die Hornsteine und ihre Fundorte, zumal eine Wahrscheinlichkeit von > 80 % einer richtigen Zuordnung von unabhängigen Variablen zu ihren Gruppen als gut gilt (J. Hinz; Prof. Pfretzschner, Geowissenschaften, Universität Tübingen, mündlich). Das Modell und die Diskriminanzfunktionen sind demnach gut geeignet, Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen, den Hornsteinen, und den abhängigen Variablen, den Fundorten, aufzuzeigen (Brosius 2011, 658).

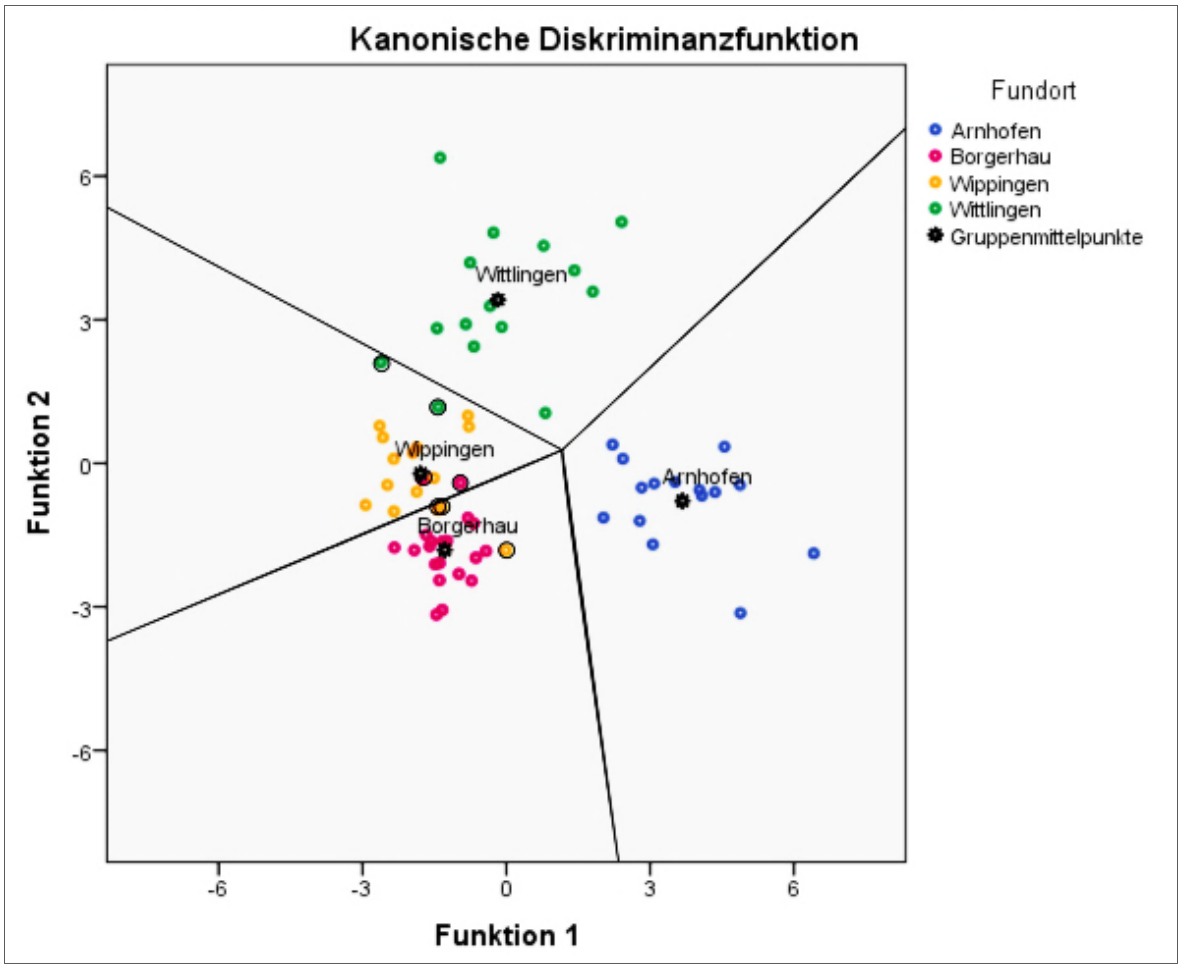


Abb. 123: Grafik der Zuordnung von Hornsteinen und Fundorten durch Diskriminanzanalyse für alle verwendeten 19 Variablen und 2 Funktionen. Sieben Hornsteine, schwarz umrahmt, wurden nicht den angegebenen Fundorten zugewiesen; 89,2 % „richtige" Zuordnung zum Fundort.

In Abb. 123 wurden die Hornsteine der vier Fundorte mit 89,2 % Sicherheit mittels *zwei Diskriminanzfunktionen* aller Elementoxide, LOI und Elemente getrennt. Sieben Hornsteine sind dabei „falsch" klassifiziert. Es handelt sich vor allem um solche von näher zu einander gelegenen Fundstellen. Dass es sich um falsche Zuweisungen handelt, zeigen die Hornsteine Borg. 5 und 10 und Wipp. 1, 5 und 6, die aus anstehendem Sediment stammen, Witt. 8 und 14 sind Lesefunde. Bei vier der sieben Hornsteine liegen die Scores für eine Zuordnung zu zwei verschiedenen Fundorten so nahe beieinander, dass für Borg. 10, Wipp. 1, Wipp. 5 und Witt. 8 die Wahrscheinlichkeiten für eine Zuordnung zum richtigen Fundort bei 45 %, 43 %, 46 % und 49 % liegen (Tabelle der fallweisen Statistiken im Anhang E5.2.2 auf CD).
Bei drei Funktionen (Abb. 122) waren nur vier Hornsteine, Wipp. 1 und 3 und ebenfalls Witt. 8 und 14 einem anderen als dem archäologischen Fundort zugewiesen (Anhang E5.2.1). Im Übrigen ergab die Diskriminanzanalyse ohne *MnO, Na_2O, P_2O_5* und ohne logarithmierte Daten dasselbe Ergebnis, was für die Stabilität der Analyse spricht.

Die Tabelle der fallweisen Statistiken (Anhang E5.2.1) für alle Hornsteine und drei Funktionen gibt die Funktionswerte der Diskriminanzfunktion und die Wahrscheinlichkeit einer Zuordnung der Hornsteine zu bestimmten Fundorten wieder. Nach dem Satz von Bayes kann die Wahrscheinlichkeit für die Gruppenzugehörigkeit (Fundort) anhand zweier Wahrscheinlichkeiten aus dem Funktionswert abgeleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Hornstein, für den sich der kanonische Funktionswert D ergibt, dem Fundort G_i angehört, sei $P(G_i \mid D)$; sie wird für jeden Hornstein und für jeden möglichen Fundort von SPSS nach der folgenden Gleichung berechnet (A-posteriori-Wahrscheinlichkeit):

$$P(G_i \mid D) = \frac{P(D \mid G_i) * P(G_i)}{\sum_{i=1}^{g} P(D \mid G_i) * P(G_i)}$$

D = kanonischer Funktionswert
G_i = Fundort

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(D \mid G_i)$ ist die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein bestimmter Funktionswert D ergibt, wenn der jeweilige Hornstein vom Fundort G_i stammt. $P(G_i)$ ist die A-priori-Wahrscheinlichkeit für eine Zugehörigkeit zu einem Fundort, wenn keinerlei Informationen zur Verfügung stehen. Sie wird für jeden Hornstein und für jeden möglichen Fundort von SPSS berechnet (Brosius 2011, 655 f.).
Die Berechnung dieser Wahrscheinlichkeiten erfolgt unter der Annahme, dass die Funktionswerte innerhalb jeder Gruppe normalverteilt sind und dass die Parameter der Verteilung aus den vorliegenden Stichprobenbeobachtungen geschätzt werden können (Brosius 2011, 656).

7.2.2.2 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit selektiv ausgewählten Variablen

Zur Prüfung, welche Variablen sich besonders zur Trennung der Hornsteine der vier Fundorte eignen und um die Zahl der Variablen zu verringern, wurde das selektive Verfahren nach Brosius angewandt (Anhang E5.8) (Brosius 2011, 685-688). Dabei zeigte es sich, dass mit ebenfalls 89,2 % Sicherheit und zwei Diskriminanzfunktionen die folgenden sechs Variablen ausreichen: *K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*. In diesen sechs Variablen sind drei bzw. vier Korrelationsgruppen mit je einem Elementoxid/Element vertreten: „Tonerde" mit *K_2O*, „Kalk" und „Magma" mit *Ba*, „Seltene Erden" mit Eu (vgl. Kapitel 6.6.2 und 7.1.3). Die ausgewählten Variablen korrelieren untereinander nur sehr gering oder gering.

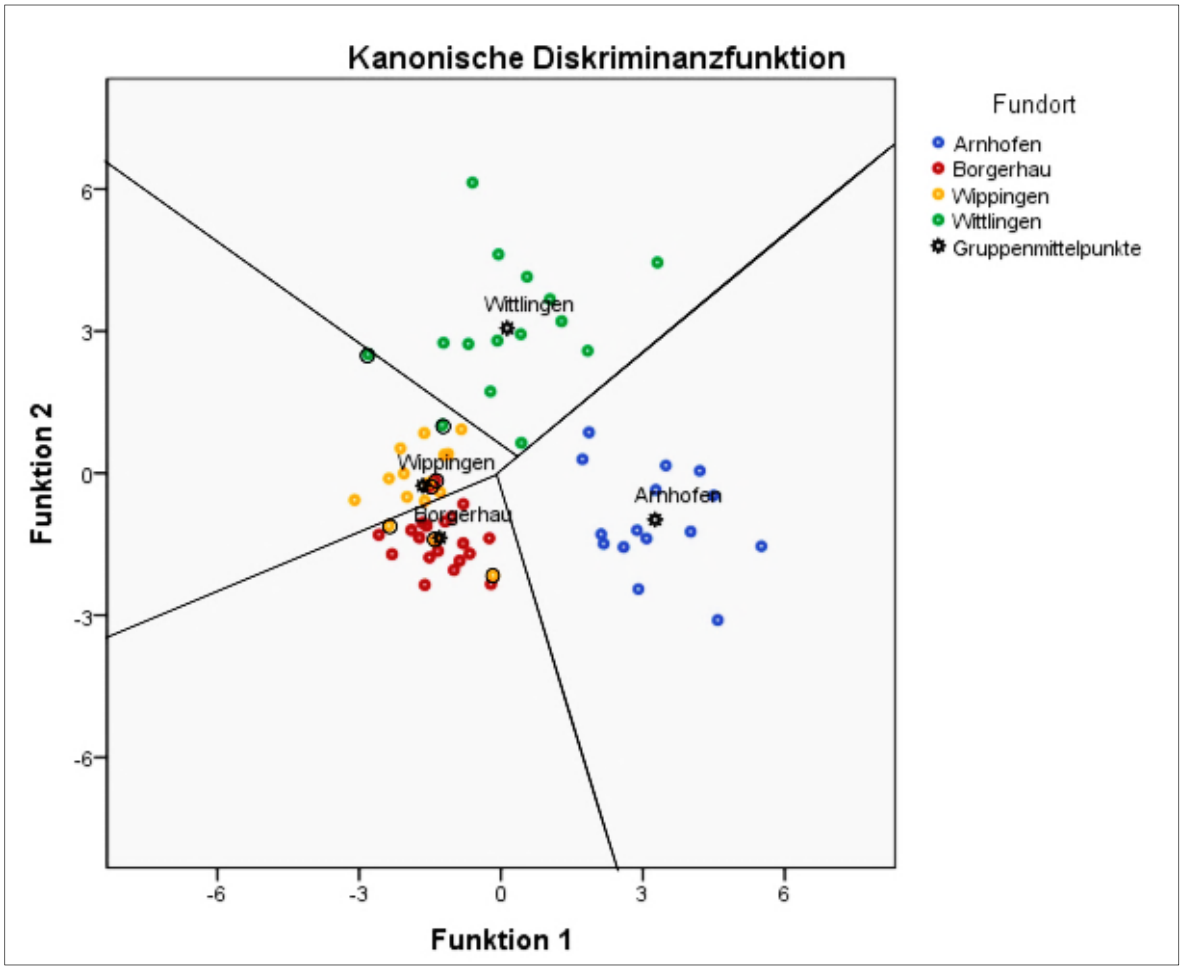


Abb. 124: Grafik der Zuordnung von Hornsteinen und Fundorten durch Diskriminanzanalyse für die Variablen: K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu und 2 Funktionen. Sieben Hornsteine, schwarz umrahmt, wurden nicht den angegebenen Fundorten zugewiesen; 89,2 % „richtige" Zuordnung zum Fundort.

In Abb. 124 sind wieder sieben Hornsteine falsch zugeordnet, dieselben aus dem „Borgerhau" (Borg. 5 und 10) und aus Wippingen (Wipp. 1, 5 und 6), Witt. 8 wird hier mit 51 % Wahrscheinlichkeit richtig zugeordnet, dafür ist Witt. 1 Wippingen zugeordnet ebenso wie Witt. 14 (Anhang E5.1 Klassifizierungsergebnisse). Bei Borg. 5 und Wipp. 1 handelt es sich um Grenzfälle mit 42 % bzw. 43 % Wahrscheinlichkeit für den archäologischen Fundort (Anhang E5.2.4 fallweise Statistik auf CD).

Auch andere Variablenkombinationen führen zu einem brauchbaren Ergebnis, wie z. B. *TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*, bei zwei Funktionen und 87,8 % richtiger Zuordnung (Abb. 125).
Bei der Variablenkombination *TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu* gab es acht falsche Zuweisungen bei zwei Funktionen: Borg. 10, Wipp. 1, 2 und 5, 6 und Witt. 1, 8 und 14. Hier erweist sich Wipp. 2 als Grenzfall mit 47 % Wahrscheinlichkeit für eine Zuordnung zu Wippingen anstatt Borgerhau (Anhang E5.1 Klassifizierungsergebnisse; E5.2.3 Fallweise Statistiken auf CD).

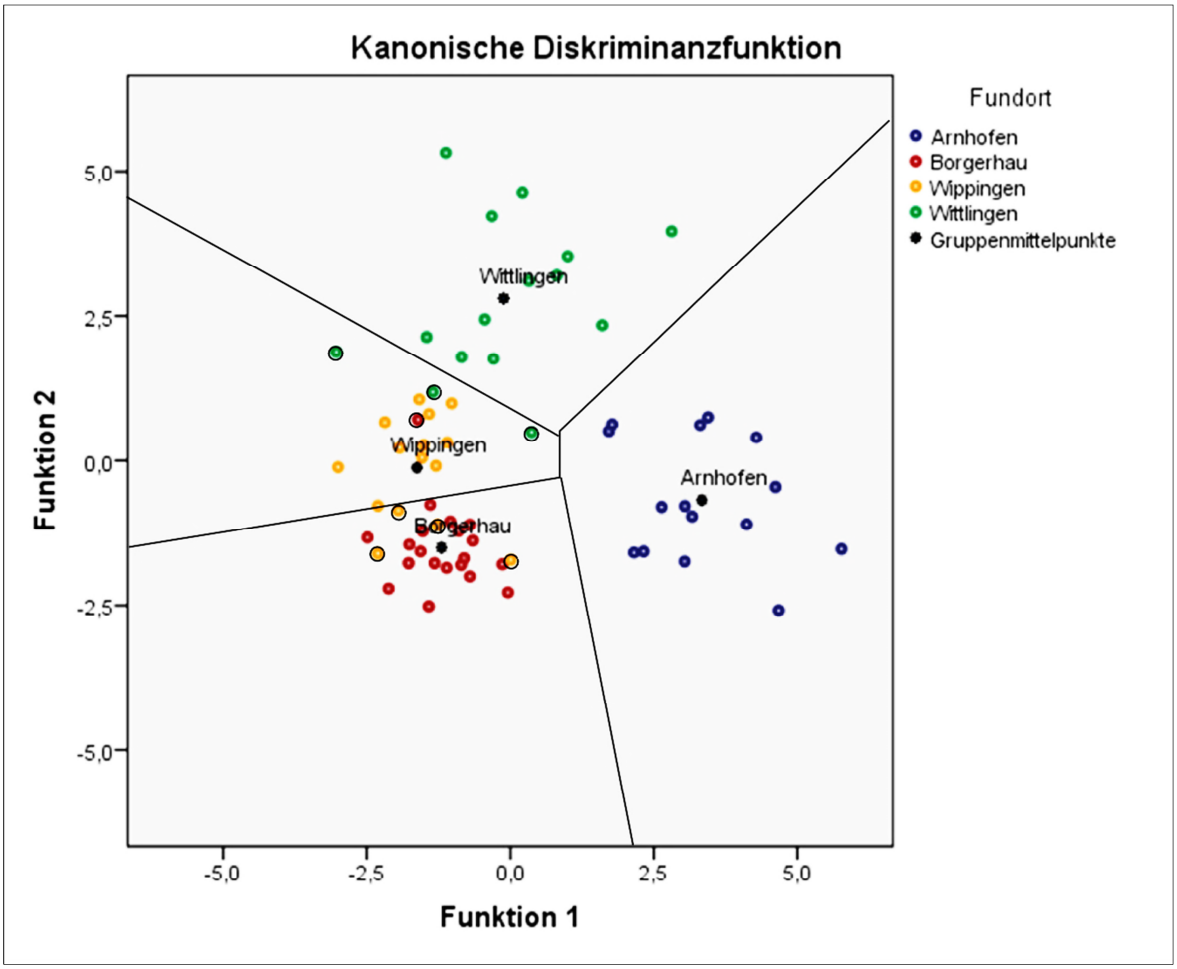


Abb. 125: Grafik der Zuordnung von Hornsteinen und Fundorten durch Diskriminanzanalyse für die Variablen: TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu und 2 Funktionen. Acht Hornsteine, schwarz umrahmt, wurden nicht den angegebenen Fundorten zugewiesen; 87,7 % „richtige" Zuordnung zum Fundort.

Wie bereits ausgeführt eignen sich zur Unterscheidung zwischen den Fundorten vor allem *K_2O, Ba, Eu oder Sm*, ferner *Ni, Cr, LOI, TiO_2, Fe_2O_3*. Dabei vertreten *K_2O, Ba* und *Eu* (oder *Sm*) drei oder vier Korrelationsgruppen; diese Variablen sind für eine erfolgreiche Zuordnung der untersuchten Hornsteine zu den Fundorten notwendig. Die verwendeten Variablen (Elementoxide, LOI oder Elemente) dürfen untereinander höchstens gering korrelieren, $r < 0{,}5$.
Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit selektiv ausgewählten Variablen und drei Diskriminanzfunktionen waren nicht besser, aber auch kaum schlechter als die mit zwei Diskriminanzfunktionen. Da eine Grafik mit drei Diskriminanzfunktionen weniger übersichtlich ist als eine mit zweien, wurde hier auf die Darstellung mit drei Diskriminanzfunktionen verzichtet.

Allgemein kann festgestellt werden, dass es vor allem zwischen „Borgerhau" und Wippingen Ungenauigkeiten bei der Zuordnung von Hornstein und Fundort gibt. Das ist allerdings nicht besonders verwunderlich, da es bei der Nähe der Fundorte (ca. 1,5 km Luftlinie) durchaus eine ähnliche chemische Umgebung während der Zeit der Hornsteinbildung gegeben haben kann. Es ist doch eher erstaunlich, dass sich Hornsteine aus den beiden Fundorten immerhin mittels sechs Elementen/Elementoxiden mit > 87 % Wahrscheinlichkeit trennen lassen.

7.2.3 Prüfung der Modellgüte der Diskriminanzfunktionen zur Trennung der verschiedenen Fundorte

Für die Prüfung der Güte der Diskriminanzfunktionen zur Trennung der Fundorte werden die Tabellen Eigenwert und Wilks′ Lambda herangezogen.
Der *Eigenwert* ist eine Kennzahl dafür, wie deutlich die Diskriminanzfunktion zwischen den einzelnen Fundorten zu trennen vermag.

$$\text{Eigenwert} = \frac{\text{QSZ}}{\text{QSI}} \qquad \text{Kanonische Korrelation} = \sqrt{\frac{\text{Eigenwert}}{1+\text{Eigenwert}}} = \sqrt{\frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}}}$$

Ein hoher Eigenwert besagt, dass die Streuung zwischen den Fundorten größer ist als innerhalb der Fundorte. Je höher der Eigenwert, desto höher ist auch der kanonische Korrelationskoeffizient (Backhaus et al. 2008, 203; Brosius 2011, 659-661).

Die Eigenwerte aller untersuchten Hornsteine zeigt Tab. 49.

Eigenwerte				
Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	5,132	49,4	49,4	0,915
2	4,387	42,2	91,6	0,902
3	0,873	8,4	100	0,683

Tab. 49: Eigenwerte und kanonische Korrelation für alle untersuchten Hornsteine für zwei oder drei Diskriminanzfunktionen.

Der Eigenwert für die erste Funktion besagt, dass die Streuung zwischen den archäologischen Fundorten 5,132-fach größer ist als innerhalb der Fundorte; das ist wirklich gut. Auch die zweite Funktion hat noch gute Trenneigenschaften, was die kanonische Korrelation bestätigt. Funktion 1 erklärt 49,4 % der Varianz, weitere 42,2 % der Varianz werden durch die zweite Funktion erklärt. Der Erklärungsgehalt der dritten Funktion ist sehr viel geringer, sodass diese auch vernachlässigt werden kann, zumal das Diagramm mit nur zwei Funktionen besser zu lesen ist, wenn die dritte Dimension wegfällt.
Bei den selektiven Verfahren sind Eigenwerte und Kanonische Korrelation etwas niedriger, die erste Funktion erklärt mehr als 50 %, die dritte Funktion weniger als 5 % der Varianz (Anhang E5.7 Eigenwerte undWilks′ Lambda).

Wilks′ Lambda ist ein weiteres Maß für die Güte des Trennmodells. Es ist der Quotient aus der Streuung innerhalb der Gruppen und der Gesamtstreuung:

$$\text{Wilks′ L}\square\text{mbd}\square = \frac{\text{QSI}}{\text{QSZ} + \text{QSI}}$$

Je kleiner Wilks′ Lambda für eine Funktion ist, desto geringer ist die Streuung innerhalb eines Fundortes gegenüber der Gesamtstreuung, und desto schärfer trennt die untersuchte Funktion.

Zwischen Wilks′ Lambda und dem kanonischen Korrelationskoeffizienten besteht folgende Beziehung:

$$\text{Wilks}'\,\text{Lambda} = 1 - (\text{kanonische Korrelation})^2$$

(Backhaus et al. 2008, 204; Brosius 2011, 661).

Wilks' Lambda				
Test der Funktion(en)	Wilks' Lambda	Chi-Quadrat	Df	Signifikanz
1 bis 3	0,016	216,576	57	0,000

Tab. 50: Wilks´Lambda für alle verwendeten Variablen und zwei oder drei Diskriminanzfunktionen.

Die kleinen Werte von Wilks′ Lambda deuten deshalb darauf hin, dass sich die einzelnen Fundorte gut voneinander trennen lassen (Brosius 2011, 661; 672). Er beträgt für alle 3 Funktionen aller untersuchten Hornsteine 0,016 und ist damit weit entfernt von maximal 1,0, weist also auf eine gute Trennbarkeit hin. Der durchgeführte Signifikanztest von 0,000 ist hoch signifikant (Tab. 50). Er zeigt an, dass man mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,000 davon ausgehen kann, dass sich die durchschnittlichen Funktionswerte für die Fundorte unterscheiden (Backhaus et al. 2008, 204 f.; Brosius 2011, 673). Nicht ganz so niedrig, aber mit < 0,05 immer noch sehr gut, ist Wilks′ Lambda bei den Beispielen der Sechs-Elemente-Diskriminanzanalysen (Anhang E5.7 Eigenwerte und Wilks′ Lambda)[20].
Es besteht also kein Zweifel, dass sich die Hornsteine der vier Fundorte aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung mittels drei Diskriminanzfunktionen signifikant trennen lassen.

Eine durchgeführte Diskriminanzanalyse der Regressionsfaktoren der Faktorenanalyse dagegen ergab nur eine richtige Zuordnung von Hornstein und Fundort von 78,5 %.

[20] Bei Entfernung der Variablen TiO_2 aus dem Datensatz sind die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit allen Variablen und der schrittweisen Diskriminanzanalyse genau so gut oder nur sehr geringfügig besser als mit TiO_2; TiO_2 verändert also das Ergebnis der Diskriminanzanalyse nicht oder nur ganz unwesentlich.

7.2.4 Versuch einer Herkunftsbestimmung von Hornsteinen aus einem Siedlungskontext

Testweise sollte die Frage geklärt werden, welchem Hornsteinfundort Hornsteinartefakte aus der mittelneolithischen Siedlung Sonderbuch-Grund, deren Herkunft unbekannt ist, aufgrund seiner Merkmalsausprägungen zuzuordnen sind. Sonderbuch „Grund“ liegt etwa 2,5 km Luftlinie vom „Borgerhau“, etwa 4 km von Wippingen „Höfermahd“ entfernt, nach Wittlingen sind es ca. 30 km und nach Arnhofen ca. 160 km Luftlinie.

Klassifizierungsergebnisse[a]

		Fundort	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
			Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	
Original	Anzahl	Arnhofen	15	0	0	0	15
		Borgerhau	0	20	0	0	20
		Wippingen	0	2	13	0	15
		Wittlingen	0	0	2	13	15
		Grund	1	3	0	1	5
	%	Arnhofen	100	0	0	0	100
		Borgerhau	0	100,0	0	0	100
		Wippingen	0	13,3	86,7	0	100
		Wittlingen	0	0	13,3	86,7	100
		Grund	20	60,0	0,0	20,0	100

a. 93,8 % der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Tab. 51: Zuordnung der Testhornsteine der neolithischen Siedlung Grund zu den durch Diskriminanzanalyse getrennten Jurahornsteinfundorten Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen.

Nach dem optischen Eindruck waren Grund 1, 2, 4 und 5 wohl dem „Borgerhau“ zuzuordnen, Grund 3 eher Wippingen oder Wittlingen. Nach der chemischen Untersuchung mittels WDRFA wurden sie als nicht gruppierte Fälle zusammen mit den Hornsteinen aus Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen in der Diskriminanzanalyse untersucht (Tab. 51; Abb. 126). Dabei wurde Grund 3 Wittlingen, Grund 2, 4 und 5 dem „Borgerhau“ zugewiesen, Grund 1 dagegen Arnhofen. Letzteres ist vom typischen Aussehen der Arnhofener Hornsteine her sicher eine falsche Zuweisung. Vier von fünf Hornsteinen wurden jedoch, wie es aussieht, richtig zugewiesen. Das geschah mit dem Verfahren mit allen Variablen und drei Funktionen, also mit dem der größten Wahrscheinlichkeit der richtigen Zuordnung.

Beim Verfahren mit allen Variablen und nur 2 Funktionen und insgesamt nur 89,2 % Wahrscheinlichkeit wurde Grund 5 ebenfalls Arnhofen zugeordnet, allerdings nur mit 57,6 % Wahrscheinlichkeit. Das war auch beim selektiven Verfahren mit einem ähnlichen Prozentsatz der Fall.

Weitere Daten der Diskriminanzanalyse zur Zuordnung der Hornsteine aus „Grund“ zu den untersuchten Fundorten befinden sich im Anhang E5.1.

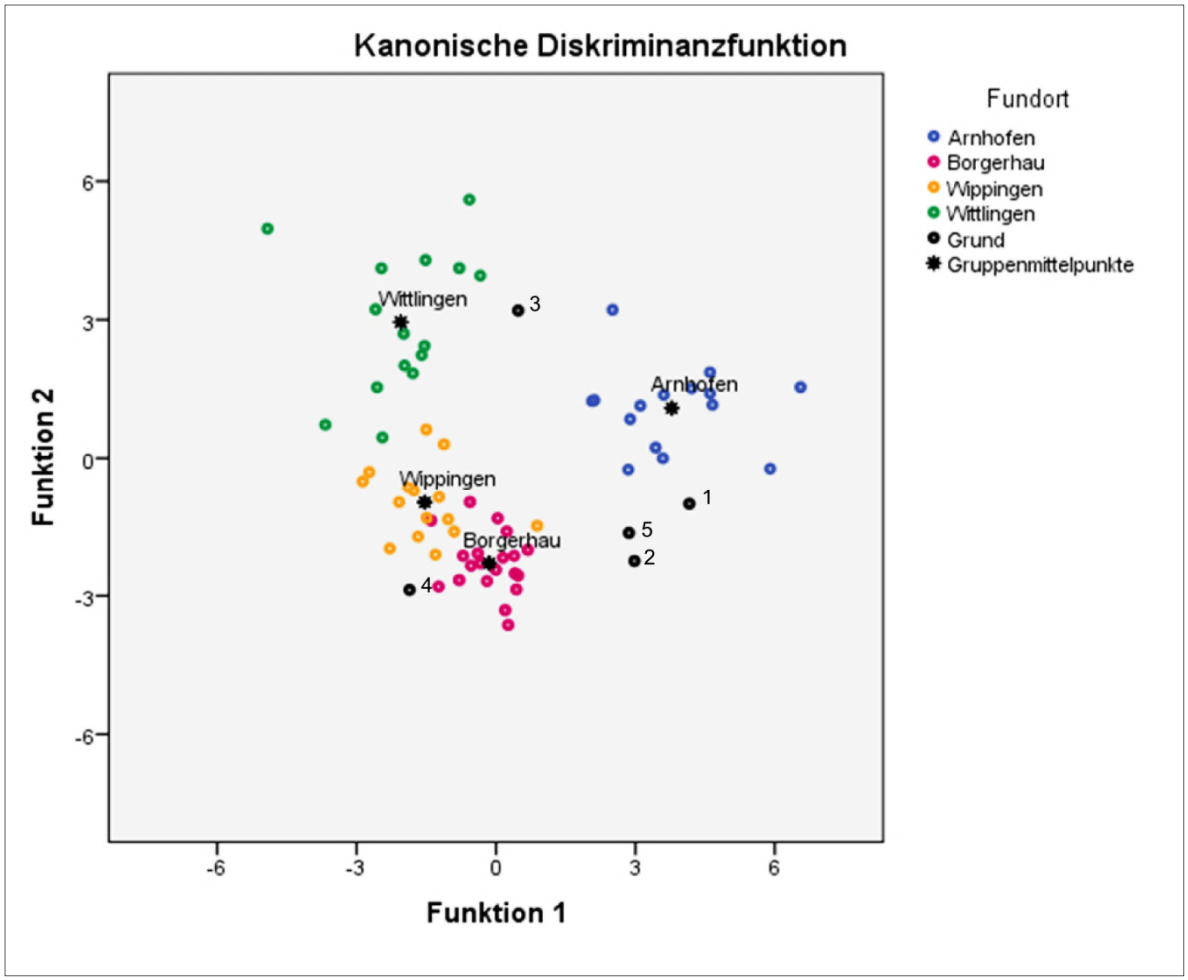


Abb. 126: Grafik der Zuordnung von Hornsteinen und Fundorten durch Diskriminanzanalyse für alle verwendeten 19 Variablen und 3 Funktionen (wie Abb. 122). Fünf Hornsteine der neolithischen Siedlung „Grund“ (schwarze Punkte mit Hornsteinnummer) sollten testweise den Jurahornstein-Fundorten zugeordnet werden.

Damit kann die Trennung auch relativ nah gelegener Fundorte für Hornsteine derselben Zeit (Oberjura) und die Zuordnung von Hornsteinen unbekannter Herkunft einer Siedlung als voller Erfolg angesehen werden.

Eine gewisse Unsicherheit bleibt. Die drei Diskriminanzfunktionen teilen den dreidimensionalen Raum, bzw. zwei Diskriminanzfunktionen den zweidimensionalen Raum, unter die Jurahornsteinfundstellen Arnhofen, „Borgerhau“, Wippingen und Wittlingen auf. Hornsteine unbekannter Herkunft können also nur diesen vier Fundorten zugeordnet werden.

Als weiterer Test wurden die Hornsteine aus „Grund“ in einem binären Diagramm Fe_2O_3 vs. K_2O aufgetragen (Abb. 127); ein solches Diagramm erwies sich als relativ geeignet, Hornsteine aus dem „Borgerhau“, aus Wippingen und Wittlingen zu trennen (Abb. 98).

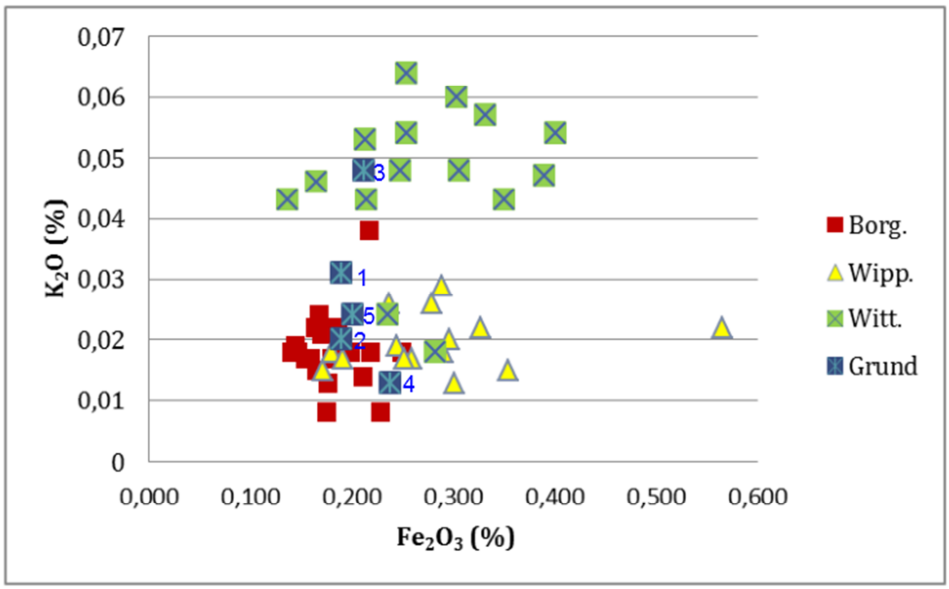


Abb. 127: Binäres Diagramm Fe_2O_3 vs. K_2O der Hornsteine aus „Borgerhau“, Wippingen, Wittlingen und Grund (mit Hornsteinnummern). Grund 3 wird ebenso wie in der Diskriminanzanalyse Wittlingen zugeordnet, Grund 2, 4 und 5 befinden sich im Cluster von Borgerhau(/Wippingen), Grund 1 befindet sich zwischen den Clustern von Wittlingen und „Borgerhau“.

Das binäre Diagramm verstärkt die Zuweisung der Siedlungshornsteine aus „Grund“ durch die Diskriminanzanalyse (Abb. 127): Grund 3 kommt wohl sicher aus Wittlingen. Grund 2, 4 und 5 könnten durchaus aus dem „Borgerhau“ stammen. Der ursprüngliche Fundort von Grund 1 ist weiterhin fraglich, aber sicher nicht Arnhofen. Das im binären Diagramm (Abb. 127) nicht dargestellte Cluster von Arnhofen überlappt sich mit den Clustern der übrigen Fundorte.
Denkbar wäre auch, dass die drei Hornsteine Grund 1, 2 und 5 zwischen Arnhofen und „Borgerhau“ aus einer weiteren, noch nicht untersuchten Hornsteinquelle stammen könnten. Vermutet werden in der Nähe noch weitere Hornsteinquellen als die in dieser Arbeit untersuchten, zum Beispiel Blaubeuren-Blauberg (Burkert 2001, 20 f.; Harris et al. 2009), die chemisch untersucht und einer Diskriminanzanalyse unterzogen werden sollten.

7.3 Clusteranalyse

Im Gegensatz zur Diskriminanzanalyse, bei der vorgegebene Gruppen, Hornsteine verschiedener Fundorte, untersucht werden, geht die Clusteranalyse von ungruppierten Daten aus und erzeugt Gruppen (Backhaus et al. 2008, 183). Sie dient damit ebenfalls der Strukturanalyse (Bergs 1981, 14). Zur Entscheidung der Gruppenzugehörigkeit eines Hornsteins werden alle im Datenmaterial vorliegenden Eigenschaften gleichzeitig genutzt (Backhaus et al. 2008, 391).
Die Clusteranalyse läuft in zwei Schritten ab.

7.3.1 Schritte der Clusteranalyse

Auswahl des Proximitätsmaßes: Es wird versucht, aus den Werten der vorliegenden Variablen zweier Hornsteine einen Zahlenwert zu erhalten, welcher die Übereinstimmungen oder die

Unterschiede der beiden Fälle misst. Diese Zahl symbolisiert die Ähnlichkeit oder Unähnlichkeit der beiden Hornsteine hinsichtlich der aufgenommenen Variablen (Backhaus et al. 2008, 391; 393 f.).
Für metrische Variablen eignet sich zur Ermittlung der Unähnlichkeit besonders die quadrierte euklidische Distanz, vor allem im Zusammenhang mit dem agglomerativen Clusterverfahren Ward (vgl. Bergs 1981, 30 f.; 76 Tab. 3.2; Backhaus et al. 2008, 414 f.; Brosius 2011, 720). Die Maßzahl D^2 der quadrierten euklidischen Distanz für die Unähnlichkeit zweier Hornsteine X und Y wird nach der folgenden Formel berechnet (Brosius 2011, 720; 736):

$$D^2 = \sum_{i=1}^{v}(X_i - Y_i)^2$$

D = euklidische Distanz
v = Anzahl der betrachteten Variablen
X, Y = Variablen der einzelnen Hornsteine

Die auf der Basis der quadrierten euklidischen Distanz erstellte Näherungsmatrix für die untersuchten Hornsteine befindet sich im Anhang unter E6.3 auf CD.

Auswahl des Fusionierungsalgorithmus: Auf der Basis der Ähnlichkeitswerte oder Unähnlichkeitswerte werden die Hornsteine so zu Gruppen zusammengefasst, dass sich die Hornsteine mit weitgehend übereinstimmenden Eigenschaften in einer Gruppe zusammenfinden (Backhaus et al. 2008, 391-393).
Nach der Simulationsstudie von Bergs kennzeichnet bei metrischen Variablen von allen Fusionierungsalgorithmen das Ward-Verfahren am besten die im Datensatz enthaltenen Strukturen. Es findet in den meisten Fällen sehr gute Unterteilungen und ordnet die Elemente „richtig“ den Gruppen zu (Bergs 1981, 96 f.; Backhaus et al. 2008, 424 f.; 444). Auch im Umgang mit den Hornsteindaten erwies sich das Ward-Verfahren gegenüber anderen als überlegen.

Wie bei allen agglomerativen Verfahren wird die Distanz zwischen einem Hornstein (Cluster) R und dem neuen Cluster $(P + Q)$ durch folgende Transformation ermittelt (Backhaus et al. 2008, 415):

$$D(R; P+Q) = A * D(R,P) + B * D(R,Q) + E * D(P,Q) + G * |D(R,P) - D(R,Q)|$$

D(R, P) = Distanz zwischen den Gruppen R und P
D(R, Q) = Distanz zwischen den Gruppen R und Q
D(P, Q) = Distanz zwischen den Gruppen P und Q

Die Größen A, B, E und G sind Konstante, die je nach verwendetem Algorithmus variieren.
Beim Ward-Verfahren sind sie folgendermaßen definiert (Backhaus et al. 2008, 415 f.):

$$A = \frac{NR+NP}{NR+NP+NQ} \qquad B = \frac{NR+NQ}{NR+NP+NQ} \qquad E = -\frac{NR}{NR+NP+NQ} \qquad G = 0$$

NR = Zahl der Objekte in Gruppe R
NP = Zahl der Objekte in Gruppe P
NQ = Zahl der Objekte in Gruppe Q

Die Distanzberechnung erfolgt dann nach folgender Gleichung (Backhaus et al. 2008, 416 Abb. 8.25; 420):

$$D(R; P + Q) = \frac{1}{NR+NP+NQ} * \{(NR + NP) * D(R, P) + (NR + NQ) * D(R, Q) - NR * D(P, Q)\}.$$

Ziel des Ward-Verfahrens ist es, diejenigen Hornsteine oder Hornsteingruppen zu vereinigen, die ein vorgegebenes Heterogenitätsmaß, das Varianzkriterium V (= Fehlerquadratsumme), am wenigsten vergrößern. Dadurch wird die Streuung (Varianz) einer Gruppe möglichst wenig erhöht und relativ homogene Cluster gebildet (Backhaus et al. 2008, 420).
Die Fehlerquadratsumme V_g für eine Gruppe g errechnet sich folgendermaßen (Backhaus et al. 2008, 420):

$$V_g = \sum_{k=1}^{K_g} \sum_{i=1}^{I} (x_{kig} - \bar{x}_{ig})^2$$

x_{kig} = Beobachtungswert der Variablen i (i =1,…,I) bei Objekt k (für alle Hornsteine k = 1,…, K_g in Gruppe g)

$\bar{x}_{ig}$ = Mittelwert der Messwerte der Variablen i in Gruppe g

Wie gezeigt werden kann, entspricht die Zunahme der Fehlerquadratsumme nach der Vereinigung von Clustern der Hälfte der quadrierten Euklidischen Distanz bzw. der Hälfte der berechneten Distanzen $D(R; P + Q)$ nach Ward, was die Berechnungen vereinfacht (Backhaus et al. 2008, 421).

Mit der Clusterzentrenanalyse kann eine F-Statistik zur Varianzanalyse (ANOVA-Tabelle im Anhang E6.1) angefordert werden. Aus der relativen Größe dieser Statistik lassen sich dann, ähnlich wie bei der Diskriminanzanalyse, Informationen über den Beitrag jeder Variablen zur Trennung der Gruppen gewinnen (Backhaus et al. 2008, 445).

7.3.2 Ablauf des agglomerativen Verfahrens nach Ward

Nach Backhaus et al. (2008, 414 f.; 420-424) verläuft das agglomerative Verfahren in sechs Schritten (vgl. Brosius 2011, 725-727):

1. Schritt: Jeder Hornstein ist ein Cluster.

2. Schritt: Die quadrierte euklidische Distanz aller möglichen Hornsteinpaare wird berechnet.

3. Schritt: Es werden die beiden Cluster mit der geringsten quadrierten euklidischen Distanz gesucht und zu einem neuen Cluster zusammengefasst. Die Fehlerquadratsumme wird berechnet, sie beträgt ½ der quadrierten euklidischen Distanz.

4. Schritt: Die Abstände D(R; P + Q) zwischen dem zuletzt gebildeten Cluster und den anderen Gruppen werden nach dem Algorithmus nach Ward berechnet. Die Fehlerquadratsumme wird dann um die Hälfte dieses Wertes erhöht oder nach V_g neu berechnet.

5. Schritt: Die beiden Gruppen von Hornsteinen werden zu einem neuen Cluster zusammengefasst, welches die Fehlerquadratsumme am wenigsten erhöht, wodurch man zu einer reduzierten Distanzmatrix gelangt.

6. Schritt: Die Schritte 3 bis 5 werden solange wiederholt, bis alle Hornsteine in einer Gruppe enthalten sind (sog. Ein-Cluster-Lösung).

Die Agglomerationsschritte der Clusteranalyse und ihr Ergebnis befinden sich im Anhang E6.4 und E6.5.

Um allen Variablen gleiches Gewicht für die Trennung der Jurahornsteine zuzuweisen, wurde vor der Berechnung der Distanzen die Variablenkonzentration in Z-Werte umgerechnet und damit standardisiert. Dabei wurden die Variablenwerte so transformiert, dass die einzelne Variable einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 hat (Brosius 2011, 720 f.).

Beim Ward-Verfahren stören Ausreißer und hoch korrelierende Variablen (Backhaus et al. 2008, 425). Das Element *Rb* hatte von allen 19 Variablen die meisten Ausreißer- und Extremwerte, deshalb wurde es aus der Datenmatrix für die Clusteranalyse ausgeschlossen. „Ausreißer"-Hornsteine, die bei den Diskriminanz- und Clusteranalysen stets störten, Borg. 10, Wipp. 1, Witt. 14, wurden ebenfalls vor der Clusteranalyse eliminiert (Backhaus et al. 2008, 426). Jeweils ein Partner hoch korrelierender Variablen bewirkt unter Umständen eine verdeckte stärkere Gewichtung derselben Variablen, er ist redundant und verbessert die Informationslage nicht (Bergs 1981, 54). Deshalb wurde von den hoch korrelierenden Element- bzw. Elementoxidpaaren *Eu/Sm*, *Eu/Sr*, *Sm/Sr*, und K_2O/Al_2O_3 mit $r > 0{,}7$ jeweils nur ein Partner in die Clusteranalyse einbezogen und somit *Sm*, *Sr* und Al_2O_3 von der Clusteranalyse ausgeschlossen.

7.3.3 Ergebnis der Clusteranalyse

Das Ergebnis der Clusteranalyse, ohne Borg. 10, Wipp. 1 und Witt 14, ist in Abb. 128 als Dendrogramm zu sehen.
Das Dendrogramm zeigt, dass von 62 Hornsteinen 55 „richtig" verteilt wurden, also 89 % der einbezogenen Hornsteine und nur sieben „falsch"[21]. Die anders verteilten Hornsteine sind in Tab. 52 aufgelistet. Sie besetzen im Dendrogramm jeweils Randplätze.

[21] Wenn man davon ausgeht, dass die drei von der Clusteranalyse ausgeschlossenen Hornsteine ebenfalls „falsch" verteilt worden wären, wären es dann 85% „richtig" verteilte von allen untersuchten 65 Hornsteinen aus Arnhofen, „Borgerhau", Wippingen und Wittlingen.

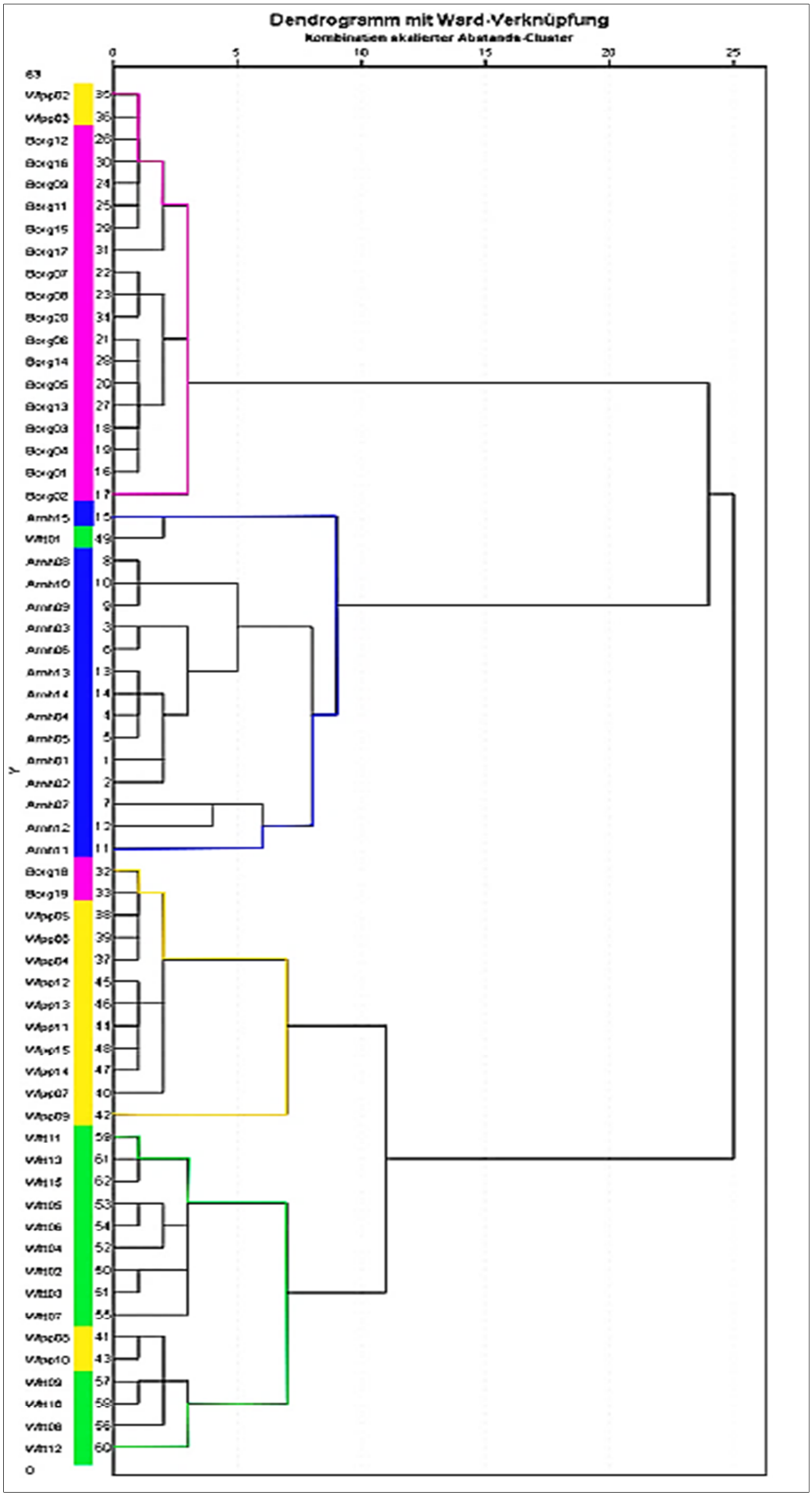


Abb. 128: Dendrogramm der untersuchten Hornsteine: blau Arnhofen; pink „Borgerhau“; gelb Wippingen; grün Wittlingen.

Fundort + Hornsteinnummer	Borg. 18	Borg. 19	Wipp. 2	Wipp. 3	Wipp. 8	Wipp. 10	Witt. 1
Zuordnung	Wipp.	Wipp.	Borg.	Borg.	Witt.	Witt.	Arnh.

Tab. 52: Vom Fundort abweichende Zuordnung einzelner Hornsteine durch die Clusteranalyse.

Eine andere Zuordnung von Borg. 18 und 19 verwundert nicht besonders, da beide Hornsteine durch Ausreißerwerte und anderes Aussehen aufgefallen sind und nicht sicher aus dem „Borgerhau“ stammen. Anders sieht es mit Wipp. 2 und 3 aus, sie kommen aus dem anstehenden Sediment, das wohl dem durchschnittlichen im „Borgerhau“ sehr ähnlich sein muss. Wipp. 8 und 10 sind ebenso wie Witt. 1 Lesefunde. Witt. 1 ist aufgrund seines Aussehens sicher eine Fehlverteilung ebenso wie Wipp. 8; bei Wipp. 10 ist eine Herkunft aus Wittlingen auf Grund des Aussehens nicht auszuschließen[22].
Auffällig ist allerdings, dass im Dendrogramm, im Gegensatz zur Diskriminanzanalyse, Arnhofen und „Borgerhau“ einerseits und Wippingen und Wittlingen andererseits als näher verwandt betrachtet werden.

7.4 Zusammenfassung

Faktoren-, Cluster- und Diskriminanzanalyse sind multivariate Analysemethoden, bei denen mehrere Variablen gleichzeitig untersucht werden.
Faktoren- und Clusteranalyse sind strukturenentdeckende Analysenmethoden. Beide Verfahren gehen davon aus, dass zunächst keine Gruppenstruktur bekannt ist. Sie werden zur Entdeckung von Zusammenhängen zwischen Variablen (Elementoxide, LOI, Elemente) und Objekten (Hornsteinen) verwendet. Die Diskriminanzanalyse dagegen ist ein strukturenprüfendes Verfahren, das der Trennung bereits vorgegebener Gruppen (Hornsteine bestimmter Fundorte) dient. Dabei wird eine aus den Variablenwerten jedes Hornsteins zu berechnende Funktion, die Diskriminanzfunktion, gesucht, die es erlaubt, möglichst viele Hornsteine dem richtigen Fundort zuzuordnen (vgl. Bergs 1981, 5; Backhaus et al. 2008, 11; 14; 17).

Während die Faktorenanalyse eine Bündelung von Variablen zu (Hintergrund-)Faktoren (Hauptkomponenten) vornimmt und damit die Variablenzahl reduziert, bündelt die Clusteranalyse Objekte, die Hornsteine. Die Faktorenanalyse verwendet zur Analyse mathematisch gefasste Korrelationen der Variablen untereinander und zwischen Variablen und Faktoren. Die Clusteranalyse bestimmt mittels verschiedener Berechnungskombinationen skalierte Abstandscluster für Hornsteine so, dass sie zu Gruppen zusammengefasst werden können, und so, dass die Gruppen untereinander möglichst unähnlich sind (Bergs 1981, 4-7; Backhaus et al. 2008, 17; 183).

Mittels der Faktorenanalyse konnten die Informationen von jeweils 19 Variablen je Hornstein auf die Gleichungen von jeweils drei Faktoren je Fundort, die Regressionsfaktoren 1 bis 3 (REGR factor score 1-3), reduziert werden. Diese enthalten den größten Teil der chemischen Information der vier Fundstellen (Backhaus et al. 2008, 17; 324). Durch Kombination der Re-

[22] Würde die Variable TiO_2 von der Clusternalyse ausgeschlossen, würden nur 47 der einbezogenen 62 Hornsteine „richtig“ verteilt, das sind 76%. Das Einbeziehen von TiO_2 verbessert das Ergebnis der Clusteranalyse.

gressionsfaktoren 2 und 3 konnten in der ANOVA Faktorenmittelwerte für alle Fundorte signifikant bestimmt werden. Im binären Diagramm der Regressionsfaktorenwerte 2 und 3 überlappten sich die Cluster von Mittelwert und doppelter Standardabweichung verschiedener Fundorte trotzdem. Besonders stark war das zwischen den beiden nahen Fundorten „Borgerhau“ und Wippingen zu beobachten, aber es gab auch Überlappungen zwischen allen anderen Fundorten. Diese Schwierigkeiten werden demnach von der starken Streuung (Varianz) der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Hornsteine an den Fundorten hervorgerufen.

Die Clusteranalyse nutzte zur Entscheidung der Gruppenzugehörigkeit eines Hornsteins alle im Datenmaterial vorliegenden Eigenschaften gleichzeitig (Backhaus et al. 2008, 391). Sie gruppierte dabei die vorhandenen Daten aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeiten nach verschiedenen Verfahren durchaus unterschiedlich. Mit der hierarchischen Clusteranalyse nach der Ward-Methode und dem quadrierten euklidischen Abstand als Messniveau wurde das beste Ergebnis erzielt. 89 % der in der Analyse verbliebenen 62 Hornsteine wurden „richtig“ zugewiesen und damit mindestens 85 % aller untersuchten Hornsteine, was ein gutes Ergebnis ist.

Als am besten zur Trennung der Hornsteine verschiedener Fundorte geeignet, erwies sich die Diskriminanzanalyse. Mit allen 19 Variablen und drei Funktionen gelang eine „richtige“ Zuordnung von Hornstein und Fundort zu 94 %. Das gleiche Ergebnis wurde auch mit einem Datensatz mit nur sechs Variablen: *K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu* und drei Funktionen erreicht. Wurden nur zwei statt drei Funktionen verwendet, was sich graphisch besser darstellen lässt, fielen einige Informationen weg. Dann lag die „richtige“ Zuordnung von Hornstein und Fundort immer noch bei 89 %. Auch hier wurde dasselbe Ergebnis mit dem gleichen reduzierten Datensatz erreicht. Das spricht für die Güte der Diskriminanzschätzung und zeigt, dass das Modell und die Diskriminanzfunktionen gut geeignet sind, Zusammenhänge zwischen den Hornsteinen und den Fundorten aufzuzeigen (Brosius 2011, 658).

Diese wirklich guten Ergebnisse zeigen, dass die Diskriminanzanalyse die Methode der Wahl ist, um Hornsteine verschiedener Fundorte zu trennen, und sie zeigt auch, dass statistisch gesichert Jurahornsteine verschiedener Fundorte trennbar sind. Dabei ist es unter geeigneten Umständen sogar möglich, die Art und Zahl der verwendeten Variablen zu reduzieren.

Die Diskriminanzanalyse bietet sich auch noch aus einem weiteren Grund besonders an. Hornsteine unbekannter Herkunft können als nicht Gruppierte in die Analyse einbezogen werden und so bestimmten Fundorten zugeordnet werden. Es sollte sich dabei allerdings um Hornsteine handeln, von denen nach ihrem Äußeren vermutet werden kann, dass sie einem der untersuchten Fundorte zugewiesen werden könnten. Ein Test auf die praktische Anwendbarkeit mit Artefakten der jungsteinzeitlichen Siedlung „Grund“, ca. 2,5 km von „Borgerhau“ entfernt, war erfolgreich.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Eine relativ sichere Unterscheidung von Cherts verschiedener Fundorte gelang bisher selten, die sichere Trennung schwäbischer Jurahornsteine bislang nicht.

Von den in dieser Arbeit untersuchten 75 Hornsteinen stammen 65 aus vier Fundorten im Schwäbischen Jura, ungefähr 1,5 und 30 km voneinander entfernt und aus dem Bayerischen Jura in ca. 160 km Entfernung. Alle Hornsteine lagen im Oberjura. Es handelt sich in allen Fällen um Rohmaterialquellen zur Herstellung vor allem von neolithischen Artefakten. Die Hornsteinknollen oder -platten wurden in der Jungsteinzeit aufgelesen oder aber auch schon bergmännisch abgebaut, wie im „Borgerhau“ und in Arnhofen.

Die zum internationalen Vergleich herangezogenen fünf Triascherts kommen von verschiedenen Fundorten und Gegenden in Ungarn, sie sind in sich sehr heterogen. Es handelt sich dabei um Proben aus der Gesteinssammlung des Ungarischen Nationalmuseums in Budapest.

Fünf Artefakte aus Jurahornstein der neolithischen Siedlung „Grund“ wurden für einen Herkunftstest verwendet.

Zur optischen Unterscheidung der Hornsteine wurden Form des Rohmaterials, Musterung und Farben der Hornsteine, Dicke und Härte des Cortex sowie seine Patinierung, die Schätzung der durchschnittlichen Qualität und der ungefähren Menge an Schwammnadeln verwendet. Es entstanden für einzelne Fundstellen typische Muster, die für ca. 78 % einer Zuordnung von Hornstein und Fundort erfolgreich waren. Das gilt jedoch nur für Hornsteine, die frisch angeschlagen oder zersägt waren. Viel schwieriger ist eine Zuordnung von Artefakten unbekannter Provenienz zu einer der obigen Fundstellen. Sicher ist das nur wegen der stets sichtbaren parallelen Bänderung beim Arnhofener Plattenhornstein. Bei allen übrigen gibt es mehr oder weniger große Schwierigkeiten. So fehlt meist der Cortex als wichtiger Hinweis. Ein Artefakt mit gebogener Bänderung kann aus dem Randbereich oder mehr aus dem Inneren der Knolle kommen. Marmorierte Steine kommen im „Borgerhau“, in Wippingen und in Wittlingen vor.

Eine weitere Schwierigkeit bereitet die Patinierung der Oberflächen der Artefakte vor allem wegen des Einflusses der gelblich-, ocker- bis rostfarbenen Fe^{3+}-Ionen, die die Originalfarbe übertönen. Die Oberflächenfarben werden dadurch deutlich verändert, sie erscheinen dann alle eher beigefarben, grau-beigefarben, bräunlich-grau bis bräunlich-schwarz. Die Hornsteinfarbe einer angeschlagenen Knolle stimmte deshalb häufig schlecht mit der Sägeschnittfarbe überein.

Testweise wurde der $\delta^{18}O$-Gehalt von 30 Proben von Hornsteinen und Cherts, 6 aus Arnhofen, 11 aus dem „Borgerhau“, 4 aus Wippingen, 5 aus Wittlingen und 4 aus Ungarn, bestimmt. Aufgrund ihrer relativ niedrigen $\delta^{18}O$-Werte mit einem Durchschnitt von 29,7 ‰ erscheint es möglich, die Hornsteine aus Wittlingen von den übrigen aus den schwäbischen und bayerischen Fundorten zu trennen; ob das für das am nächsten gelegene Wippingen auch gilt, konnte nicht sicher festgestellt werden.

Auch wenn die hier durchgeführten $\delta^{18}O$-Untersuchungen aufgrund der geringen Anzahl von Hornsteinen je Fundort statistisch nicht relevant sind, gaben sie doch deutliche Hinweise, dass eine weitere Trennung von Hornsteinen der untersuchten Fundorte aufgrund der $\delta^{18}O$-Werte wenig aussichtsreich erscheint. Im Gegensatz zur anfänglichen Hoffnung, die Hornsteine aller untersuchten Fundorte aufgrund der hohen Temperatursensibilität der $\delta^{18}O$-Werte trennen zu können (ca. 1 ‰ Differenz der $\delta^{18}O$-Werte entspricht ungefähr 5 °C), gelang dies nicht. Literaturstudien zur Hornstein- und Chertentstehung im Allgemeinen und veröffentlichte $\delta^{18}O$-Werte (und δD-Werte) von Cherts vermittelten dann die Einsicht, dass die $\delta^{18}O$-Werte der Cherts weit komplexere Ursachen haben als es noch heute von einigen Autoren gesehen wird. Die $\delta^{18}O$-Werte der Cherts, ebenso wie die der Hornsteine, spiegeln nicht ausschließlich die Temperatur des (Meer-)Wassers wieder, in dem die erste SiO_2-Fällung als Opal-A oder Opal-CT stattfand, sondern sie geben die gesamte diagenetische Geschichte mit allen $^{18}O/\ ^{16}O$-Fraktionierungen unter unterschiedlichen Temperaturen und weiteren Umweltbedingungen wieder.

Die schwäbischen und bayerischen Hornsteine nahmen alle ihren Anfang im Flachwasserbereich der Tethys, deren Wasser sich in den einzelnen Buchten wohl nicht nennenswert in pH-Wert und Salzgehalt unterschied, wobei diese Hornsteine im Oberjura ähnlichen Wassertemperaturen ausgesetzt waren. Daher sollte man bei ihnen relativ ähnliche $\delta^{18}O$-Werte erwarten, was auch im „Borgerhau“ und in Wippingen, ja sogar in Arnhofen der Fall war. Die deutlich niedrigeren $\delta^{18}O$-Werte in Wittlingen können somit nur durch einen höheren Temperaturgradienten vor Ort während der „Hornsteinreifung“ erklärt werden oder durch einen stärkeren Einfluss meteorischen Wassers infolge möglicher größerer Küstennähe.

Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Jurahornsteine stand die **w**ellenlängen**d**ispersive **R**öntgen**f**luoreszenz-**A**nalyse (WDRFA) zur Verfügung. Untersucht wurden insgesamt 28 Elementoxide, Spurenelemente und LOI (**L**oss **O**n **I**gnition). Davon lagen die Konzentrationen einiger Spurenelemente unterhalb oder an der unteren Nachweisgrenze der WDRFA und konnten deshalb nicht verwendet werden, ebenso wie die Konzentration von *Co*, das durch Kontamination in der Gesteinsmühle deutlich überhöht war. Da SiO_2 zur Kalibration der Konzentrationen aller übrigen Messwerte von sechs Hornsteinsätzen diente, kam es ebenfalls für eine Trennung nicht in Betracht. Zur chemischen Trennung der Hornsteinfundorte eigneten sich damit grundsätzlich LOI und die folgenden neun Elementoxide: TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5 und neun Spurenelemente: *Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb.* Diese relativ große Anzahl chemischer Messwerte je Hornstein, die oberhalb der Messwertgrenze lagen, waren die Voraussetzung für die in dieser Arbeit erfolgte Trennung der jurazeitlichen Hornsteinfundorte. Ermöglicht wurden sie durch die Messung im Gesteinspulver bei großer Oberfläche und relativ homogener Verteilung.

Es stellte sich heraus, dass, bei einem durchgehend hohen Anteil an SiO_2 von durchschnittlich 98 %, die Hornsteine stark in der Konzentration der übrigen chemischen Elemente variieren. Trotz der großen Variabilität der Elementkonzentrationen der Hornsteine innerhalb eines Fundortes waren durchaus auch Unterschiede zwischen Hornsteinen verschiedener Fundorte zu finden, das zeigten unter anderem binäre Diagramme, zum Beispiel K_2O vs. Fe_2O_3 oder

MgO, CaO, Cr, Ni; LOI vs. *Ni* oder *Eu, Sm*; *Ni* vs. Fe_2O_3 oder *CaO* . Die binären Diagramme führten jedoch zu keiner sicheren Unterscheidung von Hornsteinen aller Fundorte.

Von den multivariaten statistischen Analysenmethoden erwies sich die Diskriminanzanalyse als trennungsstark und trennungssicher. Mit allen 19 Variablen und drei Funktionen gelang eine Zuordnung von Hornstein und Fundort zu fast 94 %. Das gleiche Ergebnis wurde auch mit einem Datensatz mit nur sechs Variablen: K_2O, *LOI*, *Ba*, *Cr*, *Ni*, *Eu* und drei Funktionen erreicht. Wurden nur zwei statt drei Funktionen verwendet, was sich graphisch besser darstellen lässt, fielen einige Informationen weg. Dann lag die „richtige" Zuordnung von Hornstein und Fundort bei Verwendung aller Variablen immer noch bei 89 %; auch hier wurde dasselbe Ergebnis mit dem gleichen reduzierten Datensatz erreicht.

Diese wirklich guten Ergebnisse zeigen, dass die Diskriminanzanalyse *die* Methode der Wahl ist, um Hornsteine verschiedener Fundorte zu trennen, und sie zeigt auch, dass Jurahornsteine verschiedener Fundorte statistisch gesichert trennbar sind. Die Diskriminanzanalyse bietet sich auch noch aus einem weiteren Grund besonders an: Hornsteine unklarer Herkunft können als Nichtgruppierte in die Analyse einbezogen werden und so bestimmten Fundorten zugeordnet werden. Mit Erfolg gelang das mit bearbeiteten Hornsteinen aus der jungsteinzeitlichen Siedlung „Grund".

Aber auch mit der multivariaten statistischen Clusteranalyse wurden gute Ergebnisse erreicht, das beste Ergebnis mit der hierarchischen Clusteranalyse nach der Ward-Methode und dem quadrierten euklidischen Abstand als Messniveau. 89 % der in der Analyse verbliebenen 62 Hornsteine wurden „richtig" zugewiesen, und damit ca. 85 % aller untersuchten Hornsteine, ein gutes Ergebnis.

Wider alle Erwartungen ist es gelungen, Jurahornsteine verschiedener süddeutscher Fundstellen mit einem durchschnittlichen SiO_2-Gehalt von 98 % chemisch mittels WDRFA und statistisch mittels Diskriminanz- und Clusteranalyse zu trennen. Die Wahrscheinlichkeit für eine richtige Zuordnung von Hornstein und Fundort liegt bei 85 % bis 94 %, was ein sehr gutes Ergebnis ist. Damit ist, entgegen der allgemeinen Erwartung, gesichert, dass Hornsteine verschiedener, auch nahe gelegener, Fundorte für diese typische chemische Marker tragen, die mühevoll gesucht werden müssen, aber die gefunden werden können. Das gleiche Ergebnis dürfte für Hornsteine und Cherts aller Art zu erwarten sein.

Die Unterscheidung von Hornsteinen verschiedener Fundorte mittels chemischer Marker ist auf jeden Fall sicherer als die rein optische Zuordnung. Die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Zuordnung von Artefakt und Fundort dürfte für die optische Methode, vor allem aufgrund der Patinierung, im allgemeinen 60 % kaum überschreiten und hängt zusätzlich stark von individuellen Eigenschaften des einzelnen Forschers ab.

Da der Materialverbrauch der WDRFA von ca. 10-20 g je Hornsteinuntersuchung jedoch relativ hoch ist, eignet sich diese Methode nicht für die Untersuchung von Artefakten. Jüngere

und teurere minimal-invasive Methoden wie die ICP-MS oder La-ICP-MS sollten daraufhin geprüft werden, ob damit möglichst viele chemische Elemente mit genügender Messgenauigkeit im Hornstein/Chert bestimmt werden können. Schließlich sollten dann noch Datenbanken für die Messwerte von mindestens 15-20 Hornsteinen/Cherts je Rohmaterialfundstelle angelegt werden, wie es auch schon Morgenstein (2006) und Postl et al. (2007) vorschlugen. Chemische Analyse und Diskriminanzanalyse könnten standardisiert werden und so zu relativ sicheren, nachvollziehbaren Ergebnissen führen.

Wenn Jurahornsteine bestimmter Herkunftsorte der Schwäbischen Alb sicher zuzuordnen wären, könnte ein neues, längst überfälliges Kapitel der Archäologie aufgeschlagen werden, nämlich Handelswege der Jungsteinzeit und Tauschverbindungen der Mittel- und Altsteinzeit von hier aus sicher zu rekonstruieren, was eine deutliche Erweiterung des archäologischen Wissens zur Folge haben wird.

9 Abstract

The successful separation of cherts from different source locations belongs, as the literature shows, to the most difficult of endeavors. In a few cases, this has been successfully achieved, but such a separation has not yet been successful for Swabian Jurassic chert sources. However, a relatively secure identification of chert sources is necessary for the study of Neolithic trade routes.

For this dissertation, 65 Jurassic chert samples from four separate sources utilized in the Neolithic were selected and analyzed using optical and chemical methods. Each source was represented by 15 to 20 examples. Most of the samples were non-artifact pieces of raw material.

For the optical differentiation of chert, the form of the raw material, patterning and color of a freshly broken or sawn face, thickness, hardness and patination of the cortex, assessment of average material quality, and the approximate frequency of sponge spicules present were used. For some sites there was a typical patterning in the material that allowed for an approximately 78 percent correct categorization of the chert based on these attributes. This is only valid, however, for chert that was freshly broken or sawn. Artifacts cannot be broken or sawn, and often are covered with a beige to ocher colored patination that obscures the natural color and to some extent also the patterning of the material. Cortex is almost always lacking on artifacts. The classification of Jurassic chert and source locations is therefore much more difficult and subject to greater error.

As a test, the $\delta^{18}O$ content of 30 chert samples were determined. Based on their relatively low $\delta^{18}O$ values with an average of 29.7 ‰, it was only possible, however, to separate the chert from one source location, Wittlingen, from the other Swabian and Bavarian cherts. The $\delta^{18}O$ content of the tested Jurassic chert, however, allows for a reconsideration of questions regarding the formation of chert.

Through Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence spectrometry (WD-XRF) it was possible to analyze powdered samples extracted from the 65 chert samples for concentrations of oxides, elements, and LOI (loss on ignition). The cherts contained approximately 98 % SiO_2, *LOI*, nine oxides (TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, *MnO, MgO, CaO,* Na_2O, K_2O, P_2O_5) and 9 trace elements (*Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb*) were found to be useful in discriminating between the chert source locations. This relatively large number of chemical measurements that exceed the measurement threshold formed the basis for successful discrimination of the Jurassic chert sources in the current work. This was made possible through measurements on powdered samples from large surfaces that were relatively homogenous.

Two multivariate statistical methods were used to characterize and distinguish the chert source locations: discriminant analysis and cluster analysis. Both were carried out using the SPSS 19 statistical program.
Discriminant analysis proved to be particularly effective in distinguishing between chert sources. With all 19 variables and three functions the analysis was able to successfully separate the chert sources 94 percent of the time. The same result was also achieved with just 6 variables: K_2O, *LOI, Ba, Cr, Ni, Eu,* and 3 functions. Discriminant analysis offers the additional benefit of being able to include samples of chert from an unknown source and categorize them into a likely source group. Using this method, it was possible to classify five artifacts from the Neolithic settlement "Grund".
Good results were also obtained with multivariate cluster analysis. The best results were obtained with the hierarchical cluster analysis using the Ward Method and Quadratic Euclidian

distance as the method for measuring distance. 89 percent of the 62 samples remaining in the analysis were correctly assigned by source, representing at least 85 percent of all analyzed samples. This is a good result.

Chert sources located geographically near to one another and containing up to 98 percent SiO_2 were successfully distinguished by means of chemical characterization using WD-XRF combined with discriminant and cluster analysis. The same results should be possible for many types of cherts.

(Translated by S. K. Harris)

10 Literatur

Abraham, K.; A. Hofmann; S. F. Foley; D. Cardinal; C. Harris; M. G. Barth; & L. André. 2011. Coupled silicon-oxygen isotope fractionation traces Archaen silification. Earth and Planetary Science Letters 301, 222-230.

Abruzzese, M. J.; J. R. Waldbauer & C. P. Chamberlain. 2005. Oxygen and hydrogen isotope ratios in freshwater chert as indicators of ancient climate and hydrologic regime. Geochimica et Cosmochimica Acta 69, 1377-1390.

Affolter, J. 1991. "Analyse pétrographique du silex: origine des matières premières". In: N. Pousaz: L'Abri-sous-Roche mésolithique des Gripons à Saint-Ursanne (JU, Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 2 (Porrentruy: Office du Patrimoine Historique) 81-95.

Affolter, J. 2002. Provenance des silex préhistoriques du Jura et des régions limitrophes, Bd. 1/2 (Neuchâtel: Service et Musée Cantonal d'Archéologie).

Affolter, J. 2011. „Petrographische Charakterisierung der Silex-Rohstoffe". In: K. Altdorfer & J. Affolter: Schaffhauser Silex-Vorkommen und Nutzung. Wirtschaftsarchäologische Untersuchungen an den Silices der jungneolithischen Stationen Büttenhardt-Zelg, Schaffhausen (Herblingen)-Grüthalde und Lohn-Setzi. Beiträge zur Schaffhauser Archäologie 5 (Schaffhausen: Unionsdruckerei AG) 31-53.

Backhaus, K.; B. Erichson; W. Plinke & R. Weiber. 2008. Multivariate Analysenmethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung[12] (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag).

Baertschi, P. 1976. Absolute ^{18}O content of standard mean ocean water. Earth and Planetary Science Letters 31, 341-344.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.). 2008. Das Klima der Vergangenheit (http://lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_82_klima_vergangenheit.pdf vom 10.03.2014) 1-7.

Baxter, M. J. & C. E. Buck. 2000. „Data Handling and Statistical Analysis". In: E. Ciliberto & G. Spoto (Hrsg.): Modern Analytical Methods in Art and Archaeology. Chemical Analysis 155 (New York: Willey) 681-746.

Becker, R. H. & R. N. Clayton. 1976. Oxygen isotope study of a Precambrian banded iron-formation. Hamersley Range. Western Australia. Geochimica et Cosmochimica Acta 40, 1153-1165.

Behl, R. J. & B. M. Smith. 1992. 3. Silification of deep-sea sediments and the oxygen isotope composition of diagenetic siliceous rocks from the Western Pacific, Pigafetta and East Mariana Basins, Leg 129. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 129 (Texas A & M University) 81-117.

Behl, R. J. 2011. Chert spheroids of the Monterey Formation, California (USA): early-diagenetic structures of bedded siliceous deposits. Sedimentology 58, 325-351.

Berg, H. (H. Zürn). 1975. Wittlingen (Lkr. Münsingen). Fundberichte aus Baden-Württemberg 2, 60.

Bergs, S. 1981. Optimalität bei Clusteranalysen. Experimente zur Bewertung numerischer Klassifikationsverfahren (Dissertation an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster).

Beurer, M. 1971. Kieselsäureanreicherungen in den oberjurassischen Sedimenten der Schwäbischen Alb. Bundesanstalt für Bodenforschung und Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). Beihefte zum Geologischen Jahrbuch 109 (Dissertation der Universität Stuttgart).

Binsteiner, A. 1990. Das neolithische Feuersteinbergwerk von Arnhofen, Ldkr. Kelheim. Bayerische Vorgeschichtsblätter 55, 1-11.

Binsteiner, A. & J. Riederer. 1990. Die Materialanalyse des Feuersteins von Arnhofen. Bayerische Vorgeschichtsblätter 55, 12-47.

Binsteiner, A. & B. Engelhardt. 1990. Datierung und wirtschaftsgeschichtliche Modellvorstellungen über den Betrieb des Feuersteinbergwerkes von Arnhofen. Bayerische Vorgeschichtsblätter 55, 48-56.

Binsteiner, A. 2001. Die Feuersteinstraße zwischen Bayern und Böhmen. Eine Studie zur Verbreitung der Arnhofener und Baiersdorfer Jurahornsteine. Bayerische Vorgeschichtsblätter 66, 7-12.

Binsteiner, A. & K. Ernstson. 2001. Stahl der Steinzeit. Archäologie in Deutschland 2, 39.

Binsteiner, A. 2003. Die neolithische Prospektion von Jurahornsteinen in Bayern. Bayerische Vorgeschichtsblätter 68, 173-177.

Binsteiner, A. 2005. Die Lagerstätten und der Abbau Bayerischer Jurahornsteine sowie deren Distribution im Neolithikum Mittel- und Osteuropas. Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz 52, 43-155.

Binsteiner, A. 2006. Drehscheibe Linz – Steinzeithandel an der Donau. Begleitheft zur Ausstellung im NORDICO-Museum der Stadt Linz 29.05.-15.10.2006. Linzer Archäologische Forschungen 37 (Stadtkommunikation Linz: PG Druckerei).

Binsteiner, A. 2007. Der Fall Ötzi. Raubmord am Similaun. Begleitheft zur Dokumentation im NORDICO-Museum der Stadt Linz 15.02.-01.04.2007. Linzer Archäologische Forschungen Sonderheft 38 (Stadtkommunikation Linz: PG Druckerei).

Biro, K. T. 2009. “Sourcing raw materials for chipped stone artifacts: The state-of-the-art in Hungary and the Carpathian Basin”. In: B. Blades & B. Adams (Hrsg.): Lithic Materials and Paleolithic Societies (Oxford: Wiley-Blackwell Publishing) 47-53.

Blumenberg, M. 2003. Biomarker aus Kaltwasser- und Tiefsee-Kieselschwämmen. Phylogenie, Chemotaxonomie und chemische Ökologie der Demospongiae und der Hexactinellida. (Dissertation an der Universtät Hamburg: http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/-2003/989 /pdf/dissertation.pdf vom 10.03.2014).

Bohrmann, G.; G. Kuhn; A. Abelmann; R. Gersonde & D. Fütterer. 1990. A young porcellanite occurence from the Southwest Indian Ridge. Marine Geology 92, 155-163.

Bortz, J. 2005. Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler[6] (Heidelberg: Springer Medizin Verlag).

Botz, R. & G. Bohrmann. 1991. Low temperature opal-CT precipitation in Antarctic deep-sea sediments: evidence from oxygen isotopes. Earth and Planetary Science Letters 107, 612-617.

Brandriss, M. E.; J. R. O'Neil; M. B. Edlund & E. F. Stoermer. 1998. Oxygen isotope fractination between diatomaceous silica and water. Geochimica et Cosmochimica Acta 62, 1119-1125.

Bressy, C. & H. Floss. 2006. "Multiparametric Characterisation of Southwestern German Cherts. Application to the study of raw material circulation during Upper Paleolothic period". In: C. Bressy (Hrsg.): Notions de territoire et de mobilité. Actes des sessions présentées au Xe congress annuel de l'Association des Archéologues (EAA), Lyon 8.-11. Septembre 2004. Etudes et recherches archéologiques de l'Université de Liège 116 (Liège: Université de Liège) 131-136.

Bressy, C.; G. Poupeau & P. Bintz. 2006. "Geochemical characterisation in flint sourcing. Application to the Chartreuse and Vercors massifs (Western Alps, France)". In: G. Körlin & G. Weisgerber (Hrsg.): Stone Age - Mining Age. VIII International Flint Symposium, Bochum, 13.-17. September 1999, Deutsches Bergbau-Museum. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 148 (Essen: Druckmeister) 489-497.

Brosius, F. 2011. SPSS 19 (Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH).

Brueckner, H. K.; W. S. Snyder & M. Boudreau. 1987. Diagenetic controls on the structural evolution of siliceous sediments in the Golconda allochthon, Nevada, U.S.A. Journal of Structural Geology 9, 403-417.

Bubenzer, O. & U. Radtke. 2007. "Natürliche Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte". In: W. Endlicher & F.-W. Gerstengarbe: Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke (Klimawandel) (https://pik-potsdam.de/services/infothek/buecher_broschueren/-broschuere_cms_100.pdf vom 10.03.2014) 17-26.

Burke, A. L. & G. Gauthier. 2011. "Using Non-Destructive X-ray Fluorescence Analysis to Investigate the Prehistoric Use and Distribution of Hornfels in Southern Quebec". In: I. Turbanti-Memmi (Hrsg.): Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 12th -16th May, 2008, Siena, Italy (Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag) 199-204.

Burkert, W.; B. Çep; J.-C. Kind; C. Pasda; M. Schrantz & U. Simon. 1992. Wittlingen, eine mittelpaläolithische Freilandfundstelle bei Bad Urach. Fundberichte aus Baden-Württemberg 17/1, 1-110.

Burkert, W. 1996. „Die Herkunft des Jurahornstein-Rohmaterials im Gravettien der Geißenklösterle-Höhle bei Blaubeuren unter Berücksichtigung des Rohstoffvorkommens des nördlichen Oberschwaben". In: I. Campen, J. Hahn & M. Uerpmann (Hrsg.): Spuren der Jagd – Die Jagd nach Spuren. Festschrift für Hansjürgen Müller-Beck. Tübinger Monographien zur Urgeschichte 11 (Tübingen: Mo Vince Verlag) 279-284.

Burkert, W. 2001. Lithische Rohmaterialversorgung im Jungpaläolithikum des südöstlichen Baden-Württemberg (Dissertation an der Universität Tübingen, maschinenschriftlich vervielfältigt).

Burkert, W. & H. Floss. 2006. "Lithic Exploitation Areas in the Upper Palaeolithic of West and Southwest Germany – A Comparative Study". In: G. Körlin & G. Weisgerber (Hrsg.): Stone Age - Mining Age. VIII. International Flint Symposium, Bochum, 13.-17. September 1999, Deutsches Bergbau-Museum. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 148 (Essen: Druckmeister) 329-339.

Calvert, S. E. 1974. „Deposition and diagenesis of silica in marine sediments". In: K. J. Hsü; H. C. Jenkins (Hrsg.): Pelagic Sediments: on Land and under the Sea. Proceedings of a symposium held at the Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 25-6 September 1973. International Association of Sedimentologists Special Publication1 (Oxford, London, Edinburgh, Melbourne: Blackwell Scientific Publications) 273-299.

Calvert, S. E. 1983. „Sedimentary Geochemistry of Silicon". In: R. S. Aston (Hrsg.), Silicon Geochemistry and Biogeochemistry (London, New York: Academic Press) 143-186.

Cecil, C. B. 2004. Eolian Dust and the Origin of Sedimentary Chert. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1098, Version 1.0. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia 20192, USA (http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20041098 vom 23.09.2009) 1-10.

Chase, C. G. & E. C. Perry Jr. 1977. The Oceans: Growth and Oxygen Isotope Evolution. Science 177, 992-994.

Clauss, G.; F.-R. Finze & L. Parztsch. 2011. Grundlagen der Statistik[6]. Für Soziologen, Pädagogen, Psychologen und Mediziner (Frankfurt a. M.: Deutsch).

Clayton, R. N. & T. K. Mayeda. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. Geochimica et Cosmochimica Acta 27, 43-52.

Clayton, R. N.; J. R. O'Neil & T. K. Mayeda. 1972. Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water. Journal of Geophysical Research 77, 3057-3067.

Clayton, C. J. 1986. "The chemical environment of flint formation in Upper Cretaceous chalks". In: G. de G. Sieveking & M. B. Hart (Hrsg.): The scientific study of flint and chert. Proceedings of the fourth international flint symposium held at Brighton Polytechnic 10-15 April 1983 (New York: Cambridge University Press) 43-54.

Craig, H. 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. Geochimica et Cosmochimica Acta 12, 133-149.

Cronin, Th. M. 2010. Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present (New York: Columbia University Press).

Davis, J. C. 2002. Statistics and Data Analysis in Geology[3] (New York: John Wiley & Sons).

DeCelles, P. G. & R. C. Gutschick. 1983. Wood-grained Chert. Journal of Sedimentary Petrology 53, 1175-1191.

Degens, E. T. & S. Epstein. 1962. Relationship between O^{18}/O^{16} ratios in coexisting carbonates, cherts, and diatomites. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 46, 534-542.

De La Rocha, Ch. L. 2006. Palaeoceanography. In hot water. Nature 443, 920-921.

Dello-Russo, R. 2004. Geochemical Comparisons of Silicified Rhyolites from Two Prehistoric Quarries and 11 Prehistoric Projectile Points, Socorro County, New Mexico, U.S.A. Geoarchaeology: An International Journal 19, 237-264.

Dickerson, R. E. & I. Geis. 1983. Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung (Weinheim: Verlag Chemie GmbH).

Dodd, J. P. & Z. D. Sharp. 2010. A Laser fluorination method for oxygen isotope analysis of biogenic silica and a new oxygen isotope calibration of modern diatoms in freshwater environments. Geochimica et Cosmochimica Acta 74, 1381-1390.

Dorn, R. I. 1991. Rock Varnish. American Scientist 79, 542-553.

Eerkens, J. W. & J. S. Rosenthal. 2004. Are obsidian subsources meaningfull units of analysis?: temporal and spatial patterning of subsources in the Coso Volcanic Field, southeastern California. Journal of Archaeological Science 31, 21-29.

Eerkens, J. W.; A. M. Spurling & M. A. Gras. 2008. Measuring prehistoric mobility strategies based on obsidian geochemical and technological signatures in the Owens Valley, California. Journal of Archaeological Science 35, 668-680.

Eggert, K. H. & St. Samida. 2009. Ur- und Frühgeschichtliche Archäologie (Tübingen: Narr Francke Attempto Verlag GmbH + Co. KG).

Eichhubl, P. & A. Aydin. 2003. Ductile opening-mode fracture by pore growth and coalescence during combustion alternation of siliceous mudstone. Journal of Structural Geology 25, 121-134.

Eisele, K. & M. M. Rind. 2001. Neues vom Hornsteinbergwerk von Arnhofen. Ein DFG-Projekt im Landkreis Kelheim. Das Archäologische Jahr in Bayern 2000, 21-25.

Ernst, W. G. & S. E. Calvert. 1969. An experimental study of the recrystallization of porcelanite and its bearing on the origin of some bedded cherts. American Journal of Science, Schairer 267-A, 114-133.

Evans, A. A.; Y. B. Wolframm; R. E. Donahue & W. A. Lovis. 2007. A pilot study of “black chert” sourcing and implications for assessing hunter-gatherer mobility strategies in Nothern England. Journal of Archaeological Science 34, 2161-2169.

Faure, G. & T. M. Mensing. 2005. Isotopes. Principles and Applications[3] (New Jersey: John Wiley & Sons).

Finnigan MAT 252, 1990. Interne Geräteunterlagen zu Finnigan MAT 252.

Fischer, L. & C. Knipper. 2003. Zur Untersuchung steinzeitlicher Landschaften: Die Besiedlung und Nutzung der Blaubeurer und Ulmer Alb im Paläolithikum, Mesolithikum und Neolithikum. Mitteilungen der Gesellschaft für Urgeschichte/Gesellschaft für Urgeschichte und Förderverein des Urgeschichtlichen Museums Blaubeuren 12, 113-139.

Fisher, L.; S. Harris; C. Knipper & R. Schreg. 2008a. Jungsteinzeitliche Hornsteingewinnung in Blaubeuren-Asch „Borgerhau“, Alb-Donau-Kreis, im Kontext der neolithischen Siedlungslandschaft auf der Blaubeurer Alb. Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2007, 36-41.

Fisher, L.; S. Harris; C. Knipper & R. Schreg. 2008b. Neolithic Chert Exploitation on the Swabian Alb (Germany): 2007 Excavations at Asch-„Borgerhau“. The Quarry 2, 11-17.

Fisher, L. E.; S. K. Harris; J. Affolter; C. Knipper & R. Schreg. 2013. Linking Quarry and Settlement on the Swabian Alb, Southern Germany. The Quarry 10, 8-20.

Fisher, L. E.; S. K. Harris; C. Knipper & R. Schreg. (druckfertig). „Neolithic Chert Extraction and Processing on the Southeastern Swabian Alb (Asch-Borgerhau)”. In: J. Lech & A. Saville (Hrsg.): Prehistoric Flint Mines in Europe. UISPP Commission on Flint Mining in Pre- and Protohistoric Times & Institute of Archaeology and Ethnology (Warsaw: Polish Academy of Siences).

Fitch, R. 2009. WinSTAT für Excel. Benutzerhandbuch (R. Fitch Software).

Fleming, B. A. & D. A. Crerar. 1982. Silicic acid ionization and calculation of silica solubility at elevated temperature and pH. Application to geothermal fluid processing and reinjection. Geothermics 11, 15-29.

Floss, H. 1994. Rohmaterialversorgung im Paläolithikum des Mittelrheingebietes. Römisch-Germanisches Zentralmuseum Monographien 21 (Bonn: Dr. Rudolf Habelt).

Floss, H. (Hrsg.). 2013. Steinartefakte. Vom Altpaläolothikum bis in die Neuzeit² (Tübingen: Kerns Verlag).

Föhr, J. von. 1892. Hügelgräber auf der Schwäbischen Alb (Stuttgart: Kohlhammer Verlag).

Gao, G. & L. S. Land. 1991. Nodular chert from the Arbuckle Group, Slick Hills, SW Oklahoma: a combined field, petrographic and isotopic study. Sedimentology 38, 857-870.

Gao, G. 1993. The temperatures and oxygen-isotope composition of early Devonian oceans. Nature 361, 712-714.

Gaucher, E. A.; S. Govindarajan & O. K. Ganesh. 2008. Palaeotemperature trend for Precambrian life inferred from resurrected proteins. Nature 451, 704-707.

Gayck, S. 2000. Urgeschichtlicher Silexbergbau in Europa. Eine kritische Analyse zum gegenwärtigen Forschungsstand. Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mitteleuropas 15 (Weissbach: Beier und Beran).

Geyer, M. (Bearb.). 1997a. Geologische Karte von Baden-Württemberg 1: 25.000: 7525 Ulm-Nordwest (Freiburg: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).

Geyer, M. (Bearb.). 1997b. Beiheft 7525 Ulm-Nordwest (Freiburg: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).

Geyer, O. F. & M. P. Gwinner. 2011. Geologie von Baden-Württemberg[5] (Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

Gijbels, R. & A. Adriaens. 2000. „Einleitung zu den massenspektrometrischen Methoden". In: M. K. Pavićević & G. Amthauer (Hrsg.): Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften. Bd. 1: Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung) 159-170.

Goessler, P. 1911. Die Altertümer des Oberamts Blaubeuren (Esslingen a.N.: Paul Neff Verlag).

Gottwald, W. 2000. Statistik für Anwender. Die Praxis der instrumentellen Analytik (Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH).

Govindarau, K. 1989. Compilation of working values and sample description for 272 geostandards. Special Issue of Geostandards Newsletter XIII.

Gwinner, M. P. 1974. Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000: 7522 Urach (Stuttgart: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).

Gwinner, M. P. 1998. Erläuterungen zum Blatt 7522 Bad Urach[4] (Freiburg: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).

Gwinner, M. P. 1980a. Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000: 7524 Blaubeuren (Stuttgart: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).

Gwinner, M. P. 1980b. Erläuterungen zu Blatt 7524 Blaubeuren (Stuttgart: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).

Hahn-Weinheimer, P.; A. Hirner & K. Weber-Diefenbach. 1995. Röntgenfluoreszenzanalytische Methoden. Grundlagen und praktische Anwendung in den Geo-, Material- und Umweltwissenschaften (Braunschweig, Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH).

Harris, S.; L. Fisher; C. Knipper & R. Schreg. 2009. Fortsetzung der Untersuchungen zur neolithischen Besiedlung und Hornsteinnutzung auf der Blaubeurer Alb, Alb-Donau-Kreis. Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2008, 34-37.

Hauptmann, A. 1999. "Feuerstein, Hornstein, Flint, Chert, Silex – eine Begriffsbestimmung" . In: G. Weisgerber, R. Slotta & J. Weiner (Bearb.): 5000 Jahre Feuersteinbergbau. Die Suche nach dem Stahl der Steinzeit[3]. Ausstellung im Deutschen Bergbau-Museum vom 24. Oktober 1980 bis 31. Januar 1981. Veröffentlichungen des Deutschen Bergbau-Museum Bochum 77 (Bochum), 7-11.

Heide, B. 2001. Das ältere Neolithikum im westlichen Kraichgau. Internationale Archäologie 53 (Rhaden/Westf.: Marie Leidorf GmbH).

Hein, J. R.; D. W. Scholl; J. A. Barron; M. G. Jones & J. Miller. 1978. Diagenesis of late Cenozoic diatomaceous deposits and formation of the bottom simulating reflector in the southern Bering Sea. Sedimentology 25, 155-181.

Hein, J. R. & S. M. Karl. 1983. „Comparisons between Open-Ocean and Continental Margin Chert Sequences“. In: A. Iijima; J. R. Hein & R. Siever (Hrsg.): Siliceous Deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology 36 (Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company) 25-43.

Hesse, R. 1988. Diagenesis #13. Origin of chert: Diagenesis of biogenic siliceous sediments. Geoscience Canada 15, 171-192.

Hesse, R. 1989. Silica Diagenesis: Origin of Inorganic and Replacement Cherts. Earth-Science Reviews 26, 253-284.

Hoefs, J. 2009. Stable Isotope Geochemistry[6] (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag).

Hollemann, A. F; E. Wiberg & N. Wiberg. 2007. Lehrbuch der Anorganischen Chemie[102] (Berlin, New York: Walter de Gruyter & Co).

Hren, M. T; M. M. Tice & C. P. Chamberlain. 2009. Oxygen and hydrogen isotope evidence for a temperate climate 3.42 billion years ago. Nature 462, 205-208.

Huber, B. T.; K. G. MacLeod & S. L. Wing. 2000. Warm Climates in Earth History (Cambridge: University Press).

Hurd, D. C. & F. Theyer. 1975. “Changes in the Physical and Chemical Properties of Biogenic Silica”. In: Th. R. Gibb (Hrsg.): Analytical methods in oceanography: a Symposium sponsored by the Divisi on of Analytical Chemistry at the 168th Meeting of the American Chemical Society, Atlantic City, N. J., Sept. 10-11, 1974. Advances in chemistry series 147 (Washington D. C.: American Chemical Society) 211-230.

Hurd, D. C.; H. St. Pankratz; V. Asper; J. Fugate & H. Morrow. 1981. Changes in the physical and chemical properties of biogenic silica from the central equatorial pacific: Part III, Specific pore volume, mean pore size, and skeletal ultrastructure of acid-cleaned samples. American Journal of Science 281, 833-895.

Hurd, D. C. 1983. „Physical and Chemical Properties of Siliceous Skeletons“. In: R. S. Aston (Hrsg.): Silicon Geochemistry and Biogeochemistry (London, New York: Academic Press) 187-241.

Iijima, A.; J. R. Hein & R. Siever. 1983. „An Introduction to Siliceous Deposits in the Pacific Region“. In: A. Iijima; J. R. Hein & R. Siever (Hrsg.): Siliceous Deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology 36 (Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company) 1-6.

Iler, R. K. 1979. The Chemistry of Silica. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry (New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons).

Isaacs, C. M. 1982. Influence of rock composition on kinetics of silica phase changes in the Monterey Formation, Santa Barbara area, California. Geology 10, 304-308.

Izák, F. & I. Lagzi. 2005. A new universal law for the Liesegang pattern formation. The Journal of Chemical Physics 122, 1-7.

Jenkins, R. 1988. X-Ray Fluorescence Spectrometry. Chemical Analysis. A Series of Monographs on Analytical Chemistry and its Applications 99 (New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons).

Jochum, K. P.; R. Gijbels & A. Adriens. 2000. „Multielementmassenspektrometrie (MMS)". In: M. K. Pavićević & G. Amthauer (Hrsg.): Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften. Bd. 1: Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung) 188-203.

Jochum, K. P.; X. Wang; T. W. Vennemann; B. Sinha & W. E. G. Müller. 2012. Siliceous deep-sea sponge Monoraphis chuni: A potential paleoclimate archive in ancient animals. Chemical Geology 300/301, 143-151.

Jones, J. B. & E. R. Segnit. 1972. Genesis of Cristobalite and Tridymite at low Temperatures. Journal of the Geological Society of Australia 18, 419-422.

Karhu, J. & S. Epstein. 1986. The implication of the oxygen isotope records in coexisting cherts and phosphates. Geochimica et Cosmochimica Acta 50, 1745-1756.

Kastner, M.; J. B. Keene & J. M. Gieskes. 1977. Diagenesis of siliceous oozes. I. Chemical controls of the rate of opal-A to opal-CT transformation – an experimental study. Geochimica et Cosmochimica Acta 41, 1041-1059.

Kastner, M. 1981. "Authigenic Silicates in the Deep-sea Sediments: Formation and Diagenesis". In: C. Emiliani (Hrsg.): The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas 7 (New York: John Wiley & Sons) 915-940.

Kastner, M. & J. M. Gieskes. 1983. „Opal-A to Opal-CT Transformation: A Kinetic Study". In: A. Iijima; J. R. Hein & R. Siever (Hrsg.): Siliceous Deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology 36 (Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company) 211-227.

Kasztovszky, Zs; K. T. Biró; A. Markó & V. Dobosi. 2008. Cold Neutron Prompt Gamma Activation Analysis - a non-distructive method for characterization of high silica content chipped stone tools and raw materials. Archaeometry 50, 12-29.

Keefer, E. 1993. Steinzeit. Württembergisches Landesmuseum Stuttgart (Hrsg.). Sammlungen des Württembergischen Landesmuseums Stuttgart Bd. 1 (Stuttgart: Theiss).

Keene, J. B. 1975. „Cherts and porcellanites from the north Pacific, DSDP Leg 32". In: R. L. Larson, R. Moberley et al. (Hrsg.): Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 32 (Washington: U.S. Government Printing Office) 429-507.

Kenny, R. & L. P. Knauth. 1992. Continental paleoclimates from δD and $\delta^{18}O$ of secondary silica in paleokarst chert lags. Geology 20, 219-222.

Keuerleber, F. (S. Schiek). 1975. Wittlingen (Lkr. Münsingen). Fundberichte aus Baden-Württemberg 2, 60.

Kind, C.-J. 1987. Das Felsställe. Eine jungpaläolithisch-frühmesolithische Abri-Station bei Ehingen-Mühlen, Alb-Donau-Kreis. Die Grabungen 1975-1980. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 23 (Stuttgart: Konrad Theiss Verlag).

Kind, C.-J. 1991. „Wittlingen Gemeinde Bad Urach, Kreis Reutlingen". In: Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.): Urgeschichte in Oberschwaben und der mittleren Schwäbischen Alb. Zum Stand neuer Untersuchungen der Steinzeit-Archäologie. Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg 17, 81-83.

Kita, I.; S. Taguchi & O. Matsubaya. 1985. Oxygen isotope fractionation between amorphous silica and water at 34-93 °C. Nature 314, 83-84.

Kita, I. & S. Taguchi. 1986. Oxygen isotopic behavior of precipitating silica from geothermal water. Geochemical Journal 20, 153-157.

Klockenkämper, R. 1997. Total-Refection X-Ray Fluorescence Analysis. Chemical Analysis. A Series of Monographs on Analytical Chemistry and its Applications 140 (New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, Weinheim: John Wiley & Sons).

Knauth, L. P. & S. Epstein. 1975. Hydrogen and oxygen isotope ratios in silica from the Joides Deep Sea Drilling Project. Earth and Planetary Science Letters 25, 1-10.

Knauth, L. P. & S. Epstein. 1976. Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts. Geochimica et Cosmochimica Acta 40, 1095-1108.

Knauth, L. P. & D. R. Lowe. 1978. Oxygen isotope geochemistry of cherts from Onverwacht (3.4 billion years), Transvaal, South Africa, with implications secular variations in the isotopic composition of cherts. Earth and Planetary Science Letters 41, 209-222.

Knauth, L. P. 1979. A model for the origin of chert in limestone. Geology 7, 274-277.

Knauth, P. 1993. Ancient sea water. Nature 362, 290-291.

Knauth, L. P. 1998. Salinity history of the Earth's early ocean. Nature 395, 554-555.

Knauth, L. P. 2005. Temperature and salinity history of the Precambrian ocean: implications for the course of microbial evolution. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 219, 53-69.

Knipper, C.; S. Harris; L. Fisher; R. Schreg; J. Giesler & E. Nocerino. 2005. The Neolithic Settlement Landscape of the Southeastern Swabian Alb (Germany) (www.jungsteinsite.de vom 09.12.2009).

Knipper, C.; L. Fisher; S. Harris & R. Schreg. 2007. Sondagegrabungen zur neolithischen Hornsteinnutzung in Blaubeuren-Sonderbuch, Alb-Donau-Kreis. Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2006, 33-37.

Köhler, W.; G. Schachtel & P. Voleske. 2007. Biostatistik. Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler[4] (Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag).

Kolodny, Y. & S. Epstein. 1976. Stable isotope geochemistry of deep sea cherts. Geochimica et Cosmochimica Acta 40, 1195-1209.

Kolodny, Y.; M. Chaussidon & A. Katz. 2005. Geochemistry of a chert breccia. Geochimica et Cosmochimica Acta 69, 427-439.

Kuleff, I. & R. Djingova. 1990. “Activation Analysis in Archaeology”. In: Z. Alfassi (Hrsg.): Activation Analysis 2 (Boca Raton Florida: CRC-Press Inc.) 427-489.

Labeyrie, L. 1974. New approach to surface seawater palaeotemperatures using $^{18}O/^{16}O$ ratios in silica of diatom frustules. Nature 248, 40-42.

Lambert, J. B. 1998. Traces of the Past. Unraveling the Secrets of Archaeology through Chemistry (Massachusetts: Perseus Books).

Landmesser, M. 1994. “Zur Entstehung von Kieselhölzern“. In: U. Dernbach: Versteinertes Holz: aus Holz wird Stein; die Mineralogie der Holzversteinerung. extraLapis 7 (München: Weise) 49-80.

Lear, C. H.; H. Elderfield & P. A. Wilson. 2000. Cenozoic Deep-Sea Temperatures and Global Ice Volumes from Mg/Ca in Benthic Foraminiferal Calcite. Science 287, 269-272.

Lichardus, A. 1999. „Zur Bedeutung der Feuersteingewinnung in der jüngeren Steinzeit Mitteleuropas“. In: G. Weisgerber, R. Slotta & J. Weiner (Bearb.): 5000 Jahre Feuersteinbergbau. Die Suche nach dem Stahl der Steinzeit[3]. Ausstellung im Deutschen Bergbau-Museum vom 24. Oktober 1980 bis 31. Januar 1981. Veröffentlichungen des Deutschen Bergbau-Museum Bochum 77 (Bochum), 265-270.

Lide, D. R. (Hrsg.). 2007/2008. CRC Handbook of Chemistry and Physics. A Ready-Reference Book of Chemical and Physical data[88] (London, New York: Taylor & Francis Group) Table of the Isotopes 11-59.

Malyk-Selivanova, N.; G. M. Ashley; R. Gal; M. D. Glascock & H. Neff. 1998. Geological-Geochemical Approach to “Sourcing” of Prehistoric Chert Artifacts, Northwestern Alaska. Geoarchaeology: An International Journal 13, 673-708.

Marin, J.; M. Chaussidon & F. Robert. 2010. Microscale oxygen isotope variations in 1.9 Ga Gunflint cherts: Assessments of diagenesis effects and implications for oceanic paleotemperature reconstructions. Geochimica et Cosmochimica Acta 74, 116-130.

Marin-Carbonne, J.; M. Chaussidon; M.-Ch. Boiron & F. Robert. 2011. A combined in situ oxygen, silicon isotopic and fluid inclusion study of a chert sample from Onverwacht Group (3.35 Ga, South Africa): New constraints on fluid circulation. Chemical Geology 286, 59-71.

Markl, G. 2008. Minerale und Gesteine. Mineralogie – Petrologie – Geochemie² (Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag).

Matheney, R. K. & L. P. Knauth. 1989. Oxygen-isotope fractionation between marine biogenic silica and seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta 53, 3207-3214.

Matheney, R. K. & L. P. Knauth. 1993. New isotopic temperature estimates for early silica diagenesis in bedded cherts. Geology 21, 519-522.

Matsuhisa, Y; J. R. Goldsmith & R. N. Clayton. 1979. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. Geochimica et Cosmochimica Acta 43, 1131-1140.

Matthews, A. & R. D. Beckinsale. 1979. Oxygen isotope equilibration between quartz and water. American Mineralogist 64, 232-240.

McBride, E. F.; A. Abdel-Wahab & A. R. M. El-Younsy. 1999. Origin of spheroidal chert nodules, Drunka Formation (Lower Eocene). Egypt. Sedimentology 46, 733-755.

Middleton, G. V.; M. J. Church; M. Coniglio. 2003. Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks. Kluwer Academic encyclopedia of earth sciences series (Dordrecht: Kluwer).

Migaszewski, Z. M.; A. Gałuszka; T. Durakiewicz & E. Starnawska. 2006. Middle Oxfordian-Lower Kimmeridgian chert nodules in the Holy Cross Mountains, south-central Poland. Sedimentary Geology 187, 11-28.

Mizutani, S. 1977. Progressive Ordering of Cristobalitic Silica in the Early Stage of Diagenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology 61, 129-140.

Mommsen, H. 1986. Archäometrie (Stuttgart: Teubner, Studienbücher).

Mommsen, H. 2001. Provenance determination of pottery by trace element analysis: Problems, solutions and applications. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 247, 657-662.

Morgenstein, M. 2006. "Geochemical and petrographic approaches to chert tool provenance studies: evidence from two western USA Holocene archaeological sites". In: M. Maggetti & B. Messiga (Hrsg.): Geomaterials in Cultural Heritage. Special publication 257 (London: Geological Society) 307-321.

Mortimer, Ch. E. 1987. Chemie. Das Basiswissen der Chemie[5] (Stuttgart: Georg Thieme Verlag).

Moschen, R. 2004. Die Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals lakustriner Sedimente als mögliches Paläothermometer. Eine Kalibrierungsstudie im Holzmaar (Westeifel-Vulkanfeld). Dissertation der Universität zu Köln (http:// juwel.fz-juelich.de:8080dspace/-bitstream/2128/166/1/Umwelt_51.pdf vom 22.01.2014).

Muehlenbachs, K. 2004. Oxygen isotopic composition of the Paleozoic and Precambrian Ocean Water. 2004 Denver Annual Meeting (November 7-10, 2004), Paper 205-3 (http://gsa.confex.com/gsa/2004am/finalprogram/abstract_80661.htm vom 11.07.2009).

Muller, J.; M. Kylander; A. Martinez-Cortizas; R. A. J. Wüst; D. Weiss; K. Blake; B. Coles & R. Garcia-Sanchez. 2008. The use of principle component analysis in characterising trace and major elemental distribution in a 55 kyr peat deposit in tropical Australia: Implications to paleoclimate. Geochimica et Cosmochimica Acta 72, 449-463.

Munsell Soil Color Charts. 2000 (New Windsor, NY: Gretagmacbeth).

Murata, K. J. & R. R. Larson. 1975. Diagenesis of Miocene siliceous shales, Temblor Range, California. Journal of Research of the U. S. Geological Survey 3, 553-566.

Murata, K. J. & M. B. Norman, II. 1976. An Index of Crystallinity for Quartz. American Journal of Science 276, 1120-1130.

Murata, K. J.; I. Friedman & J. D. Gleason. 1977. Oxygen Isotope Relations between Diagenetic Silica Minerals in Monterey Shale, Temblor Range, California. American Journal of Science 277, 259-272.

Murray, R. W.; M. R. Buchholtz ten Brink; D. C. Gerlach; G. P. Russ III & D. L. Jones. 1992a. Interoceanic variation in the rare earth, major, and trace element depositional chemistry of chert: Perspectives gained from DSDP and ODP record. Geochimica et Cosmochimica Acta 56, 1897-1913.

Murray, R. W.; M. R. Buchholtz ten Brink; D. C. Gerlach; G. P. Russ III & D. L. Jones. 1992b. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis. Geochimica et Cosmochimica Acta 56, 2657-2671.

Murray, R. W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: generel principles and applications. Sedimentary Geology 90, 213-232.

Nuber, A. H. 1962. Der steinzeitliche Fundplatz „Borgerhau“, Markung Asch (Kr. Ulm). Fundberichte aus Schwaben. N. F. 16, 21-39.

Pavićević, M. K. 2000. “Messgenauigkeit und Messfehler”. In: M. K. Pavićević & G. Amthauer (Hrsg.): Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften. Bd. 1: Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart: Schweizerbart’sche Verlagbuchhandlung) 6-11.

Pernicka, E. 2000. „Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)“. In: K. M. Pavićević & G. Amthauer (Hrsg.): Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften. Bd. 1: Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart: Schweizerbart’sche Verlagbuchhandlung) 151-158.

Perry, E. C. Jr. 1967. The Oxygen Isotope Chemistry of Ancient Cherts. Earth and Planetary Science Letters 3, 62-66.

Perry, E. C. Jr. & F. C. Tan. 1972. Significance of Oxygen and Carbon Isotope Variations in Early Precambrian Cherts and Carbonate Rocks of Southern Africa. Geological Society of America Bulletin 83, 647-664.

Perry, E. C. & L. Lefticariu. 2006. The oxygen isotopic composition of Precambrian cherts. Goldschmidt Conference Abstracts A483, Melbourne (http://www.goldschmith-abstracts.info/2006/746.pdf vom 11.03.2014)

Pfretzschner, H.-U. 2009. Data handling – Einführung in die angewandte Statistik für Geowissenschaftler. Vorlesungsskript [unpubliziert]. (intern zur Verfügung gestellt im April/Mai 2011)

Pisciotto, K. A. 1981. Diagenetic trends in the siliceous facies of the Monterey Shale in the Santa Maria region, California. Sedimentology 28, 547-571.

Pollard, A. M.; C. Batt; B. Stern & S. M. M. Young. 2007. Analytical Chemistry in Archaeology (Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo: Cambridge University Press).

Postl, W.; Ch. Hauzenberger & W. Gössler. 2007. Vergleichende geochemische und mineralogische Untersuchungen an Hornstein aus Rein bei Graz (Steiermark, Österreich) und Baiersdorf bei Erlangen (Bayern, Deutschland). Joannea Mineralogie & Petrologie 4, 99-114.

von Rad, U. & H. Rösch. 1974. „Petrography and diagenesis of deep-sea cherts from central Atlantic". In: K. J. Hsü & H. C. Jenkyns (Hrsg.): Pelagic Sediments: on Land and under the Sea. Proceedings of a symposium held at the Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 25-6 September 1973. International Association of Sedimentologists Special Publication1 (Oxford, London, Edinburgh, Melbourne: Blackwell Scientific Publications) 327-347.

von Rad, U. 1979. SiO_2-Diagenese in Tiefseesedimenten. Geologische Rundschau 68, 1025-1036.

Reichl, W. & J.-M. Lange. 2007. Cherts (Hornsteine) aus dem Döhlener Becken bei Dresden. Cherts (hornstones) from the Döhlen Basin near Dresden. Geologica Saxonia, Journal of Central European Geology 52/53, 117-128.

Reisch, L. 1974. Der vorgeschichtliche Hornsteinabbau bei Lengfeld, Ldkr. Kelheim, und die Interpretation grobgerätiger Silexindustrien in Bayern. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. Materialhefte zur Bayerischen Vorgeschichte 29 (Kallmünz/OPf.: Verlag Michael Lassleben).

Riech, V. & U. von Rad. 1979. "Silica Diagenesis in the Atlantic Ocean: Diagenetic Potential and Transformations". In: M. Talwani; W. Hay, W. B. F. Ryan (Hrsg.): Deep Drilling Results in the Atlantic Ocean: Continental Margins and Paleoenvironment. Maurice Ewing Series 3 (Washington: American Geophysical Union) 315-340.

Rind, M. M. 2006. „ New excavations in the Neolithic chert mine of Arnhofen, Stadt Abensberg, Lkr. Kelheim, Lower Bavaria". In: G. Körlin & G. Weisgerber (Hrsg.): Stone Age - Mining Age. VIII. International Flint Symposium, Bochum, 13.-17. September 1999, Deutsches Bergbau-Museum. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 148 (Essen: Druckmeister) 183-186.

Robert, F. 1988. Carbon and oxygen isotope variations in Precambrian cherts. Geochimica et Cosmochimica Acta 52, 1473-1478.

Robert, F.; A. Rejou-Michel & M. Javoy. 1992. Oxygen isotopic homogeneity of the Earth: new evidence. Earth and Planetary Science Letters 108, 1-9.

Robert, F. & M. Chaussidon. 2006. A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts. Nature 443, 969-972.

Roth, G. 2008. Geben und Nehmen. Eine wirtschaftshistorische Studie zum neolithischen Hornsteinbergbau von Abensberg-Arnhofen, Kr. Kehlheim (Niederbayern) (Bd. 1-4). Dissertation der Universität zu Köln (http://kups.ub.uni-koeln.de/4176/ vom 11.03.2014).

Rothe, P. 2002. Gesteine. Entstehung – Zerstörung – Umbildung (Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft).

Saville, A. (Hrsg.) 2011. Flint and Stone in the Neolithic Period. Neolithic Studies Group Seminar Papers 11 (Oxford: Oxbow Books).

Schlotz & Uhlig. 2000/2001. Einführung in die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) (Karlsruhe).

Schmid, F. 1986. „Flint stratigraphy and its relationship to archaeology“. In: G. de G. Sieveking & M. B. Hart (Hrsg.): The scientific study of flint and chert. Proceedings of the fourth international flint symposium held at Brighton Polytechnic 10-15 April 1983 (New York: Cambridge University Press) 1-5.

Schmid, R. (H. Zürn). 1975. Asch (Lkr. Ulm). Fundberichte aus Baden-Württemberg 2, 8.

Schmidt, M.; R. Botz; P. Stoffers; T. Anders & G. Bohrmann. 1997. Oxygen isotopes in marine diatoms: A comparative study of analytical techniques and new results on the isotope composition of recent marine diatoms. Geochimica et Cosmochimica Acta 61, 2275-2280.

Schönwiese, Ch.-D. 2006. Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler[4] (Berlin, Stuttgart: Borntraeger).

Seewald, Ch. 1972a. “Vor- und Frühgeschichte”. In: Staatliche Archivverwaltung Baden-Württemberg in Verbindung mit der Stadt Ulm und dem Landkreis Ulm (Hrsg.): Der Stadt- und Landkreis Ulm. Allgemeine Kreisbeschreibung. Allgemeiner Teil (Ulm: Süddeutsche Verlagsgesellschaft) 187-204.

Seewald, Ch. 1972b. „Fundbeschreibung Asch: Mesolithikum“. In: Staatliche Archivverwaltung Baden-Württemberg in Verbindung mit der Stadt Ulm und dem Landkreis Ulm (Hrsg.): Der Stadt- und Landkreis Ulm. Archäologischer Fundkatalog (Ulm: Süddeutsche Verlagsgesellschaft) 21.

Sharbaugh, A. H. III & A. H. Sharbaugh Jr. 1989. An Experimental Study of the Liesegang Phenomenon and Crystal Groth in Silica Gels. Journal of Chemical Education 66, 589-594.

Sharp, Z. D. & D. L. Kirschner. 1994. Quartz-calcite isotope thermometry: A calibration based on natural isotopic variations. Geochimica et Cosmochimica Acta 58, 4491-4501.

Sharp, Z. D.; T. Durakiewicz; Z. M. Migaszewski & V. N. Atudorei. 2002. Antiphase hydrogen and oxygen isotope periodicity in chert nodules. Geochimica et Cosmochimica Acta 66, 2865-2873.

Sharp, Z. 2007. Principles of Stable Isotope Geochemistry (New Jersey: Pearson Prentice Hall).

Siever, R. 1983. „Evolution of Chert at Active and Passive Continental Margins“. In: A. Iijima; J. R. Hein & R. Siever (Hrsg.): Siliceous Deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology 36 (Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company) 7-24.

Stanley, St. M. 2001. Historische Geologie² (Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH).

Stein, C. L. & R. J. Kirkpatrick. 1976. Experimental Porcelanite Recrystallization Kinetics: A Nucleation and Growth Model. Journal of Sedimentary Petrology 46, 430-435.

Strien, H.-Ch. 2000. Untersuchungen zur Bandkeramik in Württemberg. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 69. Aus dem Seminar für Vor- und Frühgeschichte der Universität Frankfurt/M. (Bonn: Dr. Rudolf Habelt GmbH).

Tada, R. & A. Iijima. 1983. “Identification of Mixtures of Opaline Silica Phases and its Implication for Silica Diagenesis”. In: A. Iijima; J. R. Hein & R. Siever (Hrsg.): Siliceous Deposits in the Pacific Region. Developments in Sedimentology 36 (Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company) 229-245.

Tice, M. M.; B. C. Bostick & D. R. Lowe. 2004. Thermal history of the 3.5-3.2 Ga Onverwacht and Fig Tree Groups, Barberton greenstone belt, South Afrika, inferred by Raman microspectroscopy of carbonaceous material. Geology 32, 37-40.

Tucker, M. E. 2001. Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks[3] (Oxford: Blackwell Science Ltd).

Vakhrameev, V. A. 1991. Jurassic and Cretaceous floras and climates of the Earth (Cambridge: University Press).

van Zuilen, M. A.; M. Chaussidon; C. Rollion-Bard & B. Marty. 2007. Carbonaceous cherts of the Barberton Greenstone Belt, South Africa: Isotopic, chemical and structural Characteristics of individual microstructures. Geochimica et Cosmochimica Acta 71, 655-669.

Vengosh, A.; Y. Kolodny & M. Tepperberg. 1987. Multi-Phase Oxygen Isotopic Analysis as a Tracer of Diagenesis: The Example of the Mishash Formation, Cretaceous of Israel. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section) 65, 235-253.

Verma, H. R. 2007. Atomic and Nuclear Analytical Methods. XRF, Mössbauer, XPS, NAA and Ion-Beam Spectroscopic Techniques (Berlin, Heidelberg: Springer Verlag).

Villinger, E. (Bearb.). 2005. Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg – Verzeichnis Geologischer Einheiten – Einzelgliederung Jura Stand: Mai 2005 (Freiburg: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg).

Weber, K. 1978a. Geologische Karte von Bayern 1: 25 000: 7137Abensberg (München: Bayerisches Geologisches Landesamt).

Weber, K. 1978b. Erläuterungen zum Blatt 7137Abensberg (München: Bayerisches Geologisches Landesamt).

Weber-Diefenbach, K. 2000. „Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)“. In: M. K. Pavićević & G. Amthauer (Hrsg.): Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften. Bd. 1: Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart: Schweizerbart’sche Verlagbuchhandlung) 115-132.

Wehrberger, K. 1989. „Ur- und Frühgeschichte“. In: Landesarchivdirektion Baden-Württemberg in Verbindung mit dem Alb-Donau-Kreis (Hrsg.): Der Alb-Donau-Kreis 1. Kreisbeschreibungen des Landes Baden Württemberg (Sigmaringen: Jan Thorbecke Verlag) 82-97.

Weisgerber, G. 1980. „D 10 Asch, „Borgerhau“, Ldkr. Ulm“. In: G. Weisgerber, R. Slotta & J. Weiner (Bearb.): 5000 Jahre Feuersteinbergbau. Die Suche nach dem Stahl der Steinzeit. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 22 (Bochum: Ausstellungskatalog) 450.

Wille, M.; J. Sutton; M. J. Ellwood; M. Sambridge; W. Maher; St. Eggins & M. Kelly. 2010. Silicon isotopic fractionation in marine sponges: A new model for understanding silicon isotopic variations in sponges. Earth and Planetary Science Letters 292, 281-289.

Willey, J. D. 1980. Effects of aging on silica solubility: a laboratory study. Geochimica et Cosmochimica Acta 44, 573-578.

Willey, J. D. 1982. Partial molal volume calculations for the dissolution of aged amorphous silica in salt water and seawater at 0-2 °C. Geochimica et Cosmochimica Acta 46, 1307-1310.

Williams, L. A.; G. A. Parks & D. A. Crerar. 1985. Silica diagenesis. I. Solubility controls. Jounal of Sedimentary Petrology 55, 301-311.

Williams, L. A. & D. A. Crerar. 1985. Silica diagenesis. II. General mechamisms. Journal of Sedimentary Petrology 55, 312-321.

Wilson, R. C. L. 1966. Silica Diagenesis in Upper Jurassic Limestones of Southern England. Journal of Sedimentary Petrology 36, 1036-1049.

Winter, B. L. & L. P. Knauth 1992. Stable isotope geochemistry of cherts and carbonates from 2.0 Ga Gunflint iron formation – implications for the depositional setting, and the effects of diagenesis and metamorphism. Precambrian Research 59, 283-313.

Wise, S. W. Jr. & F. M. Weaver. 1974. “Chertification of oceanic sediments”. In: K. J. Hsü & H. C. Jenkyns (Hrsg.): Pelagic Sediments: on Land and under the Sea. Proceedings of a symposium held at the Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 25-6 September 1973. International Association of Sedimentologists Special Publication1 (Oxford, London, Edinburgh, Melbourne: Blackwell Scientific Publications) 301-326.

Zachos, J.; M. Pagani; L. Sloan; E. Thomas & K. Billups. 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations on Global Climate 65 Ma to Present. Science 292, 686-693.

Zhang, R.; H. P. Schwarcz; D. C. Ford; F. S. Schroeder & P. A. Beddows. 2008. An absolute paleotemperature record from 10 to 6 Ka inferred from fluid inclusion D/H ratios of a stalagmite from Vancouver Island, British Columbia, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta 72, 1014-1026.

Zheng, Y-F. 1992. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. Geochimica et Cosmochimica Acta 57, 1079-1091.

Zimmermann, A. 1995. Austauschsysteme von Silexartefakten in der Bandkeramik Mitteleuropas. Universitätsforschungen zur prähistorischen Achäologie 26. Aus dem Seminar für Vor- und Frühgeschichte der Universität Frankfurt /M. (Bonn: Dr. Rudolf Habelt GmbH).

Anhang

A Optische Eigenschaften der untersuchten Hornsteine 199

A1 Abkürzungen verwendeter Begriffe (verändert nach L. Fisher 2007) 199

A2 Fundorte und optische Eigenschaften der Hornsteine im Überblick..... 201

B Binäre Diagramme 209

B1 Borg./Witt. 209

B2 Wipp./Witt. 211

B3 Borg./Wipp. 213

B4 Arnh./Borg + Wipp..... 214

B5 Co vs. TiO_2 (alle Fundorte) 214

B6 $\delta^{18}O$ in Opal-CT- und Quarz-Cherts aus der Literatur..... 215

B7 $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte verschiedener geologischer Zeiträume..... 216

C Globale Temperaturänderungen der letzten 542 Millionen Jahre 219

D Tabellen 220

D1 WDRFA-Werte (x_i) mit Standardabweichung (3σ)..... 220

D1.1 SiO_2 (%), TiO_2 (%), Al_2O_3 (%), Fe_2O_3 (%), MnO (%)..... 220

D1.2 MgO (%), CaO (%), Na_2O (%), K_2O (%), P_2O_5 (%), LOI (%) 223

D1.3 Ba (ppm), Co (ppm), Cr (ppm), Ni (ppm), Rb (ppm), Sr (ppm)..... 226

D1.4 V (ppm), Y (ppm), Zn (ppm), Zr (ppm), Ce (ppm), Eu (ppm) 229

D1.5 La (ppm), Nb (ppm), Nd (ppm), Sm (ppm), Yb (ppm), Summe (%) 232

D2 lg(x+1)-Werte der WDRFA-Daten für die multivariate Statistik 235

D2.1 TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, LOI 235

D2.2 Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb 238

D3 Eigene $\delta^{18}O$-Werte und von Cherts aus der Literatur 241

D4 $\delta^{18}O$-und δD-Werte von Cherts aus der Literatur 255

E Statistik..... 263

E1 Signifikanz der Normalverteilung nach verschiedenen Methoden 263

E1.1 TiO_2, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, LOI 263

E1.2 Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb 264

E2 Post-hoc-Mehrfachvergleichstabelle der ANOVA 265

E3 Korrelationen nach Pearson auf beiliegender CD 269

E4 Faktorenanalyse..... 270

E4.1 Anti-Image-Matrizen 270

E4.2 Eigenwerte und Gesamtvarianz 273
E4.3 KMO-Tests 275
E5 Diskriminanzanalyse 275
E5.1 Klassifizierungsergebnisse 275
E5.2 Fallweise Statistik 277
E5.2.1 Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken (mit Grund) 277
E5.2.2 Alle Variablen, zwei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken auf beiliegender CD 280
E5.2.3 Sechs Variablen (TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu), zwei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken auf beiliegender CD 280
E5.2.4 Schrittweise Diskriminanzanalyse (K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu), zwei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken auf beiliegender CD 280
E5.3 Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten (nicht standardisiert) 281
E5.4 Standardisierte Diskriminanzfunktionskoeffizienten 282
E5.5 Gemeinsame Korrelationen: Strukturmatrix 284
E5.6 Funktionen bei den Gruppenzentroiden 286
E5.7 Eigenwerte und Wilk's Lambda 287
E5.8 Schrittweise Diskriminanzanalyse 289
E6 Clusteranayse 290
E6.1 ANOVA der Clusterzentrenanalyse 290
E6.2 Verarbeitete Fälle in der Clusteranalyse 290
E6.3 Auf der Basis der quadrierten euklidischen Distanz erstellte Näherungsmatrix auf beiliegender CD 290
E6.4 Agglomerationsschritte der Clusteranalyse 291
E6.5 Ergebnis der Clusteranalyse 292

A Optische Eigenschaften der untersuchten Hornsteine

A1 Abkürzungen verwendeter Begriffe (verändert nach L. Fisher 2007)

Abkürzung	Deutsch	Englisch
	Fundart	**Find**
LF	Lesefund	surface find
GF	Grabungsfund	archaeological find
	Profilrichtung	**Direction of profile**
N	Nord	north
E	Ost	east
S	Süd	south
W	West	west
RM	**Rohmaterialart**	**Raw material type**
JC	weißer oder grauer Jurahornstein	white or gray chert
BC	brauner, ocker- oder beigefarbener Jurahornstein	brown, yellow-brown or beige Jura chert
TC	Bayerischer Plattenhornstein	Bavarian tabular chert
TRC	Triashornstein	Trias chert
IN	unbestimmtes Rohmaterial	other material, not identifiable
GF	**Rohmaterialform**	**Type of raw material block**
ND	Knolle	nodule
FN	Fladen	flat nodule
TB	Plattenhornstein	tabular chert
IN	nicht bestimmbar	indeterminate
BT	**Artefakt-Grundform**	**Blank type**
CO	Kern /–fragment mit >3 Abschlagsnegativen	core with more than 3 flake scars
FL	Abschlag	flake
BL	Klinge	blade
SH	Trümmer (keine Ventralfläche)	shatter (no ventral face)
NSH	natürlicher Trümmer (kein Artefakt)	natural shatter, non-artifact
TSH	getestete Knolle mit ≤ 3 Abschlagsnegativen	tasted nodule with ≤ 3 flake scars
COR	**Cortexart**	**Corttype**
FR	rauer Cortex	“fresh” chert cortex
TH	glatter Cortex	cortex smoothed
AB	Cortex fehlend	cortex absent
COT	**Cortexdicke**	**Cortex thickness**
CFOS	**Cortexfossilien**	**Fossils in Cortex**

Abkürzung	Deutsch	Englisch
COC	**Cortexfarbe**	**Cortex color**
W	weißlich bis sehr hellgrau	white to very light gray
G	beige-grau	yellow-gray
B	beige bis braun	very pale brown to brown
Y	gelblich bis ocker-orange	yellow to reddish yellow
CL	**Hornsteinfarbe**	**Chert color**
WH	weißlich bis sehr hellgrau	white to light gray
GR	hell- bis dunkelgrau	medium to dark gray
YG	beige-grau	yellow-gray
YB	ocker bis braun	yellow to brown
SCL	**Sägeschnittfarbe**	**Saw cut color**
CC	**Farbverteilung**	**Color change**
CB	konzentrisch gebändert	concentric banding
PB	parallel gebändert	parallel banding
SM	schlierig/marmoriert	smeary/marbled
IN	nicht bestimmbare Musterung	indeterminate
od	Richtung Rinde dunkler werdend	direction cortex more dark
md	Richtung Zentrum dunkler werdend	direction centrum more dark
IC	**Einschlüsse**	**Inclusions**
INH	Inhomogenitäten	inhomogen
FOS	Fossilien	fossils
SPN	Schwammnadeln	sponges spicules
PA	**Patinierung**	**Patination**
GL	**Glanz**	**Gloss**
QU	**Qualität**	**Quality**
1	sehr feinkörnig, glänzend	very fine grained/shiny, lustrous
2	feinkörnig, glatte Bruchfläche	fine-grained, smooth break surface
3	mittelkörnig, matt bis leicht körnig	medium grained, matte to slightly grainy
4	grobkörnig, Bruchfläche rau	coarse-grained, fracture surface rough
5	heterogen, > 20 % fällt in 2 oder mehr Gruppen	inhomogen, > 20 % fall into 2 or more groups
6	kein muscheliger Bruch	no conchoidal break
9	unbestimmbar	unable to determine

A2 Fundorte und optische Eigenschaften der Hornsteine im Überblick

Hornstein-probe	Fundart	Schnitt	Pro-fil/ Flä-che	Größter Durch-Messer l in mm	Gewicht m in g	Rohma-terialart RM	Rohma-terial-form GF	Artefakt-form BT	Cortex-art COR	Cortex dicke COT in mm	Cortex-farbe COC	Cortex-fossilien CFOS	Horn-stein-farbe CL
Arnh. 1	LF			75	72	TC	TB	TSH	FR	<1	Y		GR
Arnh. 2	LF			67	69	TC	TB	TSH	FR	<1	Y		GR
Arnh. 3	LF			60	39	TC	TB	TSH	FR	<2	Y		GR
Arnh. 4	LF			66	51	TC	TB	TSH	FR	<1	Y		GR
Arnh. 5	LF			62	83	TC	TB	CO	FR	<2	Y		GR
Arnh. 6	LF			116	115	TC	TB	CO	FR / TH	<1	Y		YG
Arnh. 7	LF			54	77	TC	TB	CO	FR	<2	B		GR
Arnh. 8	LF			60	38	TC	TB	TSH	FR	<1	W		GR
Arnh. 9	LF			52	45	TC	TB	TSH	FR	<1	W		GR
Arnh. 10	LF			56	37	TC	IN	TSH	TH	<1	W		GR
Arnh. 11	LF			80	48	TC	TB	NSH	FR / TH	<1	Y		GR
Arnh. 12	LF			48	46	TC	TB	NSH	FR / TH	<1	Y		GR
Arnh. 13	LF			85	139	TC	TB	NSH	FR / TH	<1	W		YG
Arnh. 14	LF			74	82	TC	TB	NSH	FR / TH	<1	W		YG
Arnh. 15	LF			65	60	TC	TB	CO	TH	<1	W		GR
Borg. 1	GF	3	3	95	131	JC	ND	SH/CO	FR	<1-4	Y		GR
Borg. 2	GF	5	3	97	338	JC	ND	SH	FR	<1	Y		WH
Borg. 3	GF	5	3	69	260	JC	ND	FL	FR	<1	Y		WH
Borg. 4	GF	5	4	107	536	JC	ND	NSH	FR	<1-16	Y		GR
Borg. 5	GF	4	9	82	203	JC	ND	NSH	FR	>4-9	Y		GR
Borg. 6	GF	5	4	109	322	JC	ND	TSH	FR	<1	Y		WH

Hornstein-probe	Fundart	Schnitt	Pro-fil/ Flä-che	Größter Durch-Messer l in mm	Gewicht m in g	Rohma-terialart RM	Rohma-terial-form GF	Artefakt-form BT	Cortex-art COR	Cortex dicke COT in mm	Cortex-farbe COC	Cortex-fossilien CFOS	Horn-stein-farbe CL
Borg. 7	GF	3	E	149	716	JC	ND	NSH	FR	>3-7	Y		GR
Borg. 8	GF	3	E	106	362	JC	ND	SH	FR/TH	<1-12	Y		GR
Borg. 9	GF	1	S	146	927	JC	FN	TSH	FR	<1-14	Y		GR
Borg. 10	GF	4	N	120	575	JC	ND	NSH	FR/TH	>3-13	Y		GR
Borg. 11	GF	4	N	118	303	JC	ND	NSH	FR	>4-10	Y		WH
Borg. 12	GF	4	S	133	777	JC	FN/ND	TSH	FR	<1-6	Y		GR
Borg. 13	GF	4	E	126	705	JC	ND	NSH	FR	>1-13	Y	CFOS	GR
Borg. 14	GF	4	E	116	649	JC	ND	NSH	FR	>1-13	Y		WH
Borg. 15	GF	5	N	206	1789	JC	FN	NSH	FR	<1-2	Y	CFOS	GR
Borg. 16	GF	5	E	133	805	JC	ND	NSH	FR	<1	Y		WH
Borg. 17	GF	5	S	179	2160	BC	ND	NSH	FR	<1	B	CFOS	YG
Borg. 18	GF	5	5	132	938	JC	ND	NSH	FR	<1	Y	CFOS	GR
Borg. 19	GF	3	7	95	246	JC	ND	NSH	FR	<1-5	Y		WH
Borg. 20	GF	5	8	111	483	JC	FN	NSH	FR	<1-15	Y	CFOS	GR
Wipp. 1	GF	2	3	126	885	JC	ND	NSH	FR	<1-3	Y		WH
Wipp. 2	GF	2	4	59	70	JC	ND	SH	FR	<1	B		WH
Wipp. 3	GF	2	4	101	310	JC	ND	NSH	FR/TH	<1	B		WH
Wipp. 4	GF	2	3	114	407	JC	ND	TSH	FR	<1-3	Y		WH
Wipp. 5	GF	2	4	110	551	JC	ND	NSH	FR	>2-7	B		WH
Wipp. 6	GF	2	4	115	309	JC	ND	NSH	FR	<1	B		WH
Wipp. 7	LF			116	467	BC	ND	NSH	FR	<1-2	B		YG
Wipp. 8	LF			108	108	JC	ND	SH	FR	<1	B		WH
Wipp. 9	LF			85	262	BC	ND	TSH	FR	<1	B		YB

Hornstein-probe	Fundart	Schnitt	Pro-fil/ Flä-che	Größter Durch-Messer l in mm	Gewicht m in g	Rohma-terialart RM	Rohma-terial-form GF	Artefakt-form BT	Cortex-art COR	Cortex dicke COT in mm	Cortex-farbe COC	Cortex-fossilien CFOS	Horn-stein-farbe CL
Wipp. 10	LF			98	338	JC	ND	NSH	FR	<2	B		WH
Wipp. 11	LF			143	689	BC	ND	NSH	FR	<1-7	B		YG
Wipp. 12	LF			99	308	JC	ND	CO	FR	<1	B		WH
Wipp. 13	LF			104	254	JC	ND	SH	FR	<1	B		WH
Wipp. 14	LF			118	305	JC	ND	SH	FR	<1	B		WH
Wipp. 15	GF	2	4	128	373	JC	ND	NSH	FR	<1	B		WH
Witt. 1	LF			71	130	JC	ND	NSH	FR	<1-7	B	CFOS	GR
Witt. 2	LF			68	204	JC	ND	SH	FR	<1	G		YG
Witt. 3	LF			120	120	JC	ND	TSH	FR	>1-28	G		YG
Witt. 4	LF			111	459	BC	ND	NSH	FR	<1	G		YB
Witt. 5	LF			86	233	JC	ND	SH	FR	<1-10	G		YG
Witt. 6	LF			86	191	JC	ND	CO	FR	<1	G	CFOS	YG
Witt. 7	LF			97	253	JC	ND	TSH	FR	<1-4	G		YG
Witt. 8	LF			97	245	JC	ND	TSH	FR	<1	G		WH
Witt. 9	LF			104	374	JC	ND	TSH	FR	<1-5	G		WH
Witt. 10	LF			74	151	JC	ND	TSH	FR	<1-6	G		GR
Witt. 11	LF			86	282	BC	ND	CO	FR	<1-4	G		YG
Witt. 12	LF			93	305	JC	ND	TSH	FR	<1-3	G		WH
Witt. 13	LF			86	412	BC/JC	ND	TSH	FR	<1-3	G		YB
Witt. 14	LF			73	180	JC	ND	NSH	FR	<1-2	B		WH
Witt. 15	LF			78	164	JC	ND	NSH	FR	<1-5	G		WH

Hornstein-probe	Fundart	Schnitt	Pro-fil/ Flä-che	Größter Durch-Messer l in mm	Gewicht m in g	Rohma-terialart RM	Rohma-terial-form GF	Artefakt-form BT	Cortex-art COR	Cortex dicke COT in mm	Cortex-farbe COC	Cortex-fossilien CFOS	Horn-stein-farbe CL
Grund 1	LF			73	125	JC	ND	CO	FR	<1	Y		WH
Grund 2	LF			81	168	JC	ND	TSH	FR	<1	Y		WH
Grund 3	LF			60	137	JC	ND	SH	FR	<1	G		WH
Grund 4	LF			68	158	JC	ND	CO	IN	IN	IN		WH
Grund 5	LF			75	124	JC	ND	SH	FR	<1-8	Y		WH
Hung. 1	IN			62	121	TRC	ND	NSH	FR	<1-2	Y		YG
Hung. 2	IN			53	33	TRC	IN	NSH	IN	<11	W		GR
Hung. 3	IN			a) 76, b) 63	a) 57, b) 44	TRC	IN	SH	FR	<1-15	G		GR
Hung. 4	IN			22-30	5, 4, 4, 2, 1	TRC	IN	NSH, FL, BL	FR	<1-2	W		WH
Hung. 5	IN			56	33	TRC	IN	NSH	FR	<1	Y		YG

Hornsteinprobe	Sägeschnittfarbe, die ursprüngliche Hornsteinfarbe SCL	Farbwechsel CC	Einschlüsse FOS u. a.	Inhomogenitäten INH	Schwammnadeln SPN (Lupe)	Patinierung PA	Glanz GL	Qualität QU
Arnh. 1	GR bläulicher	PB, md			wenige	PA		1
Arnh. 2	GR heller, bläulicher	PB, od			wenige	PA		3
Arnh. 3	GR heller, bläulicher	PB			wenige	PA		1
Arnh. 4	GR heller, bläulicher	PB, od			wenige	PA		1
Arnh. 5	GR dunkler, weniger bläulich	PB			wenige	PA		1
Arnh. 6	GR heller, bläulicher	PB, md			wenige	PA		1
Arnh. 7	GR heller, grauer	PB			wenige	PA		3
Arnh. 8	GR bläulicher	PB			wenige	PA		1
Arnh. 9	GR bläulicher	PB			wenige	PA		1
Arnh. 10	GR grauer	IN, md			wenige	PA		1
Arnh. 11	GR leicht bläulich	PB			wenige	PA		1
Arnh. 12	GR grauer	PB			wenige	PA		1
Arnh. 13	GR heller, grauer	PB, md		mehr mittig	wenige	PA		1
Arnh. 14	GR bläulicher	PB, md			wenige	PA		1
Arnh. 15	GR bläulicher	PB		unter dem Cortex	etwas mehr	PA		1
Borg. 1	GR heller, weniger beige	CB, md		mehr mittig	mittel	(PA)		2
Borg. 2	GR weniger beige	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		2
Borg. 3	WH weniger beige	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		2
Borg. 4	GR weniger beige	CB, od		mehr mittig	wenig	PA		2
Borg. 5	GR	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		2
Borg. 6	WH heller, grauer	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		2
Borg. 7	GR	CB	FOS	mehr mittig	wenig	(PA)	3 Stellen	2
Borg. 8	GR weniger beige	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		3

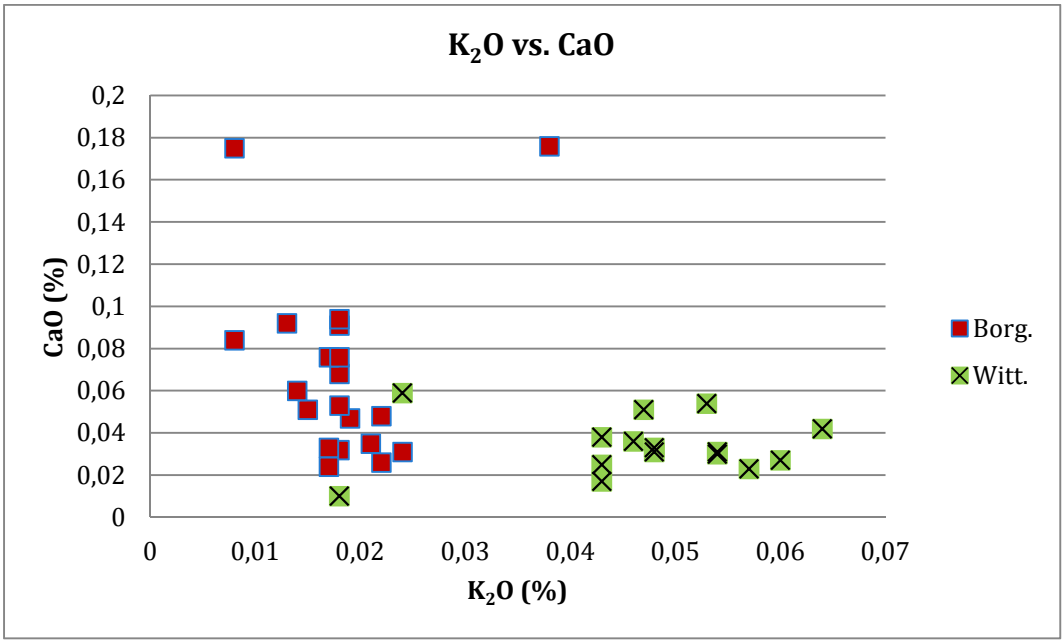
Hornsteinprobe	Sägeschnittfarbe, die ursprüngliche Hornsteinfarbe SCL	Farbwechsel CC	Einschlüsse FOS u. a.	Inhomogenitäten INH	Schwammnadeln SPN (Lupe)	Patinierung PA	Glanz GL	Qualität QU
Borg. 9	YG farbiger	SM		mehr mittig	mittel	PA		1
Borg. 10	GR weniger beige	CB, md		mehr mittig	mittel	(PA)		3
Borg. 11	GR dunkler	CB, od	FOS	mehr mittig	mittel			2
Borg. 12	GR weniger beige	IN, od		verstreut	wenig	PA	4 Stellen	2
Borg. 13	GR weniger beige	CB, md		verstreut	wenig	PA		2
Borg. 14	GR grauer	CB	FOS	mehr mittig	mittel			2
Borg. 15	GR z. T. dunkler	SM	FOS	mehr mittig	mittel	(PA)		3
Borg. 16	GR grauer	CB, md		mehr mittig	sehr viele	PA		3
Borg. 17	YG etwas grauer	CB	FOS	verstreut	mittel	PA		4
Borg. 18	WH heller	SM		mehr einseitig mittig	mittel	PA		2
Borg. 19	GR weniger beige	CB, od		mehr mittig	mittel	PA		1
Borg. 20	GR dunkler	SM		verstreut	mittel	PA		3
Wipp. 1	GR dunkler, leicht violett	SM, md		verstreut	mittel	PA	2 Stellen	3
Wipp. 2	WH heller	CB, md		verstreut	mittel	PA		2
Wipp. 3	WH grauer, leicht violetter Fleck	CB		mehr mittig	mittel	PA	8 Stellen	2
Wipp. 4	WH heller, Mitte leicht violett	CB		mehr mittig	mittel	PA	4 Stellen	2
Wipp. 5	GR stärker violett im Inneren	CB		mehr mittig	mittel	PA		2
Wipp. 6	WH heller	CB, md		mehr mittig	mittel	PA	1 Stelle	2
Wipp. 7	YG stark farbig	SM	FOS, Druse	verstreut	mittel	PA		4
Wipp. 8	WH weniger beige	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		2
Wipp. 9	YB teilweise heller	CB		verstreut	sehr viele	PA		3
Wipp. 10	YG beige-grau	SM		mehr mittig	viele	PA	2 Stellen	2
Wipp. 11	YG grauer, mittig leicht violett	CB, md	FOS	verstreut	viele	PA		4
Wipp. 12	WH weißlicher	CB, md		mehr mittig	mittel	PA		2

Hornsteinprobe	Sägeschnittfarbe, die ursprüngliche Hornsteinfarbe SCL	Farbwechsel CC	Einschlüsse FOS u. a.	Inhomogenitäten INH	Schwammnadeln SPN (Lupe)	Patinierung PA	Glanz GL	Qualität QU
Wipp. 13	GR grauer, leicht violett	CB, md		mehr mittig	mittel	PA	1 Stelle	2
Wipp. 14	WH mehr hellgrau, stärker violett	IN		verstreut	mittel	PA	2 Stellen	1
Wipp. 15	WH mehr hellgrau	CB, md		verstreut	mittel	PA	9 Stellen	2
Witt. 1	GR	IN, od		mehr mittig	sehr viele	(PA)		3
Witt. 2	GR weniger beige	SM, md		mehr mittig	sehr viele	PA		3
Witt. 3	YG weniger beige	SM		verstreut	sehr viele	PA		3
Witt. 4	YB	CB, od	FOS	verstreut	sehr viele	PA		4
Witt. 5	YG heller, grauer	SM		stärker am Rand	sehr viele	PA		2
Witt. 6	YG	SM		verstreut	sehr viele	PA	1 Stelle	2
Witt. 7	YG grauer	SM	FOS	mehr mittig	sehr viele	PA		2
Witt. 8	GR grauer	SM		verstreut	sehr viele	PA		5
Witt. 9	YG farbiger	SM	FOS	mehr mittig	sehr viele im Hellen	PA	3 Stellen	3
Witt. 10	YG farbiger	SM	FOS	verstreut	sehr viele	PA		3
Witt. 11	YG grauer und brauner	SM	FOS	verstreut	sehr viele	PA		3
Witt. 12	YG dunkler	IN, od		verstreut	sehr viele	PA	1 Stelle	5
Witt. 13	YG etwas grauer	SM	FOS	mehr mittig	sehr viele	PA		2
Witt. 14	YG wenig dunkler	SM		verstreut	sehr viele	PA		3
Witt. 15	YG beige-grau	SM	FOS	verstreut	viele	PA		3
Grund 1	GR wenig grauer	IN/md		verstreut		PA		3
Grund 2	WH wenig grauer	CB/md		verstreut		PA		3
Grund 3	YG grauer	CB/md		mehr mittig		PA		1
Grund 4	WH wenig grauer	IN				PA		3
Grund 5	GR grauer	CB, od		mehr mittig		PA		5

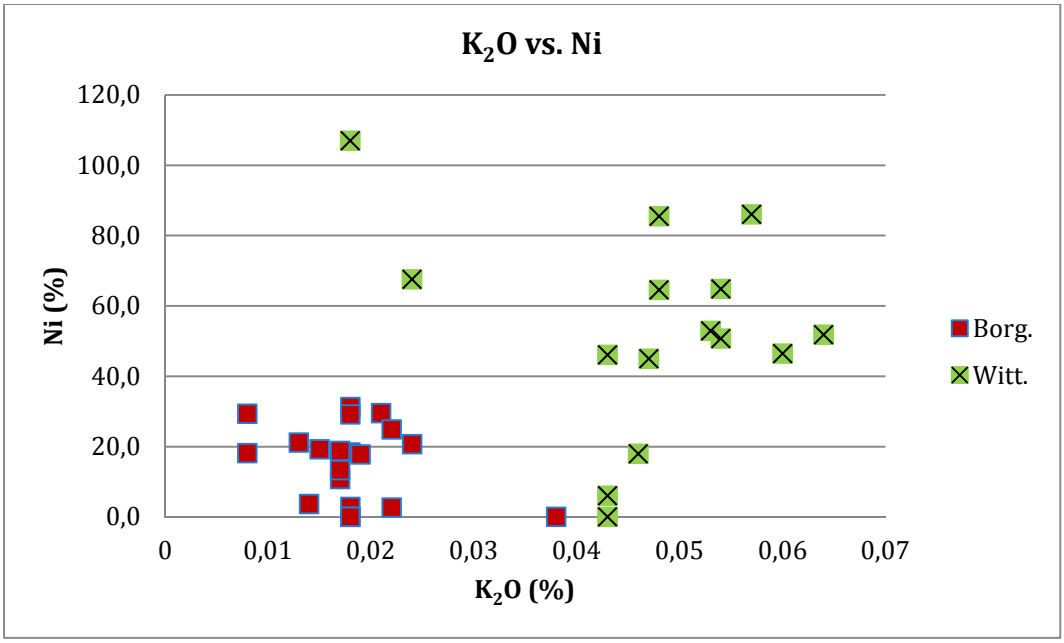
Hornsteinprobe	Sägeschnittfarbe, die ursprüngliche Hornsteinfarbe SCL	Farbwechsel CC	Einschlüsse FOS u. a.	Inhomogenitäten INH	Schwammnadeln SPN (Lupe)	Patinierung PA	Glanz GL	Qualität QU
Hung. 1	YB	CB	FOS	verstreut	keine	PA		1
Hung. 2	GR heller, bläulicher	IN			keine	(PA)		9
Hung. 3	GR heller	CB			keine	PA		2
Hung. 4	WH heller	IN			keine	(PA)		1
Hung. 5	GR bläulich grau	IN		verstreut	(wenige)	PA		1

B Binäre Diagramme

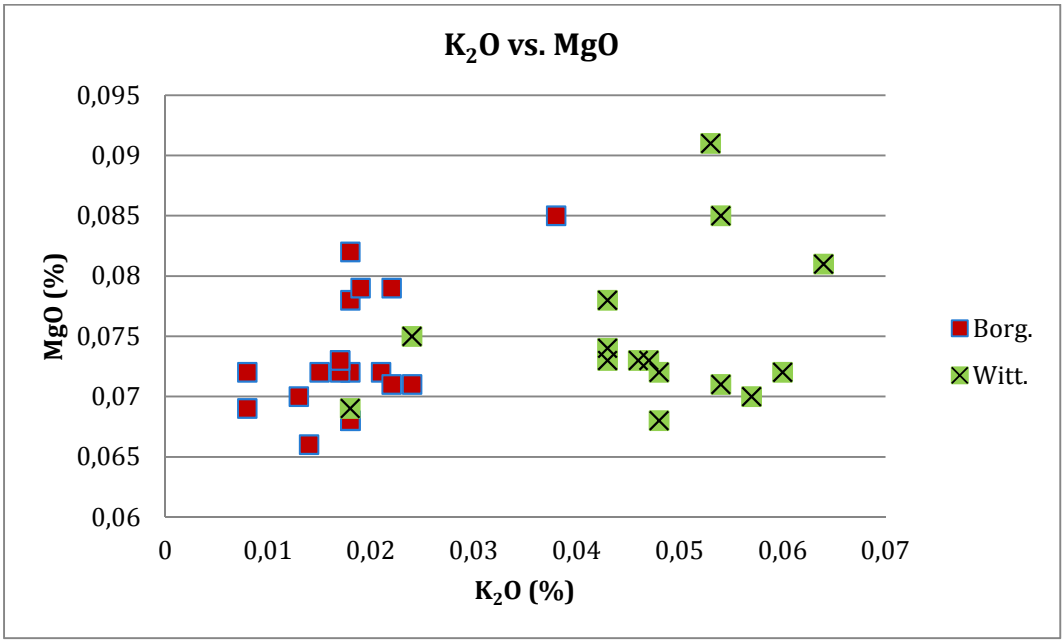
B1 Borg./Witt.



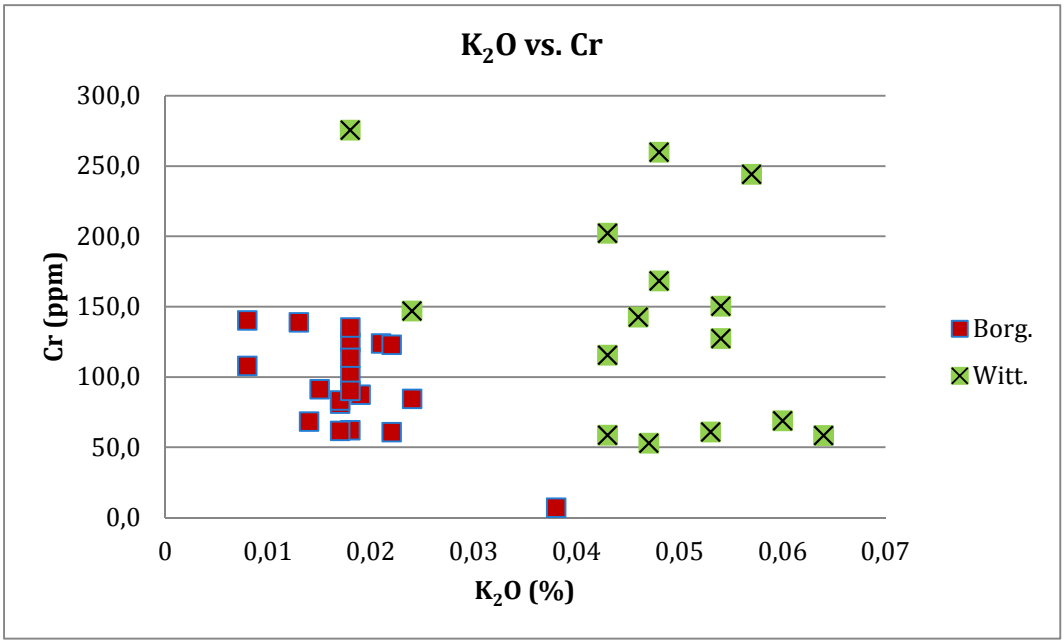
B1.1 Trennung von Borgerhau und Wittlingen durch K_2O und CaO. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Borg. 17 und Borg. 10 CaO-Ausreißerwerte; Borg. 10 K_2O-Extremwert.



B1.2 Trennung von Borgerhau und Wittlingen durch K_2O und Ni. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Borg. 10 einen K_2O-Extremwert; Witt. 1 und Witt. 8 Ni-Ausreißerwerte.

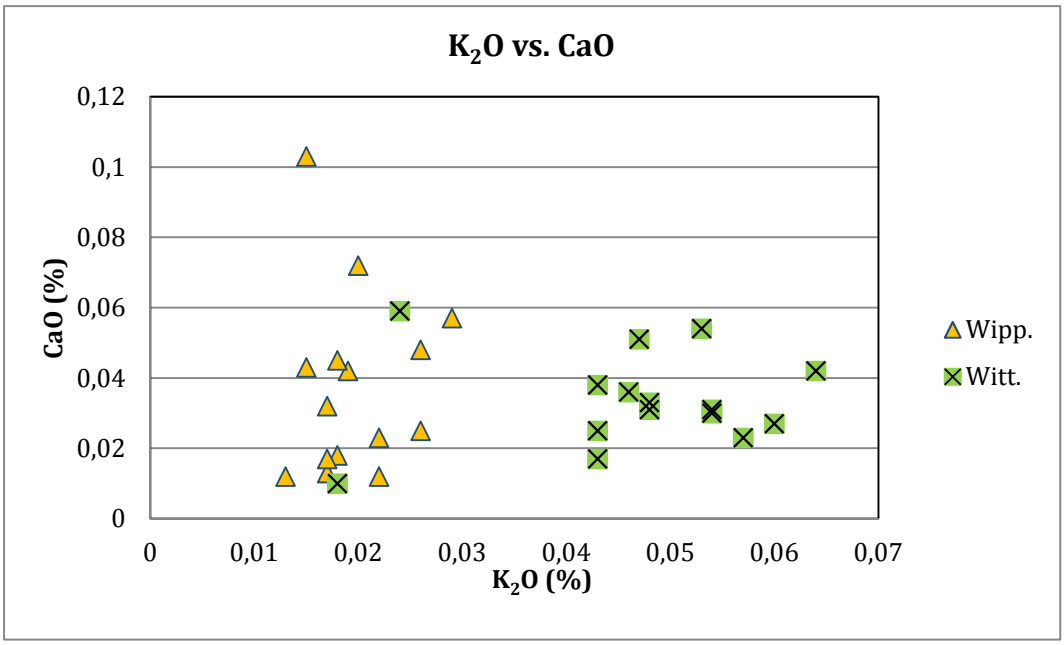


B1.3 Trennung von Borgerhau und Wittlingen durch K_2O und MgO. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Borg. 10 K_2O-Extremwert; Borg. 10, Witt. 13 und Witt. 15 MgO-Ausreißerwerte.

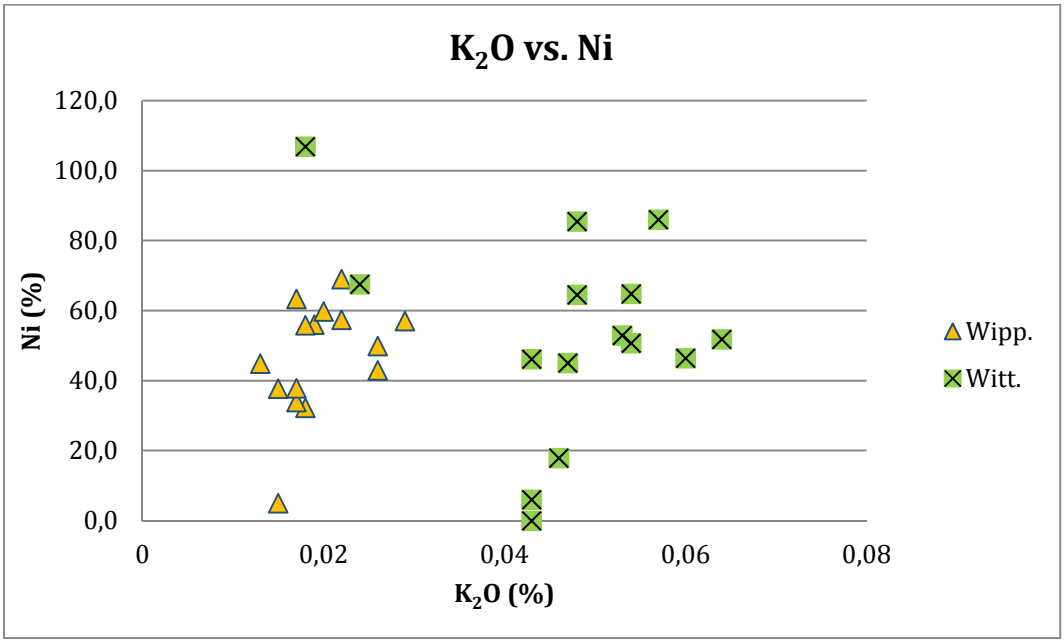


B1.4 Trennung von Borgerhau und Wittlingen durch K_2O und Cr. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Borg. 10 einen K_2O-Extremwert.

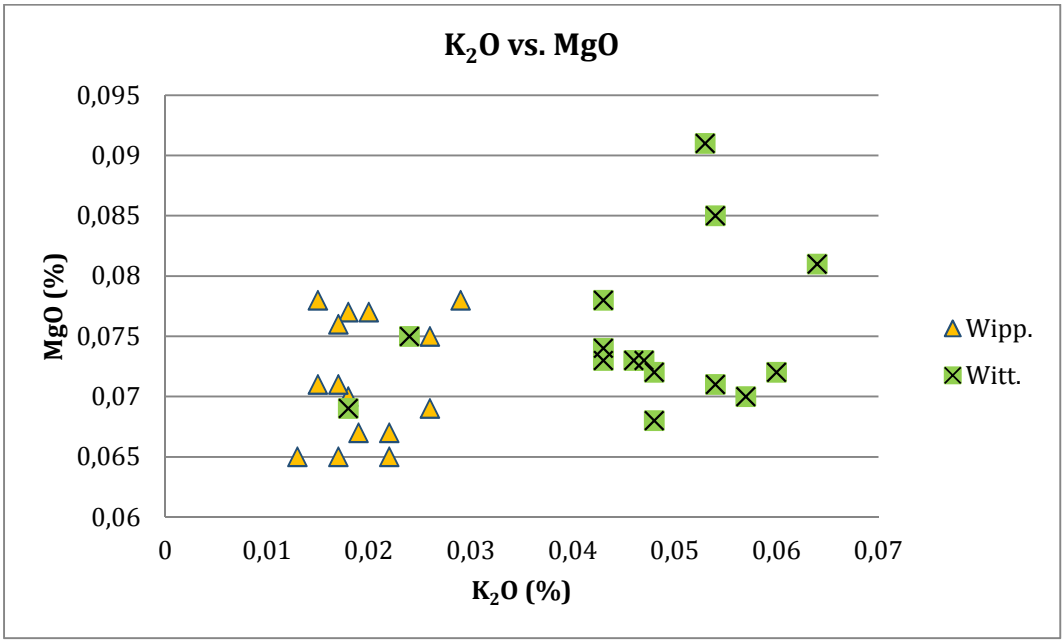
B2 Wipp./Witt.



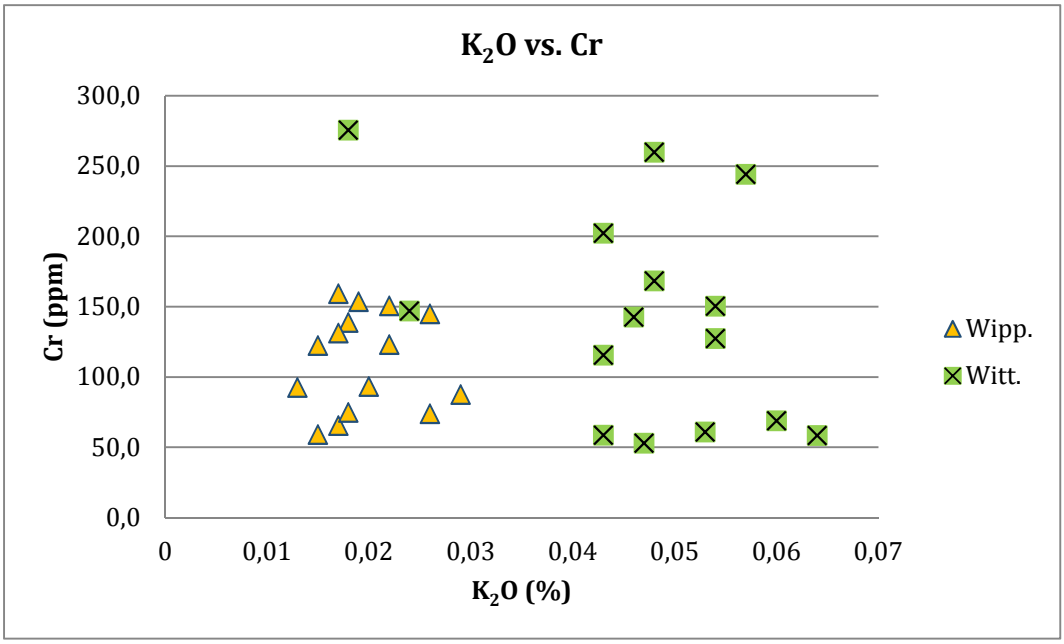
B2.1 Trennung von Wippingen und Wittlingen durch K_2O und CaO. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Wipp. 1 CaO-Ausreißerwert.



B2.2 Trennung von Wippingen und Wittlingen durch K_2O und Ni. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Wipp. 1; Witt. 1; Witt. 3 und Witt. 8 Ni-Ausreißerwerte.

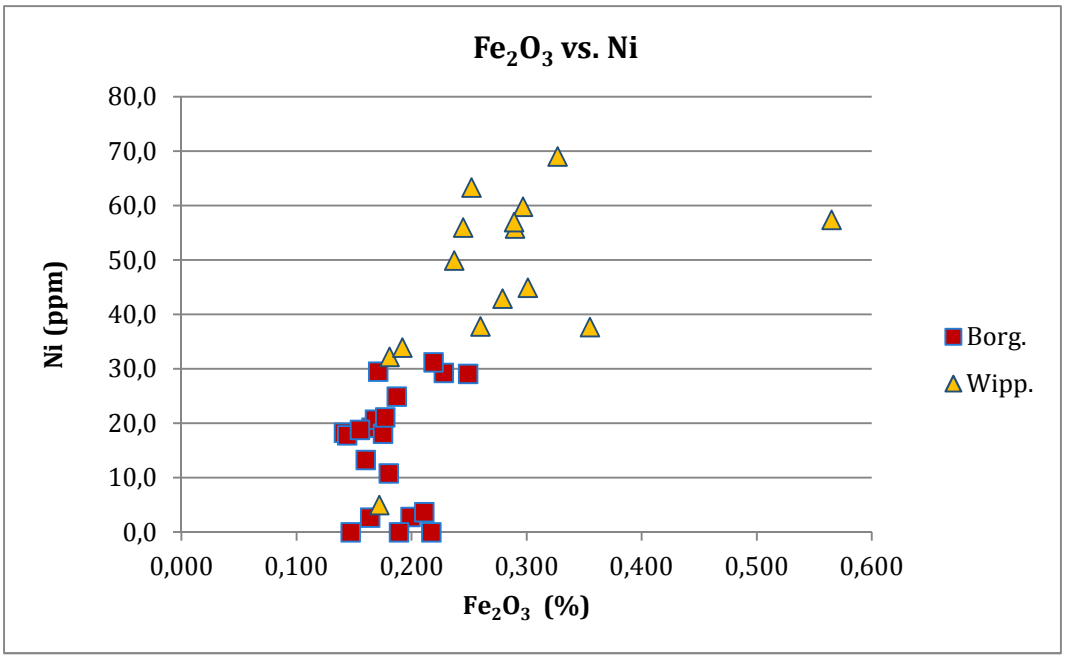


B2.3 Trennung von Wippingen und Wittlingen durch K_2O und MgO. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte; Witt. 13 und Witt. 15 MgO-Ausreißerwerte.

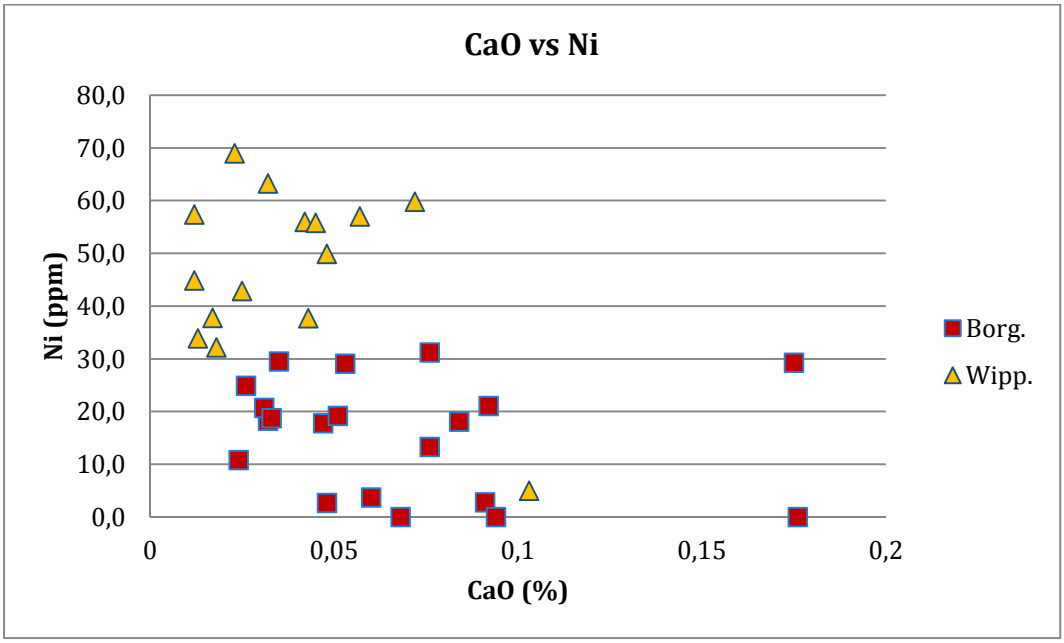


B2.4 Trennung von Wippingen und Wittlingen durch K_2O und Cr. Witt. 8 und Witt. 14 haben K_2O-Ausreißerwerte.

B3 Borg./Wipp.

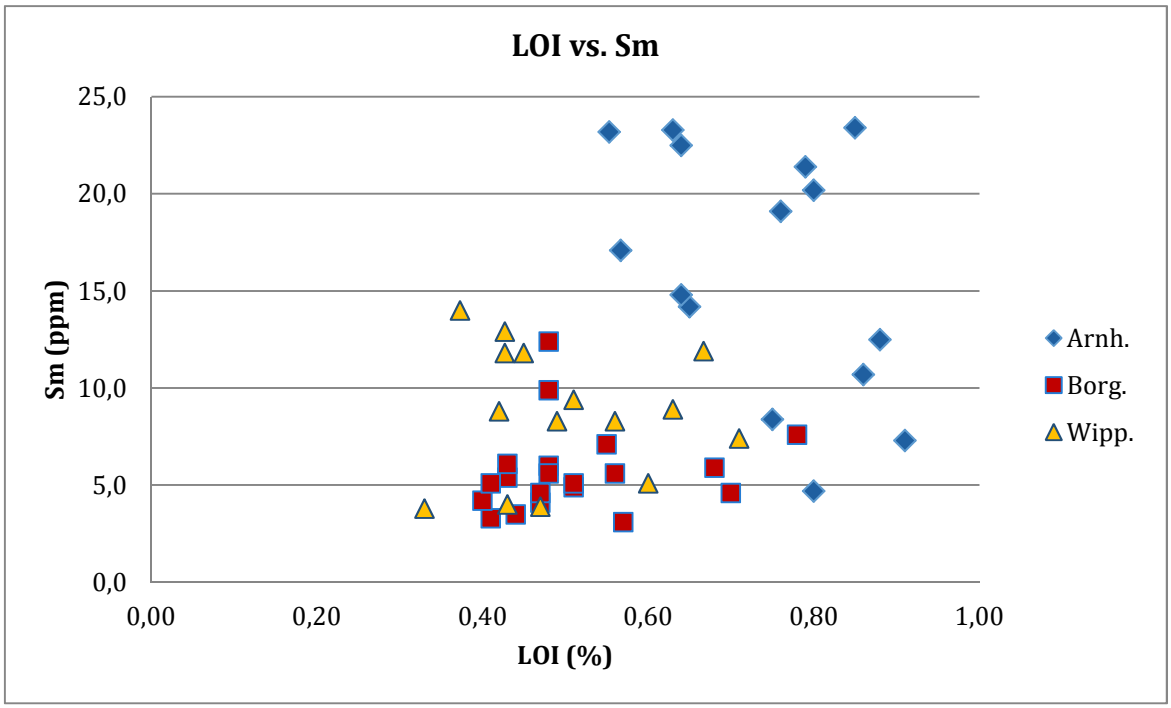


B3.1 Trennung von Borgerhau und Wippingen durch Fe_2O_3 und Ni. Wipp. 9 hat einen Fe_2O_3 – Extremwert; Wipp. 1 einen Ni-Ausreißerwert.



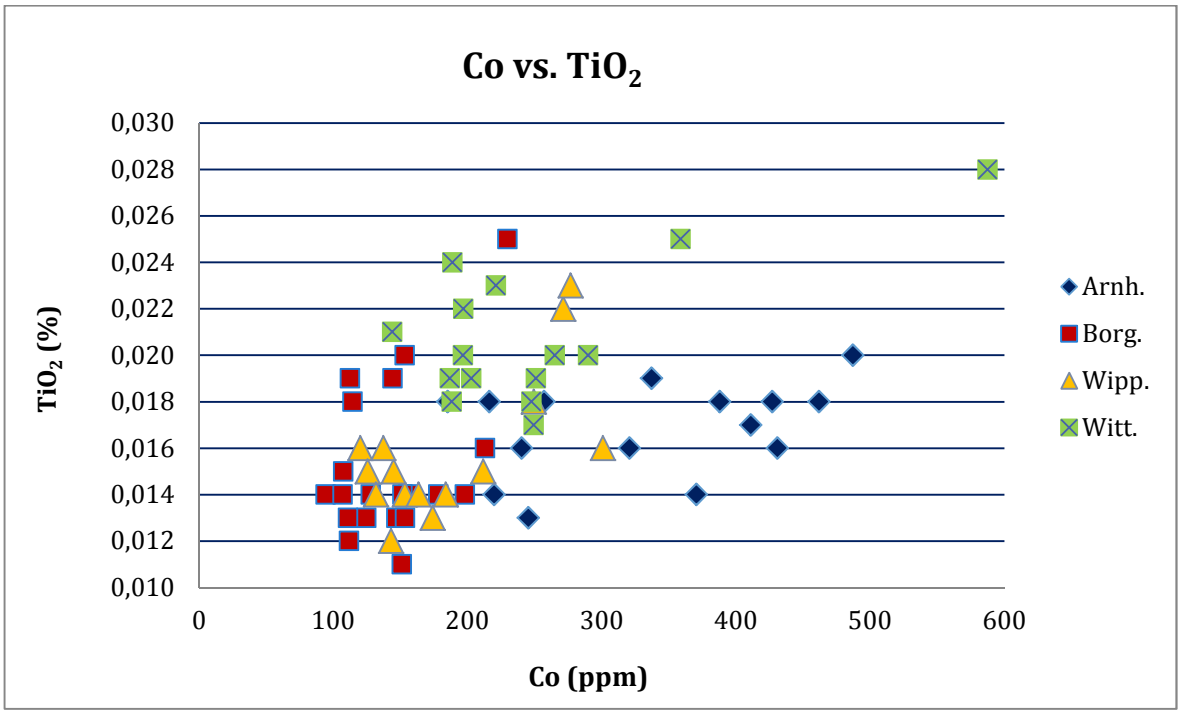
B3.2 Trennung von Borgerhau und Wippingen durch CaO und Ni. Borg. 10; Borg. 17 und Wipp. 1 haben CaO-Ausreißerwerte; Wipp. 1 auch einen Ni-Ausreißerwert.

B4 Arnh./Borg + Wipp.



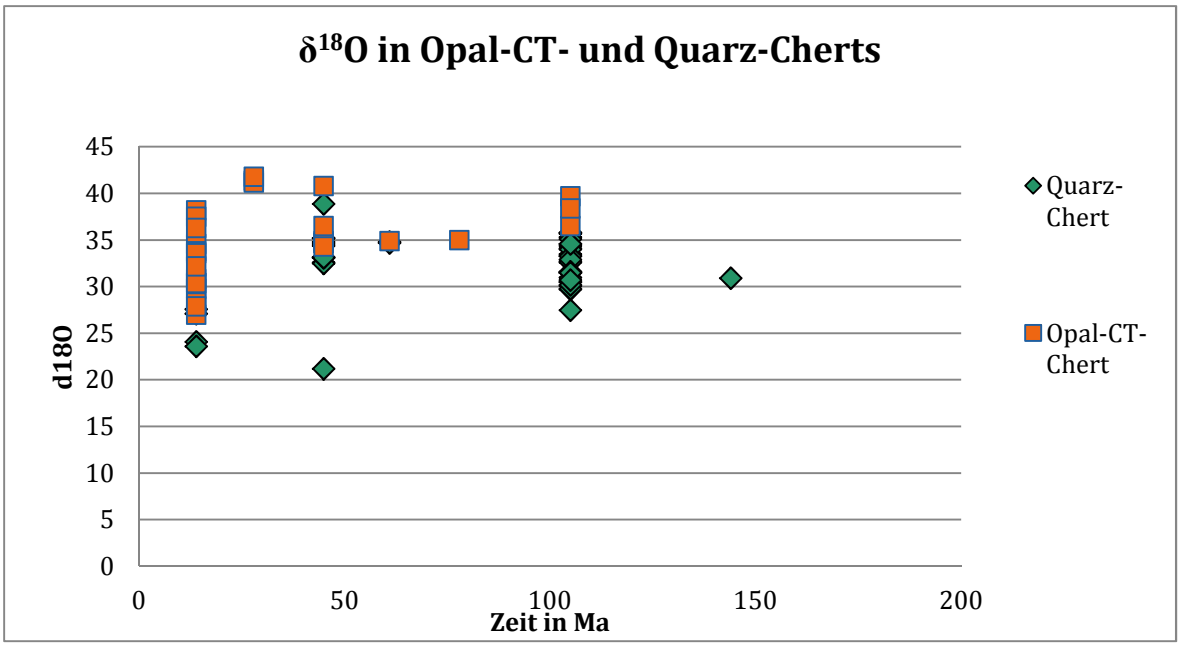
B4.1 Trennung von Arnhofen von Borgerhau + Wippingen durch LOI und Sm. Borg. 18 hat einen LOI-Ausreißerwert; Borg. 19 einen Sm-Ausreißerwert und Borg. 20 einen Sm-Extremwert.

B5 Co vs. TiO2 (alle Fundorte)



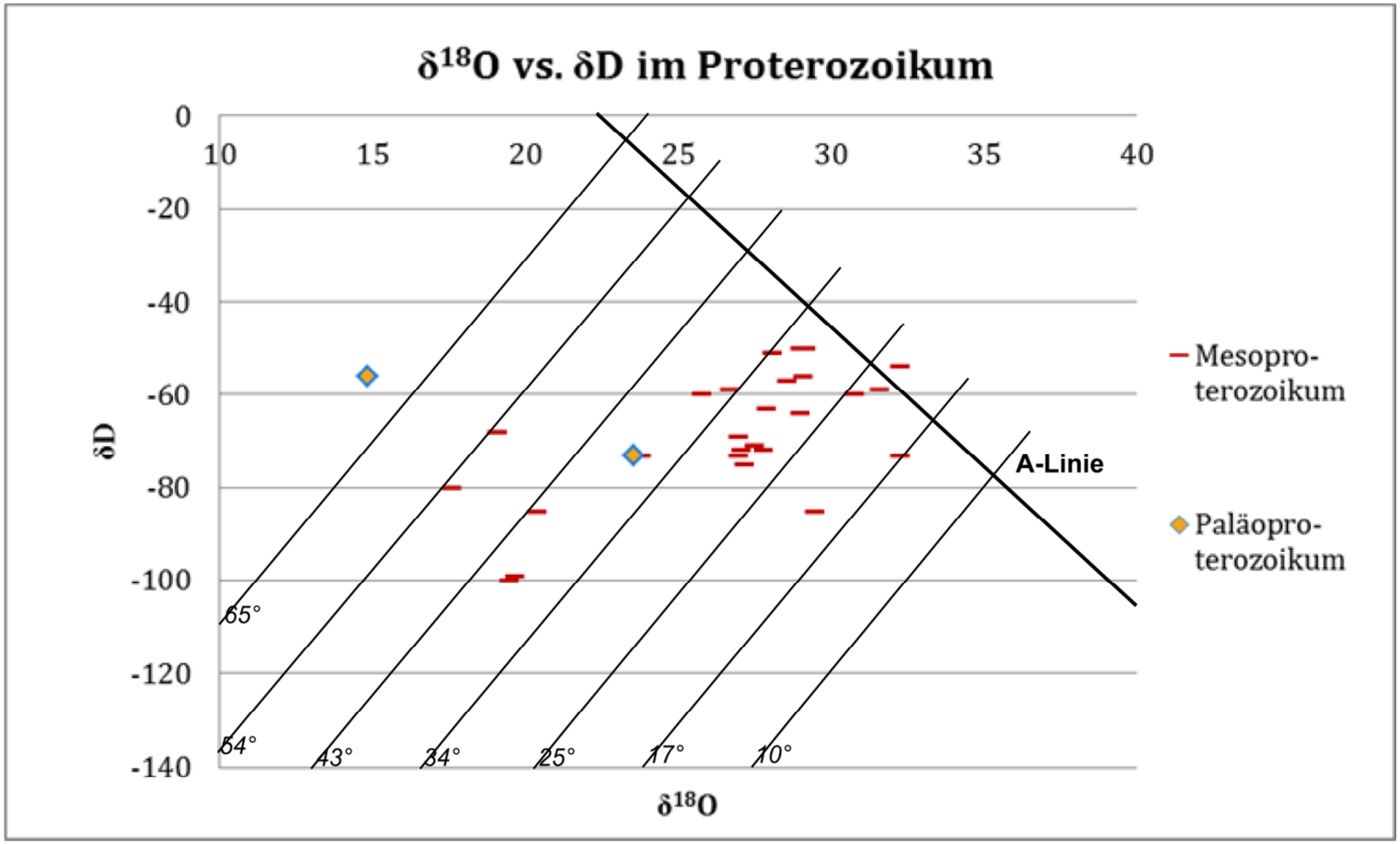
B5 Binäres Diagramm Co vs. TiO_2. Es zeigt eine höchstens schwache Korrelation zwischen den beiden Variablen an, die auch nicht auf einer Kontamination beruhen muss.

B6 $\delta^{18}O$ in Opal-CT- und Quarz-Cherts aus der Literatur

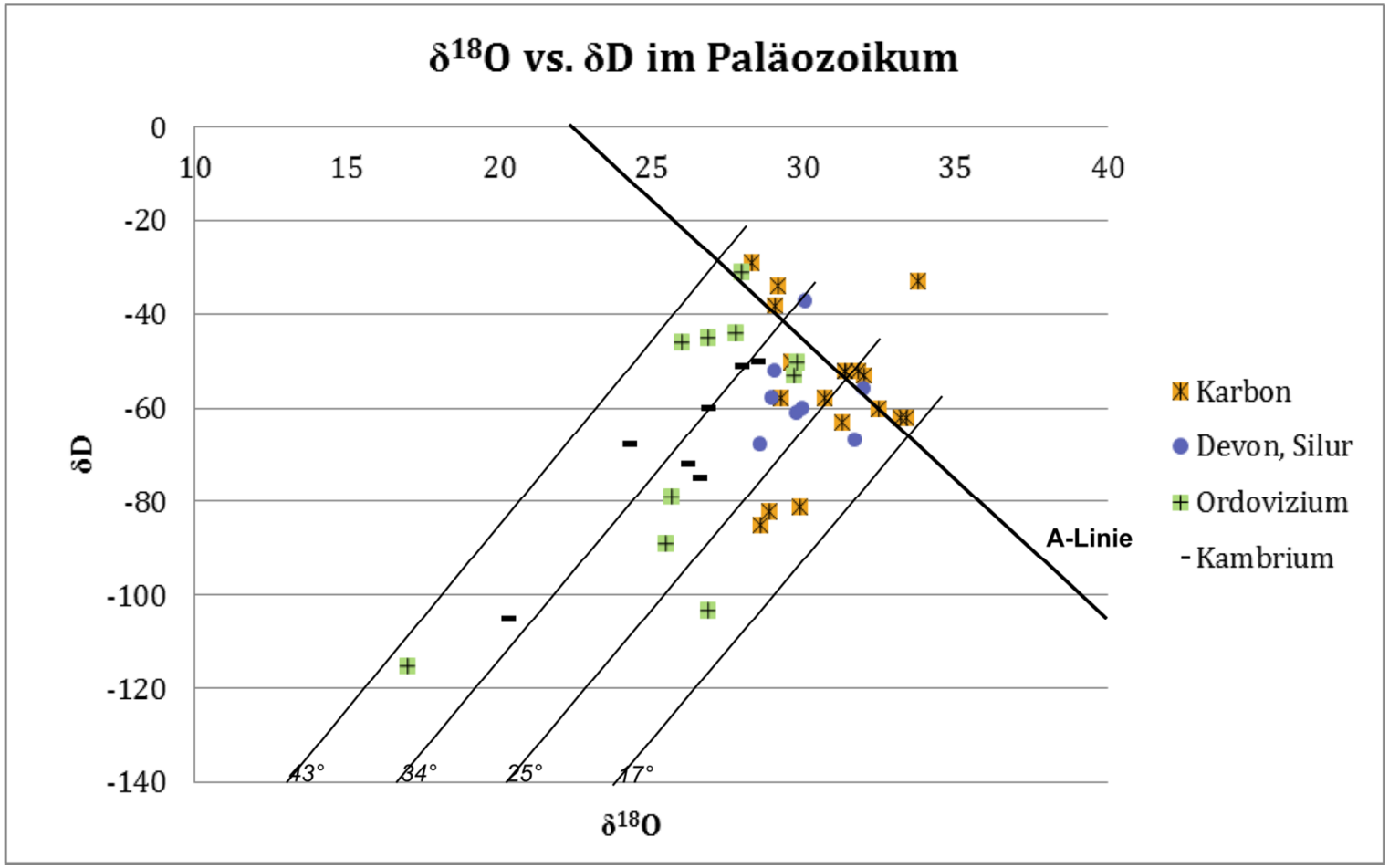


B6 $\delta^{18}O$-Werte von Opal-CT-Cherts und Quarzcherts aus der Literatur. Die $\delta^{18}O$-Werte von Opal-CT-Cherts sind im Allgemeinen höher als die der Quarzcherts desselben geologischen Zeitraumes.

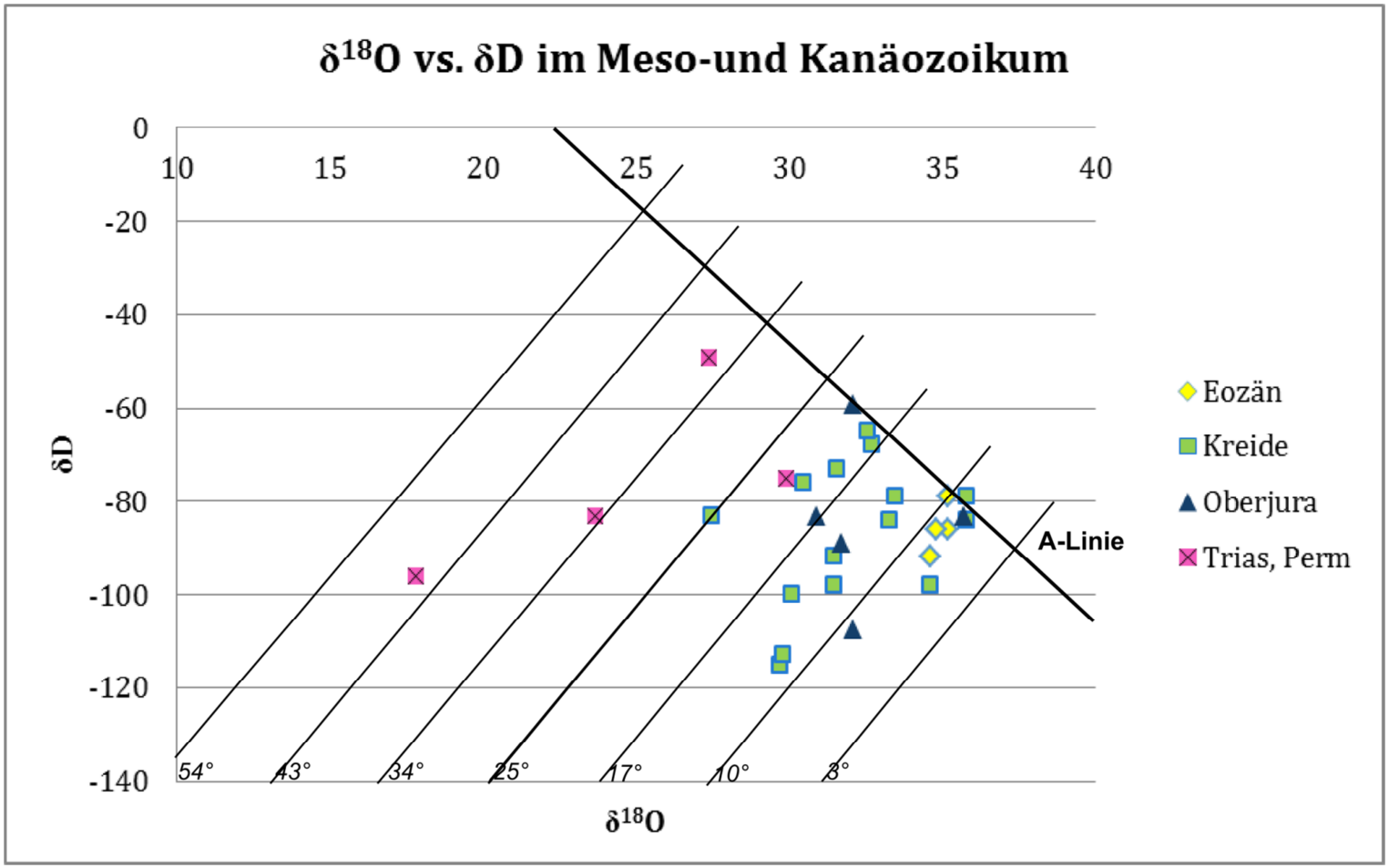
B7 $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte verschiedener geologischer Zeiträume



B7.1 $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte von Cherts des Proterozoikums aus der Literatur. Die Temperaturlinien verlaufen parallel zur meteorischen Wasserline. Die meisten Cherts liegen deutlich links der A-Linie. Alle Cherts streuen über weite Temperaturbereiche.

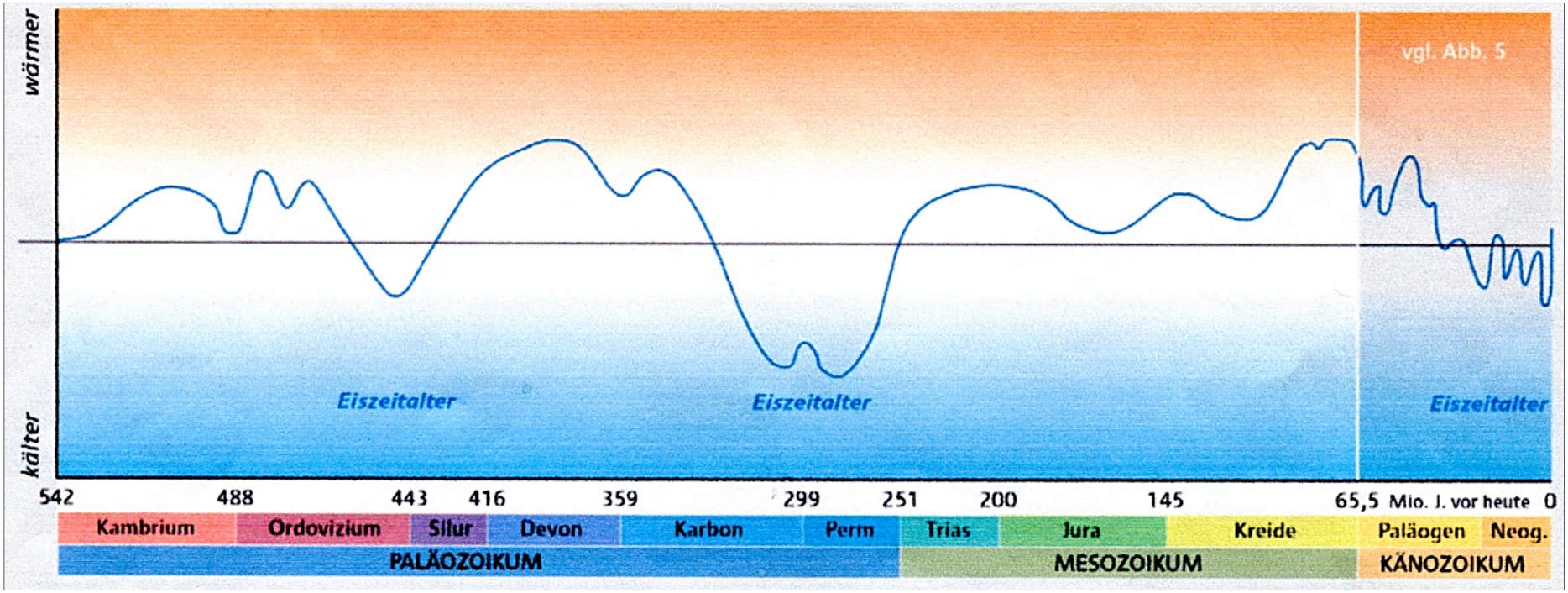


B7.2 $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte von Cherts des Paläozoikums aus der Literatur. Die Temperaturlinien verlaufen parallel zur meteorischen Wasserline. Die meisten Cherts liegen deutlich links der A-Linie. Nur die Cherts aus dem Kambrium befinden sich im begrenzten Temperaturbereich von 29-38 °C, alle übrigen streuen über breite Temperaturbereiche.



B7.3 $\delta^{18}O$- vs. δD-Werte von Cherts des Meso- und Kanäozoikum aus der Literatur. Die Temperaturlinien verlaufen parallel zur meteorischen Wasserline. Die meisten Cherts liegen deutlich links der A-Linie. Nur die jüngsten Cherts aus dem Eozän befinden sich im begrenzten Temperaturbereich von 6-11 °C, alle übrigen streuen über breite Temperaturbereiche.

C Globale Temperaturänderungen der letzten 542 Millionen Jahre



C Globale Temperaturänderungen gegenüber dem heutigen Mittelwert (Mittellinie) der letzten 542 Millionen Jahre auf der Basis unterschiedlicher Datenquellen (Bubenzer & Radtke 2007, 21 Abb. 4, verändert nach Bradley 1999, Altersangaben nach International Commission on Stratigraphy 2007).

D Tabellen

D1 WDRFA-Werte (x_i) mit Standardabweichung (3σ)

D1.1 SiO_2 (%), TiO_2 (%), Al_2O_3 (%), Fe_2O_3 (%), MnO (%)

Sample	SiO_2 (%)			TiO_2 (%)			Al_2O_3 (%)			Fe_2O_3 (%)			MnO (%)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Arnh1	95,949	0,11	0,11	0,014	0,0011	7,9	0,133	0,0042	3,2	0,133	0,0016	1,2	0,001	0,00005	4,8
BER Arnh2	96,194	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,7	0,175	0,0051	2,9	0,195	0,0016	0,8	0,002	0,00007	3,7
BER Arnh3	98,168	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,4	0,194	0,0052	2,7	0,246	0,0016	0,7	0,002	0,00007	3,4
BER Arnh4	98,137	0,12	0,12	0,013	0,0012	9,2	0,127	0,0040	3,1	0,314	0,0016	0,5	0,002	0,00006	3,2
BER Arnh5	96,600	0,11	0,11	0,016	0,0009	5,7	0,064	0,0025	3,9	0,343	0,0016	0,5	0,002	0,00006	3,1
BER Arnh6	97,401	0,12	0,12	0,016	0,0009	5,4	0,156	0,0045	2,9	0,283	0,0016	0,6	0,002	0,00007	3,3
BER Arnh7	97,238	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,6	0,057	0,0023	4,0	0,243	0,0016	0,7	0,003	0,00009	3,1
BER Arnh8	97,840	0,12	0,12	0,020	0,0007	3,7	0,102	0,0035	3,4	0,239	0,0016	0,7	0,003	0,00009	3,0
BER Arnh9	96,964	0,12	0,12	0,019	0,0008	4,2	0,071	0,0028	3,9	0,270	0,0016	0,6	0,003	0,00010	3,3
BER Arnh10	97,769	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,6	0,073	0,0029	4,0	0,223	0,0016	0,7	0,003	0,00009	3,0
BER Arnh11	99,687	0,10	0,10	0,014	0,0011	7,9	0,129	0,0037	2,9	0,291	0,0017	0,6	0,003	0,00010	3,3
BER Arnh12	99,058	0,10	0,10	0,016	0,0009	5,7	0,234	0,0050	2,1	0,323	0,0017	0,5	0,004	0,00012	3,0
BER Arnh13	99,231	0,10	0,10	0,018	0,0008	4,7	0,146	0,0038	2,6	0,232	0,0017	0,7	0,003	0,00010	3,3
BER Arnh14	99,627	0,10	0,10	0,018	0,0009	4,8	0,174	0,0042	2,4	0,255	0,0017	0,7	0,003	0,00010	3,3
BER Arnh15	99,112	0,10	0,10	0,017	0,0009	5,1	0,148	0,0039	2,6	0,233	0,0017	0,7	0,003	0,00009	3,0
BER Borg1	96,240	0,12	0,12	0,019	0,0008	4,2	0,066	0,0027	4,1	0,164	0,0016	1,0	0,001	0,00005	4,9
BER Borg2	94,906	0,11	0,12	0,018	0,0008	4,6	0,075	0,0030	4,0	0,199	0,0015	0,8	0,001	0,00005	5,2
BER Borg3	97,256	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9	0,095	0,0035	3,7	0,141	0,0016	1,1	0,001	0,00005	5,4
BER Borg4	97,175	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9	0,071	0,0029	4,1	0,144	0,0016	1,1	0,001	0,00006	5,5
BER Borg5	97,080	0,12	0,12	0,013	0,0012	9,2	0,094	0,0034	3,6	0,171	0,0016	0,9	0,002	0,00006	3,2
BER Borg6	97,040	0,12	0,12	0,015	0,0010	6,7	0,050	0,0022	4,4	0,165	0,0016	1,0	0,001	0,00006	5,5
BER Borg7	94,722	0,11	0,12	0,019	0,0008	4,3	0,083	0,0031	3,7	0,147	0,0015	1,0	0,001	0,00005	4,8
BER Borg8	94,603	0,11	0,12	0,020	0,0008	3,8	0,063	0,0025	4,0	0,189	0,0015	0,8	0,002	0,00006	2,8

Sample	SiO_2 (%)			TiO_2 (%)			Al_2O_3 (%)			Fe_2O_3 (%)			MnO (%)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Borg9	96,626	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9	0,060	0,0025	4,2	0,180	0,0016	0,9	0,002	0,00006	3,0
BER Borg10	93,986	0,11	0,12	0,025	0,0007	2,7	0,107	0,0036	3,4	0,217	0,0015	0,7	0,001	0,00005	5,3
BER Borg11	96,899	0,12	0,12	0,013	0,0012	9,2	0,456	0,0083	1,8	0,168	0,0016	1,0	0,001	0,00005	5,1
BER Borg12	97,185	0,12	0,12	0,013	0,0013	10,0				0,175	0,0016	0,9	0,001	0,00005	4,7
BER Borg13	97,458	0,12	0,12	0,011	0,0020	18,2	0,044	0,0020	4,5	0,155	0,0016	1,0	0,001	0,00005	5,3
BER Borg14	97,033	0,12	0,12	0,013	0,0012	9,2	0,053	0,0023	4,3	0,160	0,0016	1,0	0,001	0,00004	4,3
BER Borg15	96,802	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9	0,088	0,0033	3,8	0,187	0,0016	0,9	0,001	0,00005	5,1
BER Borg16	96,879	0,12	0,12	0,014	0,0012	8,6	0,051	0,0021	4,1	0,177	0,0016	0,9	0,001	0,00005	5,1
BER Borg17	96,851	0,12	0,12	0,012	0,0015	12,5				0,228	0,0016	0,7	0,001	0,00005	5,4
BER Borg18	97,338	0,12	0,12	0,014	0,0010	7,1	0,057	0,0023	4,0	0,219	0,0016	0,7	0,004	0,00011	2,8
BER Borg19	98,417	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9	0,068	0,0026	3,8	0,249	0,0016	0,6	0,004	0,00011	2,8
BER Borg20	96,423	0,11	0,11	0,016	0,0009	5,6	0,042	0,0019	4,5	0,211	0,0016	0,8	0,003	0,00010	3,3
BER Borg5.2	97,893	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,6	0,142	0,0044	3,1	0,143	0,0017	1,2	0,001	0,00006	5,7
BER Wipp1	96,103	0,12	0,12	0,016	0,0009	5,8	0,022	0,0012	5,5	0,172	0,0016	0,9	0,001	0,00005	5,4
BER Wipp2	97,091	0,12	0,12	0,015	0,0010	6,3	0,067	0,0027	4,0	0,181	0,0016	0,9	0,001	0,00005	5,3
BER Wipp3	96,339	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9	0,021	0,0012	5,7	0,192	0,0016	0,8	0,002	0,00007	3,3
BER Wipp4	98,481	0,12	0,12	0,014	0,0010	7,1	0,047	0,0020	4,3	0,327	0,0017	0,5	0,003	0,00007	2,4
BER Wipp5	98,592	0,12	0,12	0,014	0,0011	7,9				0,301	0,0016	0,5	0,002	0,00006	2,8
BER Wipp6	98,342	0,12	0,12	0,013	0,0012	9,2	0,036	0,0016	4,4	0,260	0,0016	0,6	0,002	0,00007	3,3
BER Wipp7	98,296	0,12	0,12	0,016	0,0009	5,8	0,091	0,0032	3,5	0,355	0,0017	0,5	0,003	0,00010	3,3
BER Wipp8	97,486	0,12	0,12	0,022	0,0007	3,2	0,106	0,0036	3,4	0,279	0,0016	0,6	0,003	0,00010	3,3
BER Wipp9	97,637	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,5	0,108	0,0036	3,3	0,565	0,0019	0,3	0,004	0,00012	3,0
BER Wipp10	98,683	0,12	0,12	0,023	0,0007	3,1	0,086	0,0030	3,5	0,245	0,0016	0,7	0,004	0,00011	2,8
BER Wipp11	100,958	0,10	0,10	0,015	0,0010	6,7	0,036	0,0014	3,9	0,290	0,0018	0,6	0,003	0,00011	3,7
BER Wipp12	101,140	0,10	0,10	0,012	0,0017	14,2	0,053	0,0019	3,6	0,297	0,0018	0,6	0,003	0,00010	3,3
BER Wipp13	100,651	0,10	0,10	0,014	0,0011	7,9	0,091	0,0029	3,2	0,289	0,0018	0,6	0,003	0,00010	3,3
BER Wipp14	100,422	0,10	0,10	0,015	0,0010	6,7	0,130	0,0036	2,8	0,237	0,0018	0,8	0,003	0,00010	3,3
BER Wipp15	100,629	0,10	0,10	0,016	0,0009	5,8	0,076	0,0025	3,3	0,252	0,0018	0,7	0,003	0,00010	3,3
BER Witt1	92,860	0,11	0,12	0,019	0,0008	4,2	0,125	0,0041	3,3	0,137	0,0014	1,0	0,001	0,00005	5,0

Sample	SiO_2 (%)			TiO_2 (%)			Al_2O_3 (%)			Fe_2O_3 (%)			MnO (%)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Witt2	95,249	0,11	0,12	0,019	0,0008	4,1	0,205	0,0054	2,6	0,165	0,0015	0,9	0,002	0,00006	3,0
BER Witt3	96,196	0,12	0,12	0,019	0,0008	4,2	0,136	0,0043	3,2	0,215	0,0016	0,7	0,002	0,00006	3,0
BER Witt4	98,300	0,11	0,11	0,021	0,0007	3,2	0,190	0,0047	2,5	0,390	0,0015	0,4	0,003	0,00007	2,3
BER Witt5	98,223	0,12	0,12	0,022	0,0007	3,3	0,219	0,0054	2,5	0,304	0,0016	0,5	0,002	0,00007	3,6
BER Witt6	97,766	0,12	0,12	0,020	0,0008	3,8	0,205	0,0054	2,6	0,401	0,0017	0,4	0,002	0,00006	3,0
BER Witt7	98,145	0,12	0,12	0,025	0,0007	2,7	0,156	0,0046	2,9	0,351	0,0017	0,5	0,004	0,00011	2,8
BER Witt8	98,875	0,12	0,12	0,018	0,0008	4,5	0,076	0,0028	3,7	0,283	0,0017	0,6	0,004	0,00012	3,0
BER Witt9	98,048	0,12	0,12	0,024	0,0007	2,8	0,206	0,0054	2,6	0,332	0,0017	0,5	0,004	0,00011	2,8
BER Witt10	97,967	0,12	0,12	0,020	0,0008	3,8	0,179	0,0049	2,7	0,248	0,0016	0,6	0,004	0,00011	2,8
BER Witt11	100,285	0,10	0,10	0,023	0,0007	3,1	0,251	0,0053	2,1	0,254	0,0018	0,7	0,005	0,00013	2,6
BER Witt12	98,912	0,10	0,10	0,028	0,0007	2,4	0,182	0,0044	2,4	0,306	0,0017	0,6	0,006	0,00015	2,5
BER Witt13	100,234	0,10	0,10	0,020	0,0008	3,9	0,194	0,0049	2,5	0,254	0,0017	0,7	0,004	0,00011	2,8
BER Witt14	99,783	0,10	0,10	0,018	0,0009	4,7	0,089	0,0028	3,1	0,236	0,0017	0,7	0,003	0,00011	3,7
BER Witt15	100,003	0,10	0,10	0,017	0,0009	5,2	0,237	0,0050	2,1	0,214	0,0018	0,8	0,003	0,00011	3,7
BER Grund1	98,404	0,10	0,10	0,014	0,0011	7,9	0,090	0,0028	3,1	0,190	0,0016	0,8	0,006	0,00020	3,3
BER Grund2	98,035	0,10	0,10	0,013	0,0014	10,8	0,032	0,0013	4,1	0,190	0,0016	0,8	0,005	0,00019	3,8
BER Grund3	98,091	0,10	0,10	0,016	0,0009	5,8	0,155	0,0040	2,6	0,213	0,0016	0,8	0,004	0,00016	4,0
BER Grund4	98,238	0,10	0,10	0,013	0,0012	9,2	0,015	0,0006	4,3	0,238	0,0016	0,7	0,004	0,00017	4,3
BER Grund5	97,802	0,10	0,10	0,014	0,0011	7,9	0,068	0,0023	3,4	0,202	0,0016	0,8	0,004	0,00017	4,3
BER Hung1	98,332	0,12	0,12	0,017	0,0009	5,1	0,040	0,0019	4,8	0,180	0,0016	0,9	0,001	0,00006	5,6
BER Hung2	94,819	0,11	0,12	0,020	0,0008	3,8	0,190	0,0053	2,8	0,170	0,0016	0,9	0,002	0,00006	3,0
BER Hung3	97,261	0,12	0,12	0,012	0,0016	13,3				0,237	0,0016	0,7	0,002	0,00007	3,4
BER Hung4	97,840	0,12	0,12	0,020	0,0008	3,9	0,258	0,0060	2,3	0,197	0,0016	0,8	0,002	0,00007	3,3
BER Hung5	97,872	0,12	0,12	0,016	0,0010	5,9	0,210	0,0055	2,6	0,185	0,0016	0,9	0,001	0,00006	5,9

D1.2 MgO (%), CaO (%), Na_2O (%), K_2O (%), P_2O_5 (%), LOI (%)

Sample	MgO (%)			CaO (%)			Na_2O (%)			K_2O (%)			P_2O_5 (%)			LOI (%)
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	±3 σ (%)	x_i
BER Arnh1	0,071	0,0015	2,1	0,034	0,0003	0,8	0,070	0,0078	11,1	0,035	0,0004	1,0	0,010	0,0029	29,0	0,91
BER Arnh2	0,085	0,0015	1,8	0,162	0,0006	0,3	0,075	0,0069	9,2	0,047	0,0004	0,8	0,017	0,0016	9,4	0,80
BER Arnh3	0,081	0,0015	1,9	0,079	0,0004	0,5	0,086	0,0059	6,9	0,047	0,0004	0,8	0,034	0,0013	3,8	0,86
BER Arnh4	0,075	0,0015	2,0	0,040	0,0003	0,7	0,075	0,0072	9,6	0,034	0,0003	1,0	0,012	0,0021	17,5	0,88
BER Arnh5	0,078	0,0015	1,9	0,099	0,0005	0,5	0,057	0,0160	28,1	0,022	0,0003	1,4	0,013	0,0018	13,8	0,65
BER Arnh6	0,071	0,0015	2,1	0,081	0,0004	0,5	0,082	0,0064	7,8	0,039	0,0004	0,9	0,041	0,0013	3,2	0,75
BER Arnh7	0,078	0,0015	1,9	0,276	0,0007	0,3	0,073	0,0075	10,3	0,018	0,0003	1,6	0,012	0,0021	17,5	0,64
BER Arnh8	0,070	0,0015	2,1	0,019	0,0002	1,1	0,076	0,0073	9,6	0,022	0,0003	1,4	0,012	0,0020	16,7	0,55
BER Arnh9	0,068	0,0015	2,2	0,029	0,0003	0,9	0,069	0,0082	11,9	0,020	0,0003	1,5	0,020	0,0026	13,0	0,57
BER Arnh10	0,069	0,0015	2,2	0,048	0,0003	0,7	0,065	0,0098	15,1	0,024	0,0003	1,3	0,013	0,0019	14,6	0,64
BER Arnh11	0,084	0,0013	1,5	0,147	0,0005	0,4	0,158	0,0036	2,3	0,040	0,0004	0,9	0,063	0,0012	1,9	0,85
BER Arnh12	0,114	0,0014	1,2	0,150	0,0006	0,4	0,123	0,0039	3,2	0,036	0,0004	1,0	0,019	0,0013	6,8	0,63
BER Arnh13	0,079	0,0013	1,6	0,067	0,0004	0,6	0,078	0,0058	7,4	0,037	0,0004	1,0	0,016	0,0014	8,8	0,76
BER Arnh14	0,083	0,0013	1,6	0,078	0,0004	0,5	0,086	0,0051	5,9	0,037	0,0004	0,9	0,018	0,0013	7,2	0,79
BER Arnh15	0,082	0,0013	1,6	0,054	0,0003	0,6	0,281	0,0034	1,2	0,045	0,0004	0,8	0,010	0,0024	24,0	0,80
BER Borg1	0,079	0,0015	1,9	0,048	0,0003	0,7	0,082	0,0059	7,2	0,022	0,0003	1,4	0,013	0,0019	14,6	0,51
BER Borg2	0,082	0,0015	1,8	0,091	0,0004	0,5	0,087	0,0055	6,3	0,018	0,0003	1,7	0,018	0,0015	8,3	0,47
BER Borg3	0,078	0,0015	1,9	0,032	0,0003	0,8	0,090	0,0054	6,0	0,018	0,0003	1,7	0,012	0,0021	17,5	0,57
BER Borg4	0,079	0,0015	1,9	0,047	0,0003	0,7	0,077	0,0064	8,3	0,019	0,0003	1,6	0,013	0,0019	14,6	0,43
BER Borg5	0,072	0,0015	2,1	0,035	0,0003	0,8	0,067	0,0084	12,5	0,021	0,0003	1,5	0,011	0,0024	21,8	0,43
BER Borg6	0,072	0,0015	2,1	0,051	0,0003	0,7	0,063	0,0097	15,4	0,015	0,0003	1,9	0,011	0,0024	21,8	0,41
BER Borg7	0,072	0,0014	1,9	0,094	0,0004	0,5	0,070	0,0075	10,7	0,018	0,0003	1,7	0,017	0,0016	9,4	0,40
BER Borg8	0,068	0,0014	2,1	0,068	0,0004	0,6	0,068	0,0081	11,9	0,018	0,0003	1,7	0,014	0,0017	12,1	0,47
BER Borg9	0,073	0,0015	2,1	0,024	0,0002	1,0	0,064	0,0093	14,5	0,017	0,0003	1,8	0,012	0,0021	17,5	0,55
BER Borg10	0,085	0,0015	1,8	0,176	0,0006	0,3	0,099	0,0047	4,7	0,038	0,0004	0,9	0,018	0,0015	8,3	0,70
BER Borg11	0,071	0,0015	2,1	0,031	0,0003	0,8	0,071	0,0074	10,4	0,024	0,0003	1,3	0,015	0,0017	11,3	0,68
BER Borg12	0,069	0,0015	2,2	0,084	0,0004	0,5	0,054	0,0190	35,2	0,008	0,0003	3,1	0,011	0,0025	22,7	0,41
BER Borg13	0,072	0,0015	2,1	0,033	0,0003	0,8	0,069	0,0079	11,4	0,017	0,0003	1,8	0,009	0,0039	43,3	0,44

Sample	MgO (%)			CaO (%)			Na_2O (%)			K_2O (%)			P_2O_5 (%)			LOI (%)
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	±3 σ (%)	x_i
BER Borg14	0,073	0,0015	2,1	0,076	0,0004	0,5	0,071	0,0074	10,4	0,017	0,0003	1,8	0,009	0,0034	37,8	0,48
BER Borg15	0,071	0,0015	2,1	0,026	0,0002	0,9	0,069	0,0078	11,3	0,022	0,0003	1,4	0,010	0,0028	28,0	0,56
BER Borg16	0,070	0,0015	2,1	0,092	0,0004	0,5	0,061	0,0110	18,0	0,013	0,0003	2,2	0,011	0,0023	20,9	0,48
BER Borg17	0,072	0,0015	2,1	0,175	0,0006	0,3	0,053	0,0200	37,7	0,008	0,0003	3,1	0,009	0,0040	44,4	0,51
BER Borg18	0,068	0,0015	2,2	0,076	0,0004	0,5	0,058	0,0130	22,4	0,018	0,0003	1,6	0,010	0,0029	29,0	0,78
BER Borg19	0,068	0,0015	2,2	0,053	0,0003	0,6	0,067	0,0082	12,2	0,018	0,0003	1,6	0,010	0,0028	28,0	0,48
BER Borg20	0,066	0,0015	2,3	0,060	0,0004	0,6	0,060	0,0120	20,0	0,014	0,0003	2,0	0,016	0,0016	10,0	0,48
BER Borg5.2	0,073	0,0015	2,1	0,031	0,0003	0,8	0,068	0,0082	12,0	0,023	0,0003	1,4	0,009	0,0033	36,7	0,73
BER Wipp1	0,078	0,0015	1,9	0,103	0,0005	0,4	0,064	0,0095	14,8	0,015	0,0003	1,9	0,010	0,0028	28,0	0,33
BER Wipp2	0,070	0,0015	2,1	0,018	0,0002	1,1	0,067	0,0083	12,4	0,018	0,0003	1,7	0,010	0,0029	29,0	0,47
BER Wipp3	0,071	0,0014	2,0	0,013	0,0002	1,2	0,066	0,0085	12,9	0,017	0,0003	1,7	0,010	0,0028	28,0	0,43
BER Wipp4	0,067	0,0015	2,2	0,023	0,0002	0,9	0,066	0,0089	13,5	0,022	0,0003	1,4	0,010	0,0028	28,0	0,63
BER Wipp5	0,065	0,0015	2,3	0,012	0,0001	1,2	0,064	0,0098	15,3	0,013	0,0003	2,1	0,011	0,0024	21,8	0,51
BER Wipp6	0,065	0,0015	2,3	0,017	0,0002	1,1	0,065	0,0093	14,3	0,017	0,0003	1,7	0,010	0,0030	30,0	0,71
BER Wipp7	0,071	0,0015	2,1	0,043	0,0003	0,7	0,074	0,0073	9,9	0,015	0,0003	1,9	0,013	0,0019	14,6	0,37
BER Wipp8	0,069	0,0015	2,2	0,025	0,0002	0,9	0,069	0,0085	12,3	0,026	0,0003	1,2	0,011	0,0023	20,9	0,43
BER Wipp9	0,065	0,0015	2,3	0,012	0,0002	1,3	0,064	0,0100	15,6	0,022	0,0003	1,4	0,016	0,0016	10,0	0,67
BER Wipp10	0,067	0,0015	2,2	0,042	0,0003	0,7	0,065	0,0095	14,6	0,019	0,0003	1,6	0,012	0,0022	18,3	0,43
BER Wipp11	0,077	0,0013	1,7	0,045	0,0003	0,7	0,065	0,0082	12,6	0,018	0,0003	1,7	0,009	0,0028	31,1	0,50
BER Wipp12	0,077	0,0013	1,7	0,072	0,0004	0,5	0,066	0,0078	11,8	0,020	0,0003	1,6	0,010	0,0026	26,0	0,40
BER Wipp13	0,078	0,0013	1,7	0,057	0,0004	0,6	0,072	0,0066	9,2	0,029	0,0003	1,1	0,010	0,0025	25,0	0,50
BER Wipp14	0,075	0,0013	1,7	0,048	0,0003	0,7	0,069	0,0072	10,4	0,026	0,0003	1,3	0,008	0,0040	50,0	0,60
BER Wipp15	0,076	0,0013	1,7	0,032	0,0003	0,8	0,085	0,0051	6,0	0,017	0,0003	1,8	0,010	0,0026	26,0	0,60
BER Witt1	0,078	0,0015	1,9	0,038	0,0003	0,8	0,293	0,0038	1,3	0,043	0,0004	0,8	0,015	0,0017	11,3	0,57
BER Witt2	0,073	0,0015	2,1	0,036	0,0003	0,8	0,073	0,0071	9,7	0,046	0,0004	0,8	0,011	0,0023	20,9	0,50
BER Witt3	0,073	0,0015	2,1	0,025	0,0002	0,9	0,085	0,0057	6,7	0,043	0,0004	0,8	0,011	0,0022	20,0	0,76
BER Witt4	0,073	0,0014	1,9	0,051	0,0003	0,6	0,073	0,0065	8,9	0,047	0,0004	0,7	0,012	0,0019	15,8	0,67
BER Witt5	0,072	0,0015	2,1	0,027	0,0002	0,9	0,087	0,0058	6,7	0,060	0,0004	0,7	0,011	0,0023	20,9	0,82
BER Witt6	0,071	0,0015	2,1	0,031	0,0003	0,8	0,077	0,0068	8,8	0,054	0,0004	0,7	0,013	0,0019	14,6	1,02

Sample	MgO (%)			CaO (%)			Na_2O (%)			K_2O (%)			P_2O_5 (%)			LOI (%)
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	±3 σ (%)	x_i
BER Witt7	0,074	0,0015	2,0	0,017	0,0002	1,1	0,079	0,0064	8,1	0,043	0,0004	0,8	0,013	0,0019	14,6	0,52
BER Witt8	0,069	0,0015	2,2	0,010	0,0001	1,2	0,061	0,0120	19,7	0,018	0,0003	1,6	0,011	0,0023	20,9	0,67
BER Witt9	0,070	0,0015	2,1	0,023	0,0002	1,0	0,081	0,0065	8,0	0,057	0,0004	0,7	0,012	0,0022	18,3	0,65
BER Witt10	0,068	0,0015	2,2	0,033	0,0003	0,8	0,071	0,0081	11,4	0,048	0,0004	0,8	0,011	0,0022	20,0	0,63
BER Witt11	0,081	0,0013	1,6	0,042	0,0003	0,7	0,078	0,0057	7,3	0,064	0,0004	0,6	0,013	0,0017	13,1	0,70
BER Witt12	0,072	0,0013	1,8	0,031	0,0003	0,8	0,072	0,0067	9,3	0,048	0,0004	0,8	0,010	0,0026	26,0	0,80
BER Witt13	0,085	0,0013	1,5	0,030	0,0003	0,9	0,083	0,0053	6,4	0,054	0,0004	0,7	0,010	0,0024	24,0	0,50
BER Witt14	0,075	0,0013	1,7	0,059	0,0004	0,6	0,105	0,0042	4,0	0,024	0,0003	1,3	0,010	0,0026	26,0	0,50
BER Witt15	0,091	0,0013	1,4	0,054	0,0003	0,6	0,132	0,0038	2,9	0,053	0,0004	0,7	0,013	0,0017	13,1	0,70
BER Grund1	0,132	0,0017	1,3	0,149	0,0007	0,4	0,103	0,0053	5,1	0,031	0,0004	1,4	0,010	0,0034	34,0	0,67
BER Grund2	0,113	0,0017	1,5	0,216	0,0008	0,4	0,065	0,0100	15,4	0,020	0,0004	1,9	0,010	0,0033	33,0	0,63
BER Grund3	0,075	0,0016	2,1	0,040	0,0004	0,9	0,126	0,0047	3,7	0,048	0,0005	1,0	0,012	0,0022	18,3	0,61
BER Grund4	0,076	0,0016	2,1	0,101	0,0006	0,6	0,053			0,013	0,0004	2,7	0,009	0,0038	42,2	0,45
BER Grund5	0,082	0,0016	2,0	0,121	0,0006	0,5	0,069	0,0087	12,6	0,024	0,0004	1,7	0,019	0,0017	8,9	0,59
BER Hung1	0,099	0,0015	1,5	0,056	0,0004	0,6	0,070	0,0077	11,0	0,034	0,0003	1,0	0,014	0,0018	12,9	0,27
BER Hung2	0,644	0,0025	0,4	0,860	0,0012	0,1	0,071	0,0076	10,7	0,030	0,0003	1,1	0,020	0,0014	7,0	1,48
BER Hung3	0,332	0,0020	0,6	0,393	0,0009	0,2	0,062	0,0110	17,7	0,014	0,0003	2,0	0,011	0,0025	22,7	0,92
BER Hung4	0,165	0,0017	1,0	0,235	0,0007	0,3	0,083	0,0060	7,2	0,045	0,0004	0,8	0,017	0,0016	9,4	0,74
BER Hung5	0,078	0,0015	1,9	0,050	0,0003	0,7	0,069	0,0079	11,4	0,028	0,0003	1,2	0,022	0,0014	6,4	0,36

D1.3 Ba (ppm), Co (ppm), Cr (ppm), Ni (ppm), Rb (ppm), Sr (ppm)

Sample	Ba (ppm)			Co (ppm)			Cr (ppm)			Ni (ppm)			Rb (ppm)			Sr (ppm)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Arnh1	53,7	8,5	15,8	219,8	0,61	0,3	47,3	0,52	1,1	6,5	0,73	11,2	3,6	1,1	30,6	3,0	0,46	15,3
BER Arnh2	62,4	7,1	11,4	216,1	0,60	0,3	90,7	0,69	0,8	19,0	0,71	3,7	4,1	1,0	24,4	4,2	0,49	11,7
BER Arnh3	71,8	6,5	9,1	185,3	0,59	0,3	39,8	0,47	1,2	33,9	0,87	2,6	3,0			7,5	0,55	7,3
BER Arnh4	60,4	7,7	12,7	245,4	0,65	0,3	42,9	0,49	1,1	37,9	0,95	2,5	3,5	1,2	34,3	4,3	0,50	11,6
BER Arnh5	73,9	7,1	9,6	320,7	0,72	0,2	54,4	0,56	1,0	28,7	0,64	2,2	2,9			6,6	0,54	8,2
BER Arnh6	59,7	7,3	12,2	240,2	0,65	0,3	79,9	0,69	0,9	41,3	0,60	1,5	3,9	1,1	28,2	4,7	0,51	10,9
BER Arnh7	97,6	5,6	5,7	257,0	0,77	0,3	99,1	0,89	0,9	23,2	0,64	2,8	3,6	1,3	36,1	14,2	0,63	4,4
BER Arnh8	54,3	9,3	17,1	487,0	1,00	0,2	61,7	0,71	1,2	30,4	0,95	3,1				9,0	0,60	6,7
BER Arnh9	55,3	6,8	12,3	337,2	0,86	0,3	138,0	1,00	0,7	16,3	0,26	1,6				8,6	0,60	7,0
BER Arnh10	55,8	8,9	15,9	461,7	0,98	0,2	78,0	0,80	1,0	32,0	0,87	2,7				6,1	0,57	9,3
BER Arnh11	72,4	7,3	10,1	370,5	0,91	0,2	15,1	0,29	1,9				4,9	1,0	20,4	9,5	0,62	6,5
BER Arnh12	75,5	7,3	9,7	430,8	0,98	0,2	80,6	0,85	1,1	49,1	2,90	5,9	3,6	1,3	36,1	7,3	0,60	8,2
BER Arnh13	64,3	9,0	14,0	388,0	0,94	0,2	37,8	0,56	1,5				2,9			8,0	0,60	7,5
BER Arnh14	52,8	10,0	18,9	426,9	0,96	0,2	26,8	0,44	1,6	48,1	6,60	13,7	3,7	1,2	32,4	8,2	0,58	7,1
BER Arnh15	65,0	7,9	12,2	411,0	0,96	0,2	24,4	0,41	1,7				3,2	1,5	46,9	7,8	0,60	7,7
BER Borg1	43,7	9,0	20,6	144,1	0,52	0,4	60,9	0,58	1,0	2,7	0,58	21,5	3,6	1,1	30,6	2,5	0,43	17,2
BER Borg2	32,0	12,0	37,5	114,4	0,49	0,4	124,7	0,80	0,6	2,8	0,32	11,4	3,1	1,3	41,9	4,5	0,51	11,3
BER Borg3	40,6	8,5	20,9	94,3	0,46	0,5	62,3	0,60	1,0	18,3	0,69	3,8	3,0	1,4	46,7	2,3	0,43	18,7
BER Borg4	33,1	12,0	36,3	107,1	0,48	0,4	87,5	0,69	0,8	17,8	0,67	3,8	3,5	1,2	34,3	2,4	0,43	17,9
BER Borg5	36,9	11,0	29,8	147,1	0,52	0,4	124,0	0,79	0,6	29,5	0,68	2,3	4,0	1,0	25,0	2,5	0,44	17,6
BER Borg6	26,8			107,4	0,48	0,4	91,4	0,70	0,8	19,2	0,59	3,1				2,6	0,44	16,9
BER Borg7	48,8	7,6	15,6	112,6	0,48	0,4	113,6	0,77	0,7				3,7	1,1	29,7	5,5	0,52	9,5
BER Borg8	29,3			153,3	0,53	0,3	100,6	0,73	0,7				3,9	1,0	25,6	5,4	0,51	9,4
BER Borg9	33,4	15,0	44,9	155,6	0,53	0,3	81,2	0,66	0,8	10,8	0,66	6,1	3,0	1,4	46,7	4,3	0,49	11,4
BER Borg10	16,3			229,7	0,47	0,2	7,2	0,62	8,6				3,8	1,1	28,9	5,6	0,52	9,3
BER Borg11	25,3			124,6	0,50	0,4	84,6	0,68	0,8	20,7	0,65	3,1	3,7	1,1	29,7	2,6	0,44	16,9
BER Borg12	40,0	7,4	18,5	111,0	0,48	0,4	108,0	0,75	0,7	18,1	0,54	3	2,9			3,0	0,46	15,3
BER Borg13	44,3	8,7	19,6	151,2	0,54	0,4	83,5	0,68	0,8	18,8	0,77	4,1	3,3	1,3	39,4	2,8	0,45	16,1

Sample	Ba (ppm)			Co (ppm)			Cr (ppm)			Ni (ppm)			Rb (ppm)			Sr (ppm)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Borg14	31,7			153,4	0,54	0,4	61,8	0,59	1,0	13,3	0,72	5,4	3,0			3,5	0,48	13,7
BER Borg15	38,3	12,0	31,3	178,4	0,56	0,3	123,0	0,79	0,6	24,9	0,68	2,7	3,8	1,1	28,9	2,7	0,45	16,7
BER Borg16	27,0			127,9	0,50	0,4	138,9	0,83	0,6	21,1	0,61	2,9	3,7	1,1	29,7	4,0	0,49	12,3
BER Borg17	23,7			111,8	0,49	0,4	140,3	0,83	0,6	29,3	0,57	1,9	3,3	1,3	39,4	2,6	0,44	16,9
BER Borg18	30,4	12,0	39,5	151,7	0,66	0,4	135,3	1,00	0,7	31,2	0,40	1,3				2,9	0,49	16,9
BER Borg19	30,1	11,0	36,5	198,2	0,71	0,4	90,2	0,86	1,0	29,1	0,46	1,6				4,3	0,54	12,6
BER Borg20	35,8	12,0	33,5	213,2	0,73	0,3	68,3	0,75	1,1	3,7	0,07	1,9	3,9	1,2	30,8	10,6	0,64	6,0
BER Borg5.2	37,0	7,9	21,4	85,2	0,48	0,6	17,9	0,31	1,7	10,6	0,46	4,3				4,7	0,54	11,5
BER Wipp1	32,9	11,0	33,4	120,1	0,49	0,4	122,4	0,79	0,6	5,0	0,44	8,8	3,8	1,1	28,9	3,4	0,49	14,4
BER Wipp2	33,5	12,0	35,8	125,5	0,50	0,4	138,8	0,82	0,6	32,2	0,63	2	4,0	1,0	25,0	2,0	0,41	20,5
BER Wipp3	27,4			131,7	0,51	0,4	159,1	0,87	0,5	33,9	0,52	1,5	3,1	1,4	45,2	2,4	0,43	17,9
BER Wipp4	29,7			153,3	0,54	0,4	150,5	0,90	0,6	69,0	0,64	0,9				1,4	0,36	25,7
BER Wipp5	28,1			183,8	0,58	0,3	92,6	0,74	0,8	44,9	0,73	1,6	3,3	1,3	39,4	2,4	0,44	18,3
BER Wipp6	38,5	10,0	26,0	174,0	0,57	0,3	65,5	0,62	0,9	37,8	0,64	1,7				2,2	0,43	19,5
BER Wipp7				300,8	0,91	0,3	59,1	0,70	1,2	37,7	0,58	1,5				6,5	0,58	8,9
BER Wipp8	33,8	13,0	38,5	271,2	0,78	0,3	144,9	1,00	0,7	42,9	0,51	1,2				10,7	0,61	5,7
BER Wipp9				249,4	0,76	0,3	123,0	0,97	0,8	57,4	0,62	1,1	3,3	1,4	42,4	4,7	0,55	11,7
BER Wipp10	31,4	14,0	44,6	276,7	0,79	0,3	153,6	1,10	0,7	56,0	0,67	1,2	3,4	1,4	41,2	10,5	0,61	5,8
BER Wipp11	27,1			211,6	0,76	0,4	74,7	0,82	1,1	55,8	2,00	3,6	3,0			3,1	0,51	16,5
BER Wipp12	28,5			143,0	0,68	0,5	93,1	0,91	1,0	59,8	1,60	2,7				2,3	0,48	20,9
BER Wipp13	28,6			163,5	0,70	0,4	87,5	0,89	1,0	57,0	1,40	2,5	3,5	1,3	37,1	3,6	0,54	15,0
BER Wipp14	31,1	15,0	48,2	144,8	0,68	0,5	73,8	0,81	1,1	49,9	1,60	3,2				4,1	0,55	13,4
BER Wipp15	31,8	12,0	37,7	137,3	0,67	0,5	131,3	1,00	0,8	63,3	1,20	1,9				6,2	0,59	9,5
BER Witt1	50,0	9,3	18,6	251,1	0,64	0,3	58,6	0,57	1,0				3,6	1,1	30,6	2,4	0,43	17,9
BER Witt2	38,9	11,0	28,3	186,9	0,57	0,3	142,5	0,83	0,6	17,9	0,47	2,6	4,2	1,0	23,8	3,7	0,48	13,0
BER Witt3	35,6	13,0	36,5	202,9	0,58	0,3	202,2	0,94	0,5	46,1	0,61	1,3	4,7	0,9	19,6	1,9	0,41	21,6
BER Witt4	43,0	7,1	16,5	144,0	0,51	0,4	53,0	0,51	1,0	45,0	0,63		5,0	1,0	20,0	3,0	0,43	14,3
BER Witt5	42,3	9,1	21,5	196,9	0,60	0,3	68,8	0,64	0,9	46,4	0,70	1,5	4,1	1,0	24,4	4,6	0,51	11,1

Sample	Ba (ppm)			Co (ppm)			Cr (ppm)			Ni (ppm)			Rb (ppm)			Sr (ppm)		
	x_i	$\pm 3\sigma$	$\pm 3\sigma$ (%)	x_i	$\pm 3\sigma$	$\pm 3\sigma$ (%)	x_i	$\pm 3\sigma$	$\pm 3\sigma$ (%)	x_i	$\pm 3\sigma$	$\pm 3\sigma$ (%)	x_i	$\pm 3\sigma$	$\pm 3\sigma$ (%)	x_i	$\pm 3\sigma$	$\pm 3\sigma$ (%)
BER Witt6	41,6	9,7	23,3	196,7	0,60	0,3	127,4	0,84	0,7	50,7	0,64	1,3	3,5	1,2	34,3	4,4	0,51	11,6
BER Witt7				358,8	0,88	0,2	115,5	0,96	0,8	6,0	0,07	1,2				9,5	0,61	6,4
BER Witt8				188,4	0,70	0,4	275,4	1,30	0,5	106,9	0,77	0,7				3,1	0,50	16,1
BER Witt9	32,8	11,0	33,5	188,7	0,69	0,4	244,2	1,20	0,5	86,0	0,64	0,7	3,9	1,2	30,8	8,3	0,62	7,5
BER Witt10	40,6	11,0	27,1	289,9	0,80	0,3	168,2	1,10	0,7	64,5	0,68	1,1	3,6	1,3	36,1	7,4	0,59	8,0
BER Witt11	40,7	9,4	23,1	221,3	0,77	0,3	58,3	0,72	1,2	51,8	1,80	3,5	4,3	1,1	25,6	6,3	0,59	9,4
BER Witt12	47,6	13,0	27,3	587,4	1,10	0,2	259,7	1,30	0,5	85,5	1,20	1,4	3,6	1,3	36,1	12,1	0,63	5,2
BER Witt13	40,5	10,0	24,7	265,0	0,81	0,3	150,4	1,10	0,7	64,8	1,30	2	2,4			5,7	0,58	10,2
BER Witt14	32,0			247,8	0,79	0,3	146,9	1,10	0,7	67,5	0,99	1,5	4,4	1,1	25,0	4,4	0,55	12,5
BER Witt15	35,1	13,0	37,0	249,3	0,80	0,3	60,9	0,74	1,2	52,9	1,70	3,2	4,9	1,0	20,4	7,4	0,60	8,1
BER Grund1	55,6	7,6	13,7	202,6	0,82	0,4	106,2	1,30	1,2	27,0	1,90	7,0	3,0			1,6	0,43	26,9
BER Grund2	28,9			162,6	0,77	0,5	107,3	1,30	1,2	20,6	1,20	5,8				2,5	0,50	20,0
BER Grund3	30,3			151,7	0,76	0,5	53,7	0,96	1,8	17,2	1,70	9,9				1,2	0,38	31,7
BER Grund4				132,7	0,74	0,6	122,3	1,40	1,1	26,5	0,92	3,5	3,2	1,5	46,9	1,3	0,41	31,5
BER Grund5	37,6	12,0	31,9	159,4	0,77	0,5	102,8	1,30	1,3	19,4	0,81	4,2				4,6	0,61	13,3
BER Hung1	31,2	12,0	38,5	116,3	0,52	0,4	21,3	0,34	1,6	12,9	0,62	4,8	3,4	1,3	38,2	1,9	0,41	21,6
BER Hung2	73,3	6,8	9,3	250,4	0,66	0,3	41,9	0,52	1,2	12,7	0,66	5,2	3,0	1,4	46,7	12,8	0,58	4,5
BER Hung3	37,2	13,0	34,9	292,1	0,70	0,2	98,9	0,78	0,8	41,2	0,76	1,8	2,4			4,1	0,50	12,2
BER Hung4	104,0	5,9	5,7	298,5	0,71	0,2	86,0	0,73	0,8	29,4	0,81	2,8	2,9			8,7	0,56	6,4
BER Hung5	43,9	9,2	21,0	307,2	0,73	0,2	66,9	0,66	1,0	24,6	0,67	2,7	2,3			10,8	0,58	5,4

D1.4 V (ppm), Y (ppm), Zn (ppm), Zr (ppm), Ce (ppm), Eu (ppm)

Sample	V (ppm)			Y (ppm)			Zn (ppm)			Zr (ppm)			Ce (ppm)			Eu (ppm)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Arnh1	3,2															0,6	0,11	18,3
BER Arnh2	6,5	1,3	20,0													0,4	0,04	10,0
BER Arnh3	5,2	1,2	23,1							5,1	2,0	39,2				0,9	0,01	1,1
BER Arnh4	4,3															1,0	0,04	4,1
BER Arnh5	2,5									4,1						1,1	0,04	3,5
BER Arnh6	2,4									4,0						0,7	0,03	4,4
BER Arnh7	4,1	1,3	31,7													1,2	0,08	6,3
BER Arnh8																1,8	0,12	6,7
BER Arnh9	3,3	1,3	39,4													1,4	0,08	5,4
BER Arnh10																1,8	0,14	7,8
BER Arnh11	4,0									4,7	1,9	40,4				1,8	0,06	3,6
BER Arnh12	4,0	1,7	42,5							4,6	2,0	43,5				1,8	0,06	3,3
BER Arnh13	5,6	1,3	23,2							6,6	1,2	18,2				1,5	0,07	4,9
BER Arnh14	3,8	1,6	42,1							4,7	2,0	42,6				1,7	0,07	4,3
BER Arnh15	5,2	1,4	26,9							3,8						1,6	0,08	4,7
BER Borg1	1,7									3,8						0,4	0,05	11,8
BER Borg2	2,4			5,2	0,73	14										0,4	0,03	8,3
BER Borg3	3,6															0,3	0,06	19,7
BER Borg4	3,7															0,5	0,07	13,6
BER Borg5										4,9	2,0	40,8				0,5	0,07	14,2
BER Borg6																0,3	0,05	15,0
BER Borg7										3,5						0,4	0,06	15,3
BER Borg8	2,0									4,3						0,4	0,04	9,0
BER Borg9	6,6	1,7	25,8													0,6	0,08	12,5
BER Borg10	5,5	0,9	15,5				92,4	0,36	0,4	3,9						0,4	0,03	6,8
BER Borg11	3,7									4,6						0,5	0,07	14,4
BER Borg12	6,2	2,0	32,3													0,4	0,05	11,3
BER Borg13																0,3	0,05	17,3

Sample	V (ppm)			Y (ppm)			Zn (ppm)			Zr (ppm)			Ce (ppm)			Eu (ppm)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Borg14										5,4	2,1	38,9				0,5	0,06	11,6
BER Borg15	4,9	2,1	42,9													0,5	0,04	8,6
BER Borg16	5,2	2,3	44,2													0,5	0,05	10,6
BER Borg17	6,1	2,2	36,1													0,4	0,03	8,0
BER Borg18	5,3	1,9	35,8													0,6	0,04	7,3
BER Borg19	5,2	2,2	42,3													0,8	0,05	6,1
BER Borg20										5,0	1,9	38,0				1,0	0,10	9,5
BERBorg5.2																0,4	0,12	30,0
BER Wipp1	5,0	1,6	32,0													0,3	0,03	11,0
BER Wipp2	4,4	1,9	43,2													0,3	0,03	10,7
BER Wipp3	4,7															0,4	0,04	8,8
BER Wipp4	4,9	2,0	40,8													0,7	0,03	3,9
BER Wipp5																0,8	0,03	4,1
BER Wipp6	4,9									4,4						0,6	0,03	5,7
BER Wipp7	8,4	1,3	15,5													1,1	0,04	3,5
BER Wipp8	2,0	0,8	41,0													1,0	0,05	5,0
BER Wipp9	17,5	1,1	6,3													1,0	0,02	1,8
BER Wipp10	3,5	0,9	25,4													1,0	0,07	7,0
BER Wipp11	5,8	1,8	31,0							4,3						0,9	0,04	4,2
BER Wipp12	6,9	2,2	31,9							7,9	1,5	19,0				0,7	0,03	3,6
BER Wipp13	4,7									5,9	2,6	44,1				0,7	0,03	3,7
BER Wipp14	5,9	1,8	30,5							5,9	1,7	28,8				0,4	0,02	5,3
BER Wipp15	4,2	1,8	42,9							6,1	1,5	24,6				0,7	0,03	4,3
BER Witt1	3,3	1,3	39,4													0,5	0,09	18,6
BER Witt2	4,6	1,2	26,1													0,5	0,05	10,8
BER Witt3	4,9	1,2	24,5													0,5	0,04	7,6
BER Witt4	10,0	0,9	9,3							5,0						0,4	0,01	3,0
BER Witt5	3,5	1,0	28,0							4,3						0,8	0,03	4,1

Sample	V (ppm)			Y (ppm)			Zn (ppm)			Zr (ppm)			Ce (ppm)			Eu (ppm)		
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)
BER Witt6	6,4	1,1	17,2													0,7	0,02	2,9
BER Witt7	6,0	0,9	14,2				112,7	0,46	0,4				38,3	7,4	19,3	1,4	0,05	3,8
BER Witt8	4,8	1,3	27,1													0,9	0,04	4,9
BER Witt9	3,3	0,8	23,0													0,7	0,03	4,0
BER Witt10	3,3	1,1	33,3													1,3	0,10	7,5
BER Witt11	7,5	1,0	12,9							6,3	1,5	23,8				0,8	0,04	4,6
BER Witt12	1,5	0,4	24,7							3,1						2,0	0,07	3,5
BER Witt13	6,7	1,1	16,4							6,1	1,8	29,5				1,0	0,05	4,6
BER Witt14										4,1						0,9	0,04	4,7
BER Witt15	5,5	1,5	27,3							4,1	1,9	46,3				1,0	0,05	5,0
BER Grund1	5,1															1,4	0,03	2,4
BER Grund2																1,3	0,03	2,6
BER Grund3	5,9	1,9	32,2													1,3	0,03	2,3
BER Grund4	4,9															0,9	0,02	2,1
BER Grund5				6,8	0,91	13,4										1,4	0,03	2,4
BER Hung1	9,0	1,2	13,3							5,0						0,5	0,06	11,8
BER Hung2	3,7	1,1	29,7							4,3	1,5	34,9				0,8	0,11	13,8
BER Hung3																0,7	0,04	6,0
BER Hung4	3,8	1,1	28,9							4,2	1,8	42,9				0,8	0,09	11,4
BER Hung5	3,6									3,0		0,0				0,8	0,13	16,3

D1.5 La (ppm), Nb (ppm), Nd (ppm), Sm (ppm), Yb (ppm), Summe (%)

Sample	La (ppm)			Nb (ppm)	Nd (ppm)			Sm (ppm)			Yb (ppm)			SUMME (%)
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i
BER Arnh1						1,3		7,3	1,3	17,8	0,7	0,007	1,0	97,39
BER Arnh2	2,4					1,4		4,7	1,4	29,8	0,6	0,006	1,0	97,81
BER Arnh3								10,7	1,3	12,1	0,9	0,010	1,1	99,85
BER Arnh4								12,5	1,3	10,4	0,7	0,008	1,1	99,87
BER Arnh5								14,2	1,3	9,2	0,9	0,008	0,9	98,64
BER Arnh6	3,5							8,4	1,4	16,7	0,5	0,006	1,2	99,22
BER Arnh7								14,8	1,5	10,1				98,71
BER Arnh8	5,5	2,2	40,0					23,2	1,4	6,0	0,5	0,005	1,0	99,02
BER Arnh9								17,1	1,5	8,8	0,5	0,006	1,2	98,15
BER Arnh10								22,5	1,4	6,2	0,7	0,007	1,0	99,01
BER Arnh11	5,5	2,3	41,8					23,4	1,5	6,4	0,9	0,011	1,2	101,57
BER Arnh12								23,3	1,5	6,4	0,8	0,008	1,0	100,75
BER Arnh13	5,9	2,4	40,7					19,1	1,5	7,9	0,6	0,008	1,3	100,76
BER Arnh14								21,4	1,5	7,0	0,9	0,010	1,1	101,24
BER Arnh15	2,5							20,2	1,5	7,4	0,6	0,008	1,3	100,84
BER Borg1					5,2	1,4	26,9	4,9	1,4	28,6	0,4	0,004	1,0	97,27
BER Borg2	12,1	2,2	18,2		10,5	1,5	14,3	4,1	1,5	36,6	1,5	0,021	1,4	96,00
BER Borg3	2,4							3,1			0,2	0,003	1,5	98,33
BER Borg4	2,2				0,5			5,4	1,4	25,9	0,5	0,007	1,4	98,10
BER Borg5	2,6				0,8			6,1	1,3	21,3	0,3	0,003	1,0	98,03
BER Borg6	3,8							3,3			0,5	0,009	1,8	97,92
BER Borg7	4,7				11,6	1,5	12,9	4,2	1,5	35,7	0,3	0,004	1,3	95,67
BER Borg8	3,5				6,1	1,4	23,0	4,6	1,5	32,6	0,4	0,005	1,3	95,61
BER Borg9					1,3			7,1	1,3	18,3	0,6	0,007	1,2	97,65
BER Borg10					14,0	1,5	10,7	4,6	1,5	32,6	0,3	0,005	1,7	95,49
BER Borg11								5,9	1,3	22,0	0,5	0,007	1,4	98,46
BER Borg12								5,1	1,4	27,5	0,4	0,006	1,5	98,04
BER Borg13								3,5			0,4	0,006	1,5	98,34

Sample	La (ppm)			Nb (ppm)	Nd (ppm)			Sm (ppm)			Yb (ppm)			SUMME (%)
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i
BER Borg14								6,0	1,3	21,7	0,6	0,008	1,3	98,02
BER Borg15	5,9	2,4	40,7		2,2			5,6	1,4	25,0	1,0	0,010	1,0	97,89
BER Borg16	3,6							5,6	1,3	23,2	0,5	0,008	1,6	97,88
BER Borg17								5,1	1,4	27,5	0,1	0,001	1,0	97,95
BER Borg18	5,9	2,4	40,7					7,6	1,6	21,1	0,3	0,006	2,0	98,68
BER Borg19								9,9	1,6	16,2	0,3	0,005	1,7	99,48
BER Borg20	9,4	2,3	24,5					12,4	1,5	12,1	0,6	0,001	0,2	97,43
BER Borg5.2								4,6	1,6	34,8				99,15
BER Wipp1					0,6			3,8	1,6	42,1	0,3	0,004	1,3	96,94
BER Wipp2					3,6	1,3	36,1	3,9	1,6	41,0	0,3	0,004	1,3	98,04
BER Wipp3								4,0	1,6	40,0	0,2	0,003	1,5	97,21
BER Wipp4								8,9	1,3	14,6	0,3	0,004	1,3	99,83
BER Wipp5								9,4	1,3	13,8	0,4	0,005	1,3	99,63
BER Wipp6	2,1							7,4	1,4	18,9	0,5	0,008	1,6	99,86
BER Wipp7								14,0	1,5	10,7	0,3	0,005	1,7	99,40
BER Wipp8					5,9	1,9	32,2	11,8	1,5	12,7				98,58
BER Wipp9								11,9	1,5	12,6				99,23
BER Wipp10								12,9	1,5	11,6				99,73
BER Wipp11								11,8	1,6	13,6	0,1	0,002	2,0	102,06
BER Wipp12								8,8	1,6	18,2	0,4	0,010	2,5	102,18
BER Wipp13	3,9							8,3	1,7	20,5	0,5	0,013	2,6	101,83
BER Wipp14	3,4							5,1	2,0	39,2	0,1	0,004	4,0	101,67
BER Wipp15	3,9				2,6			8,3	1,7	20,5	0,1	0,001	1,0	101,83
BER Witt1	1,9				0,2			6,0	1,4	23,3	0,7	0,007	1,0	94,22
BER Witt2					3,6	1,3	36,1	6,3	1,3	20,6	0,5	0,006	1,2	96,42
BER Witt3	5,0	2,3	46,0					6,1	1,3	21,3	0,6	0,006	1,0	97,61
BER Witt4								4,4	1,6	36,4	0,0	0,001		99,81
BER Witt5								9,5	1,3	13,7	0,6	0,008	1,3	100,06
BER Witt6					4,5	1,5	33,3	8,5	1,3	15,3	0,5	0,006	1,2	101,18

Sample	La (ppm)			Nb (ppm)	Nd (ppm)			Sm (ppm)			Yb (ppm)			SUMME (%)
	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i	± 3σ	± 3σ (%)	x_i
BER Witt7								18,0	1,4	7,8	0,5	0,006	1,2	99,49
BER Witt8								10,8	1,5	13,9		0,001		100,80
BER Witt9					5,0	1,9	38,0	8,3	1,6	19,3				99,57
BER Witt10								16,5	1,4	8,5	0,1	0,002	2,0	99,34
BER Witt11	3,5				1,3			10,4	1,6	15,4	0,2	0,005	2,5	101,84
BER Witt12								25,4	1,5	5,9	0,5	0,004	0,8	100,57
BER Witt13								12,9	1,5	11,6	0,4	0,007	1,8	101,52
BER Witt14								11,0	1,6	14,5	0,2	0,004	2,0	100,95
BER Witt15								12,5	1,6	12,8		0,001		101,56
BER Grund1	4,8							17,7	2,0	11,3				99,84
BER Grund2					13,5	2,9	21,5	16,9	2,0	11,8				99,36
BER Grund3					7,6	2,7	35,5	16,6	2,0	12,0				99,42
BER Grund4					6,9	2,7	39,1	11,1	2,1	18,9				99,24
BER Grund5	9,6	2,8	29,2		13,4	2,9	21,6	17,9	2,0	11,2	1,8	0,040	2,2	99,03
BER Hung1					0,5			5,9	1,5	25,4	0,3	0,005	1,7	99,13
BER Hung2								10,0	1,3	13,0	0,7	0,008	1,1	98,35
BER Hung3	5,1	2,4	47,1					8,2	1,3	15,9	0,5	0,006	1,2	99,29
BER Hung4	1,5				1,7			10,0	1,3	13,0	0,7	0,007	1,0	99,66
BER Hung5	6,1	2,5	41,0		1,5			10,1	1,3	12,9	0,6	0,006	1,0	98,94

D2 lg(x+1)-Werte der WDRFA-Daten für die multivariate Statistik

D2.1 TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, LOI

lg(x+1)	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Arnh01	6,0797E-05	0,00057723	0,00057723	4,343E-06	0,00030824	0,00014764	0,0003039	0,00015198	4,3427E-05	0,00393421
Arnh02	7,8166E-05	0,00075935	0,00084605	8,686E-06	0,00036899	0,00070299	0,0003256	0,00020407	7,3824E-05	0,00346053
Arnh03	7,8166E-05	0,00084172	0,00106705	8,686E-06	0,00035164	0,00034296	0,00037333	0,00020407	0,00014764	0,00371896
Arnh04	5,6455E-05	0,0005512	0,00136155	8,686E-06	0,0003256	0,00017368	0,0003256	0,00014764	5,2112E-05	0,00380507
Arnh05	6,9482E-05	0,00027786	0,00148708	8,686E-06	0,00033862	0,00042974	0,00024748	9,5534E-05	5,6455E-05	0,00281378
Arnh06	6,9482E-05	0,00067697	0,00122732	8,686E-06	0,00030824	0,00035164	0,00035598	0,00016934	0,00017802	0,00324506
Arnh07	7,8166E-05	0,00024748	0,00105406	1,3029E-05	0,00033862	0,001197	0,00031692	7,8166E-05	5,2112E-05	0,00277063
Arnh08	0,00008685	0,00044276	0,00103673	1,3029E-05	0,0003039	8,2508E-05	0,00032994	9,5534E-05	5,2112E-05	0,00239503
Arnh09	8,2508E-05	0,00030824	0,00117102	1,3029E-05	0,00029522	0,00012593	0,00029956	0,00008685	0,00008685	0,0024555
Arnh10	7,8166E-05	0,00031692	0,0009674	1,3029E-05	0,00029956	0,00020841	0,0002822	0,00010422	5,6455E-05	0,00277063
Arnh11	6,0797E-05	0,00055988	0,00126196	1,3029E-05	0,00036465	0,00063794	0,00068564	0,00017368	0,00027352	0,0036759
Arnh12	6,9482E-05	0,00101506	0,00140051	1,7371E-05	0,00049481	0,00065095	0,00053385	0,00015632	8,2508E-05	0,00272747
Arnh13	7,8166E-05	0,00063361	0,0010064	1,3029E-05	0,00034296	0,00029088	0,00033862	0,00016066	6,9482E-05	0,00328816
Arnh14	7,8166E-05	0,00075502	0,00110604	1,3029E-05	0,00036032	0,00033862	0,00037333	0,00016066	7,8166E-05	0,00341745
Arnh15	7,3824E-05	0,00064228	0,00101073	1,3029E-05	0,00035598	0,00023446	0,00121866	0,00019539	4,3427E-05	0,00346053
Borg01	8,2508E-05	0,00028654	0,00071166	4,343E-06	0,00034296	0,00020841	0,00035598	9,5534E-05	5,6455E-05	0,00220927
Borg02	7,8166E-05	0,0003256	0,00086339	4,343E-06	0,00035598	0,00039503	0,00037767	7,8166E-05	7,8166E-05	0,0020364
Borg03	6,0797E-05	0,00041238	0,00061192	4,343E-06	0,00033862	0,00013895	0,00039069	7,8166E-05	5,2112E-05	0,00246845
Borg04	6,0797E-05	0,00030824	0,00062493	4,343E-06	0,00034296	0,00020407	0,00033428	8,2508E-05	5,6455E-05	0,00186346
Borg05	5,6455E-05	0,00040805	0,00074201	8,686E-06	0,00031258	0,00015198	0,00029088	9,1192E-05	0,00004777	0,00186346
Borg06	6,5139E-05	0,00021709	0,000716	4,343E-06	0,00031258	0,00022143	0,00027352	6,5139E-05	0,00004777	0,00177697
Borg07	8,2508E-05	0,00036032	0,00063794	4,343E-06	0,00031258	0,00040805	0,0003039	7,8166E-05	7,3824E-05	0,00173371
Borg08	0,00008685	0,00027352	0,00082004	8,686E-06	0,00029522	0,00029522	0,00029522	7,8166E-05	6,0797E-05	0,0020364

lg(x+1)	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Borg09	6,0797E-05	0,0002605	0,00078103	8,686E-06	0,00031692	0,00010422	0,00027786	7,3824E-05	5,2112E-05	0,00238208
Borg10	0,00010856	0,00046445	0,0009414	4,343E-06	0,00036899	0,00076369	0,00042974	0,000165	7,8166E-05	0,00302947
Borg11	5,6455E-05	0,00197588	0,000729	4,343E-06	0,00030824	0,00013461	0,00030824	0,00010422	6,5139E-05	0,00294321
Borg12	5,6455E-05	0,00E+00	0,00075935	4,343E-06	0,00029956	0,00036465	0,00023446	3,4742E-05	0,00004777	0,00177697
Borg13	0,00004777	0,00019105	0,00067264	4,343E-06	0,00031258	0,00014329	0,00029956	7,3824E-05	3,9085E-05	0,0019067
Borg14	5,6455E-05	0,00023012	0,00069432	4,343E-06	0,00031692	0,00032994	0,00030824	7,3824E-05	3,9085E-05	0,00207963
Borg15	6,0797E-05	0,00038201	0,00081137	4,343E-06	0,00030824	0,0001129	0,00029956	9,5534E-05	4,3427E-05	0,00242527
Borg16	6,0797E-05	0,00022143	0,00076802	4,343E-06	0,0003039	0,00039937	0,00026484	5,6455E-05	0,00004777	0,00207963
Borg17	5,2112E-05	0,00E+00	0,00098906	4,343E-06	0,00031258	0,00075935	0,00023012	3,4742E-05	3,9085E-05	0,00220927
Borg18	6,0797E-05	0,00024748	0,00095007	1,7371E-05	0,00029522	0,00032994	0,00025182	7,8166E-05	4,3427E-05	0,00337435
Borg19	6,0797E-05	0,00029522	0,00108005	1,7371E-05	0,00029522	0,00023012	0,00029088	7,8166E-05	4,3427E-05	0,00207963
Borg20	6,9482E-05	0,00018237	0,0009154	1,3029E-05	0,00028654	0,0002605	0,0002605	6,0797E-05	6,9482E-05	0,00207963
Wipp01	6,9482E-05	9,5534E-05	0,00074635	4,343E-06	0,00033862	0,00044709	0,00027786	6,5139E-05	4,3427E-05	0,00143081
Wipp02	6,5139E-05	0,00029088	0,00078536	4,343E-06	0,0003039	7,8166E-05	0,00029088	7,8166E-05	4,3427E-05	0,0020364
Wipp03	6,0797E-05	9,1192E-05	0,00083305	8,686E-06	0,00030824	5,6455E-05	0,00028654	7,3824E-05	4,3427E-05	0,00186346
Wipp04	6,0797E-05	0,00020407	0,00141783	1,3029E-05	0,00029088	9,9876E-05	0,00028654	9,5534E-05	4,3427E-05	0,00272747
Wipp05	6,0797E-05	0,00E+00	0,00130526	8,686E-06	0,0002822	5,2112E-05	0,00027786	5,6455E-05	0,00004777	0,00220927
Wipp06	5,6455E-05	0,00015632	0,0011277	8,686E-06	0,0002822	7,3824E-05	0,0002822	7,3824E-05	4,3427E-05	0,0030726
Wipp07	6,9482E-05	0,00039503	0,00153902	1,3029E-05	0,00030824	0,00018671	0,00032126	6,5139E-05	5,6455E-05	0,00161691
Wipp08	9,5534E-05	0,00046011	0,00120999	1,3029E-05	0,00029956	0,00010856	0,00029956	0,0001129	0,00004777	0,00185049
Wipp09	7,8166E-05	0,00046879	0,00244686	1,7371E-05	0,0002822	5,2112E-05	0,00027786	9,5534E-05	6,9482E-05	0,00288713
Wipp10	9,9876E-05	0,00037333	0,00106272	1,7371E-05	0,00029088	0,00018237	0,0002822	8,2508E-05	5,2112E-05	0,00185049
Wipp11	6,5139E-05	0,00015632	0,00125763	1,3029E-05	0,00033428	0,00019539	0,0002822	7,8166E-05	3,9085E-05	0,00194994
Wipp12	5,2112E-05	0,00023012	0,00128794	1,3029E-05	0,00033428	0,00031258	0,00028654	0,00008685	4,3427E-05	0,00182022
Wipp13	6,0797E-05	0,00039503	0,0012533	1,3029E-05	0,00033862	0,00024748	0,00031258	0,00012593	4,3427E-05	0,00212285
Wipp14	6,5139E-05	0,00056422	0,00102806	1,3029E-05	0,0003256	0,00020841	0,00029956	0,0001129	3,4742E-05	0,00259798

lg(x+1)	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Wipp15	6,9482E-05	0,00032994	0,00109305	1,3029E-05	0,00032994	0,00013895	0,00036899	7,3824E-05	4,3427E-05	0,00242527
Witt01	8,2508E-05	0,00054253	0,00059458	4,343E-06	0,00033862	0,000165	0,00127062	0,00018671	6,5139E-05	0,00246845
Witt02	8,2508E-05	0,00088939	0,000716	8,686E-06	0,00031692	0,00015632	0,00031692	0,00019973	0,00004777	0,00216606
Witt03	8,2508E-05	0,00059024	0,00093273	8,686E-06	0,00031692	0,00010856	0,00036899	0,00018671	0,00004777	0,00328816
Witt04	9,1192E-05	0,00082438	0,00169045	1,3029E-05	0,00031692	0,00022143	0,00031692	0,00020407	5,2112E-05	0,00290007
Witt05	9,5534E-05	0,00095007	0,00131825	8,686E-06	0,00031258	0,00011724	0,00037767	0,0002605	0,00004777	0,00354669
Witt06	0,00008685	0,00088939	0,00173804	8,686E-06	0,00030824	0,00013461	0,00033428	0,00023446	5,6455E-05	0,00440736
Witt07	0,00010856	0,00067697	0,00152171	1,7371E-05	0,00032126	7,3824E-05	0,00034296	0,00018671	5,6455E-05	0,00225248
Witt08	7,8166E-05	0,00032994	0,00122732	1,7371E-05	0,00029956	4,3427E-05	0,00026484	7,8166E-05	0,00004777	0,00290007
Witt09	0,00010422	0,00089373	0,00143947	1,7371E-05	0,0003039	9,9876E-05	0,00035164	0,00024748	5,2112E-05	0,00282672
Witt10	0,00008685	0,00077669	0,00107572	1,7371E-05	0,00029522	0,00014329	0,00030824	0,00020841	0,00004777	0,00271453
Witt11	9,9876E-05	0,00108871	0,00110171	2,1714E-05	0,00035164	0,00018237	0,00033862	0,00027786	5,6455E-05	0,00294321
Witt12	0,00012159	0,0007897	0,00132691	2,6057E-05	0,00031258	0,00013461	0,00031258	0,00020841	4,3427E-05	0,00337435
Witt13	0,00008685	0,00084172	0,00110171	1,7371E-05	0,00036899	0,00013027	0,00036032	0,00023446	4,3427E-05	0,00216606
Witt14	7,8166E-05	0,00038635	0,00102373	1,3029E-05	0,0003256	0,00025616	0,00045577	0,00010422	4,3427E-05	0,0020364
Witt15	7,3824E-05	0,00102806	0,0009284	1,3029E-05	0,00039503	0,00023446	0,00057289	0,00023012	5,6455E-05	0,00290007
Grund01	6,0797E-05	0,00039069	0,00082438	2,6057E-05	0,00057289	0,00064662	0,00044709	0,00013461	4,3427E-05	0,00290007
Grund02	5,6455E-05	0,00013895	0,00082438	2,1714E-05	0,00049048	0,00093706	0,0002822	0,00008685	4,3427E-05	0,00272747
Grund03	6,9482E-05	0,00067264	0,00092406	1,7371E-05	0,0003256	0,00017368	0,00054687	0,00020841	5,2112E-05	0,00264115
Grund04	5,6455E-05	6,5139E-05	0,00103239	1,7371E-05	0,00032994	0,00043842	0,00023012	5,6455E-05	3,9085E-05	0,00194994
Grund05	6,0797E-05	0,00029522	0,00087639	1,7371E-05	0,00035598	0,00052518	0,00029956	0,00010422	8,2508E-05	0,00255481

D2.2 Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb

lg(x+1)	Ba	Cr	Ni	Rb	Sr	V	Eu	Sm	Yb
Arnh01	2,3321E-05	2,0542E-05	2,823E-06	1,563E-06	1,303E-06	0,00000139	2,61E-07	0,00000317	3,04E-07
Arnh02	2,7099E-05	3,9389E-05	8,252E-06	1,781E-06	1,824E-06	2,823E-06	1,74E-07	2,041E-06	2,61E-07
Arnh03	3,1181E-05	1,7285E-05	1,4722E-05	1,303E-06	3,257E-06	2,258E-06	3,91E-07	4,647E-06	3,91E-07
Arnh04	2,6231E-05	1,8631E-05	1,6459E-05	0,00000152	1,867E-06	1,867E-06	4,34E-07	5,429E-06	3,04E-07
Arnh05	3,2093E-05	2,3625E-05	1,2464E-05	1,259E-06	2,866E-06	1,086E-06	4,78E-07	6,167E-06	3,91E-07
Arnh06	2,5927E-05	3,4699E-05	1,7936E-05	1,694E-06	2,041E-06	1,042E-06	3,04E-07	3,648E-06	2,17E-07
Arnh07	4,2385E-05	4,3036E-05	1,0076E-05	1,563E-06	6,167E-06	1,781E-06	5,21E-07	6,428E-06	0,00E+00
Arnh08	2,3582E-05	2,6795E-05	1,3202E-05	0,00E+00	3,909E-06	0,00E+00	7,82E-07	1,0076E-05	2,17E-07
Arnh09	2,4016E-05	5,9929E-05	7,079E-06	0,00E+00	3,735E-06	1,433E-06	6,08E-07	7,426E-06	2,17E-07
Arnh10	2,4233E-05	3,3874E-05	1,3897E-05	0,00E+00	2,649E-06	0,00E+00	7,82E-07	9,772E-06	3,04E-07
Arnh11	3,1442E-05	6,558E-06	0,00E+00	2,128E-06	4,126E-06	1,737E-06	7,82E-07	1,0162E-05	3,91E-07
Arnh12	3,2788E-05	3,5003E-05	2,1323E-05	1,563E-06	0,00000317	1,737E-06	7,82E-07	1,0119E-05	3,47E-07
Arnh13	2,7924E-05	1,6416E-05	0,00E+00	1,259E-06	3,474E-06	2,432E-06	6,51E-07	8,295E-06	2,61E-07
Arnh14	0,00002293	1,1639E-05	2,0889E-05	1,607E-06	3,561E-06	0,00000165	7,38E-07	9,294E-06	3,91E-07
Arnh15	2,8228E-05	1,0597E-05	0,00E+00	0,00000139	3,387E-06	2,258E-06	6,95E-07	8,773E-06	2,61E-07
Borg01	1,8978E-05	2,6448E-05	1,173E-06	1,563E-06	1,086E-06	7,38E-07	1,74E-07	2,128E-06	1,74E-07
Borg02	1,3897E-05	5,4153E-05	1,216E-06	1,346E-06	1,954E-06	1,042E-06	1,74E-07	1,781E-06	6,51E-07
Borg03	1,7632E-05	2,7056E-05	7,948E-06	1,303E-06	9,99E-07	1,563E-06	1,30E-07	1,346E-06	8,70E-08
Borg04	1,4375E-05	3,7999E-05	0,00000773	0,00000152	1,042E-06	1,607E-06	2,17E-07	2,345E-06	2,17E-07
Borg05	1,6025E-05	5,3849E-05	1,2811E-05	1,737E-06	1,086E-06	0,00E+00	2,17E-07	2,649E-06	1,30E-07
Borg06	1,1639E-05	3,9693E-05	8,338E-06	0,00E+00	1,129E-06	0,00E+00	1,30E-07	1,433E-06	2,17E-07
Borg07	2,1193E-05	4,9333E-05	0,00E+00	1,607E-06	2,389E-06	0,00E+00	1,74E-07	1,824E-06	1,30E-07
Borg08	1,2725E-05	4,3688E-05	0,00E+00	1,694E-06	2,345E-06	8,69E-07	1,74E-07	1,998E-06	1,74E-07
Borg09	1,4505E-05	3,5263E-05	0,00000469	1,303E-06	1,867E-06	2,866E-06	2,61E-07	3,083E-06	2,61E-07
Borg10	7,079E-06	3,127E-06	0,00E+00	0,00000165	2,432E-06	2,389E-06	1,74E-07	1,998E-06	1,30E-07

lg(x+1)	Ba	Cr	Ni	Rb	Sr	V	Eu	Sm	Yb
Borg11	1,0988E-05	0,00003674	0,00000899	1,607E-06	1,129E-06	1,607E-06	2,17E-07	2,562E-06	2,17E-07
Borg12	1,7371E-05	4,6901E-05	7,861E-06	1,259E-06	1,303E-06	2,693E-06	1,74E-07	2,215E-06	1,74E-07
Borg13	1,9239E-05	3,6262E-05	8,165E-06	1,433E-06	1,216E-06	0,00E+00	1,30E-07	0,00000152	1,74E-07
Borg14	1,3767E-05	2,6839E-05	5,776E-06	1,303E-06	0,00000152	0,00E+00	2,17E-07	2,606E-06	2,61E-07
Borg15	1,6633E-05	5,3415E-05	1,0814E-05	0,00000165	1,173E-06	2,128E-06	2,17E-07	2,432E-06	4,34E-07
Borg16	1,1726E-05	6,0319E-05	9,164E-06	1,607E-06	1,737E-06	2,258E-06	2,17E-07	2,432E-06	2,17E-07
Borg17	1,0293E-05	6,0927E-05	1,2725E-05	1,433E-06	1,129E-06	2,649E-06	1,74E-07	2,215E-06	4,30E-08
Borg18	1,3202E-05	5,8756E-05	0,00001355	0,00E+00	1,259E-06	2,302E-06	2,61E-07	3,301E-06	1,30E-07
Borg19	1,3072E-05	3,9172E-05	1,2638E-05	0,00E+00	1,867E-06	2,258E-06	3,47E-07	4,299E-06	1,30E-07
Borg20	1,5547E-05	2,9661E-05	1,607E-06	1,694E-06	4,603E-06	0,00E+00	4,34E-07	5,385E-06	2,61E-07
Wipp01	1,4288E-05	5,3154E-05	2,171E-06	0,00000165	1,477E-06	2,171E-06	1,30E-07	0,00000165	1,30E-07
Wipp02	1,4549E-05	6,0276E-05	1,3984E-05	1,737E-06	8,69E-07	1,911E-06	1,30E-07	1,694E-06	1,30E-07
Wipp03	0,0000119	6,9091E-05	1,4722E-05	1,346E-06	1,042E-06	2,041E-06	1,74E-07	1,737E-06	8,70E-08
Wipp04	1,2898E-05	6,5356E-05	2,9965E-05	0,00E+00	6,08E-07	2,128E-06	3,04E-07	3,865E-06	1,30E-07
Wipp05	1,2204E-05	4,0214E-05	1,9499E-05	1,433E-06	1,042E-06	0,00E+00	3,47E-07	4,082E-06	1,74E-07
Wipp06	0,00001672	2,8445E-05	1,6416E-05	0,00E+00	9,55E-07	2,128E-06	2,61E-07	3,214E-06	2,17E-07
Wipp07	0,00E+00	2,5666E-05	1,6373E-05	0,00E+00	2,823E-06	3,648E-06	4,78E-07	0,00000608	1,30E-07
Wipp08	1,4679E-05	6,2925E-05	1,8631E-05	0,00E+00	4,647E-06	8,69E-07	4,34E-07	5,125E-06	0,00E+00
Wipp09	0,00E+00	5,3415E-05	2,4928E-05	1,433E-06	2,041E-06	0,0000076	4,34E-07	5,168E-06	0,00E+00
Wipp10	1,3637E-05	6,6703E-05	0,00002432	1,477E-06	0,00000456	0,00000152	4,34E-07	5,602E-06	0,00E+00
Wipp11	1,1769E-05	3,2441E-05	2,4233E-05	1,303E-06	1,346E-06	2,519E-06	3,91E-07	5,125E-06	4,30E-08
Wipp12	1,2377E-05	4,0431E-05	0,00002597	0,00E+00	9,99E-07	2,997E-06	3,04E-07	3,822E-06	1,74E-07
Wipp13	1,2421E-05	3,7999E-05	2,4754E-05	0,00000152	1,563E-06	2,041E-06	3,04E-07	3,605E-06	2,17E-07
Wipp14	1,3506E-05	0,00003205	2,1671E-05	0,00E+00	1,781E-06	2,562E-06	1,74E-07	2,215E-06	4,30E-08
Wipp15	0,00001381	5,7019E-05	0,00002749	0,00E+00	2,693E-06	1,824E-06	3,04E-07	3,605E-06	4,30E-08

lg(x+1)	Ba	Cr	Ni	Rb	Sr	V	Eu	Sm	Yb
Witt01	2,1714E-05	2,5449E-05	0,00E+00	1,563E-06	1,042E-06	1,433E-06	2,17E-07	2,606E-06	3,04E-07
Witt02	1,6894E-05	6,1883E-05	7,774E-06	1,824E-06	1,607E-06	1,998E-06	2,17E-07	2,736E-06	2,17E-07
Witt03	1,5461E-05	8,7805E-05	2,0021E-05	2,041E-06	8,25E-07	2,128E-06	2,17E-07	2,649E-06	2,61E-07
Witt04	1,8674E-05	2,3017E-05	1,9543E-05	2,171E-06	1,303E-06	4,343E-06	1,74E-07	1,911E-06	0,00E+00
Witt05	0,00001837	2,9878E-05	2,0151E-05	1,781E-06	1,998E-06	0,00000152	3,47E-07	4,126E-06	2,61E-07
Witt06	1,8066E-05	5,5326E-05	2,2018E-05	0,00000152	1,911E-06	2,779E-06	3,04E-07	3,691E-06	2,17E-07
Witt07	0,00E+00	5,0158E-05	2,606E-06	0,00E+00	4,126E-06	2,606E-06	6,08E-07	7,817E-06	2,17E-07
Witt08	0,00E+00	0,00011959	4,6424E-05	0,00E+00	1,346E-06	2,085E-06	3,91E-07	0,00000469	0,00E+00
Witt09	1,4245E-05	0,00010604	3,7348E-05	1,694E-06	3,605E-06	1,433E-06	3,04E-07	3,605E-06	0,00E+00
Witt10	1,7632E-05	7,3042E-05	2,8011E-05	1,563E-06	3,214E-06	1,433E-06	5,65E-07	7,166E-06	4,30E-08
Witt11	1,7675E-05	2,5319E-05	2,2496E-05	1,867E-06	2,736E-06	3,257E-06	3,47E-07	4,517E-06	8,70E-08
Witt12	2,0672E-05	0,00011277	3,7131E-05	1,563E-06	5,255E-06	6,51E-07	8,69E-07	1,1031E-05	2,17E-07
Witt13	1,7589E-05	6,5313E-05	2,8141E-05	1,042E-06	2,475E-06	0,00000291	4,34E-07	5,602E-06	1,74E-07
Witt14	1,3897E-05	6,3793E-05	2,9314E-05	1,911E-06	1,911E-06	0,00E+00	3,91E-07	4,777E-06	8,70E-08
Witt15	1,5243E-05	2,6448E-05	2,2974E-05	2,128E-06	3,214E-06	2,389E-06	4,34E-07	5,429E-06	0,00E+00
Grund01	2,4146E-05	0,00004612	1,1726E-05	1,303E-06	6,95E-07	2,215E-06	6,08E-07	7,687E-06	0,00E+00
Grund02	1,2551E-05	4,6597E-05	8,946E-06	0,00E+00	1,086E-06	0,00E+00	5,65E-07	0,00000734	0,00E+00
Grund03	1,3159E-05	2,3321E-05	0,00000747	0,00E+00	5,21E-07	2,562E-06	5,65E-07	7,209E-06	0,00E+00
Grund04	0,00E+00	5,3111E-05	1,1509E-05	0,00000139	5,65E-07	2,128E-06	3,91E-07	4,821E-06	0,00E+00
Grund05	1,6329E-05	4,4643E-05	8,425E-06	0,00E+00	1,998E-06	0,00E+00	6,08E-07	7,774E-06	7,82E-07

D3 Eigene $\delta^{18}O$-Werte und von Cherts aus der Literatur

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
Mu 21	24,1		Miozän	23,5-5,3	14			Chico Martinez Creek, Monterey Shale, Cf	Murata et al. 1982
Mu 27A	23,6		Miozän	23,5-5,3	14			Chico Martinez Creek, Monterey Shale, Cf	Murata et al. 1983
Mu 19	27,6		Miozän	23,5-5,3	14			Taft Area, Monterey Shale, California	Murata et al. 1987
Mu 146	27,1		Miozän	23,5-5,3	14			Taft Area, Monterey Shale, California	Murata et al. 1988
K 353	35,2	-86	Eozän	55,8-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974/76
K 354	35,2	-79	Eozän	55,8-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974/76
KE 368	32,6		Eozän	55,8-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974
KE 368B	32,5		Eozän	55,8-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974
KE 343	38,9		Eozän	55,8-33,9	45	T		Horizont Guyot	Knauth/Epstein 1974
167-33-1(113-115)	34,6	-92	Eozän	55,5-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-34cc	34,8	-86	Eozän	55,5-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-36cc	34,4		Eozän	55,5-33,9	45	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
P-53	33,2		Eozän	55,8-33,9	45			So. Israel chert	Karhu/Epstein 1986
P-89	33,1		Eozän	55,8-33,9	45			So. Israel chert	Karhu/Epstein 1986
P-90	33,1		Eozän	55,8-33,9	45			So. Israel chert	Karhu/Epstein 1986
P-84	21,2		Eozän	55,8-33,9	45			Turritella chert, Wyoming	Karhu/Epstein 1986
167-38cc	34,8		Paläozän	65,5-55,8	61	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-40cc	34,7		Paläozän	65,5-55,8	61	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
K 70	27,5	-83	Kreide	145,5-65,5	105			Aguja Fm. Texas	Knauth/Epstein 1976
K 262	32,7	-68	Kreide	145,5-65,5	105			Fredericksburg LS Texas	Knauth/Epstein 1976
K 263	32,6	-65	Kreide	145,5-65,5	105			Fredericksburg LS Texas	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
K 266	31,6	-73	Kreide	145,5-65,5	105			Frederickburg LS Texas	Knauth/Epstein 1976
K 283	33,5	-79	Kreide	145,5-65,5	105			Dover-Flint, England	Knauth/Epstein 1976
K 356	35,8	-79	Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974/76
165A-16ccA	34,4		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
166-27-2(136-138)B	30,1	-100	Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-42-1(130-133)	35,7		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-44-1(109-112)	35,8	-84	Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-50-cc	35,3		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-60- 2(80-83)	35,1		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-61-2(0-3)	34,1		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-65-1(70-73)	33,3	-84	Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-68-2(100-102)	34,6		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-70-3(64-68)	34		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-71-2(42-44)	33,3		Kreide	145,5-65,5	105	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
P-92	32,9		Kreide	145,5-65,5	105			So. Israel chert	Karhu/Epstein 1986
KF 94 Fragment	34,6	-98	Kreide	145,5-65,5	105		F	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
KS 13 Fragment	31,5	-98	Kreide	145,5-65,5	105		F	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
MY 54 Fragment	31,5	-92	Kreide	145,5-65,5	105		F	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
SE 166 Fragment	29,7	-115	Kreide	145,5-65,5	105		F	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
3953 Fragment	30,5	-76	Kreide	145,5-65,5	105		F	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
8289 Fragment	29,8	-113	Kreide	145,5-65,5	105		F	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
AV 83A	30,5		Kreide	145,4-65,5	105			Mishash Fm., Israel	Vengosh et al. 1987
AV 128	30,2		Kreide	145,5-65,5	105			Mishash Fm., Israel	Vengosh et al. 1987
AV 155	31		Kreide	145,5-65,5	105			Mishash Fm., Israel	Vengosh et al. 1987
AV 87A(M)	31,5		Kreide	145,5-65,5	105			Mishash Fm., Israel	Vengosh et al. 1987
AV 145	30,7		Kreide	145,5-65,5	105			Mishash Fm., Israel	Vengosh et al. 1987
100-1-5(0-1)	30,9	-83	Kreide/Oberjura	150,8-136,4	144	T		JOIDES DSPD	Vengosh et al. 1987
99A-10-2	31,7	-89	Oberjura	161,2-145,5	153	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
50.0-2-1(63-65)	36,2		Oberjura	161,2-145,5	153	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
50.0-2-1(122-124)	35,7	-83	Oberjura	161,2-145,5	153	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
50.0-2-1(135-138)A	34,7		Oberjura	161,2-145,5	153	T		JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
Arnh. 1	32,6		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Arnhofen, Bayern	Bertsch 2013
Arnh. 2	31,8		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Arnhofen, Bayern	Bertsch 2013
Arnh. 3	30,7		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Arnhofen, Bayern	Bertsch 2013
Arnh. 4	32		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Arnhofen, Bayern	Bertsch 2013
Arnh. 5	32,5		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Arnhofen, Bayern	Bertsch 2013
Arnh. 6	31,9		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Arnhofen, Bayern	Bertsch 2013

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
Borg. 1	32		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 2	31,9		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 3	31,4		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 8	32,4		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 9	32		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 10	31,5		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 12	32,2		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 13	32,7		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 14	32		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 15	32		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Borg. 16	32,2		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaubeuren, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Wipp. 1	31,5		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaustein, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Wipp. 2	31,6		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaustein, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Wipp. 4	30,7		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaustein, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Wipp. 5	30,6		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Blaustein, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Witt. 2	30,5		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Bad Urach, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Witt. 3	29,9		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Bad Urach, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Witt. 4	28,5		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Bad Urach, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Witt. 5	30,6		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Bad Urach, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Witt. 6	28,9		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Bad Urach, Baden-Württemberg	Bertsch 2013
Gl/8	31,4		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski et al. 2006
Gl/9	31,2		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski et al. 2006
Il/4	33		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski et al. 2006
Il/5	29,4		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski et al. 2006
M/7	29,1		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski et al. 2006

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
M/6	27,9		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski et al. 2006
F/1	31		Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Migaszewski er al. 2006
O 1a	32,1	-59,2	Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Sharp et al. 2002
O1b	32,1	-107,4	Oberjura	161,2-145,5	153		F	Holy Cross Mountains, Polen	Sharp et al. 2002
Hung. 1	27,3		Trias	251-199,6	225			Balaton-Hochland, Ungarn	Bertsch 2013
Hung. 2	32,3		Trias	251-199,6	225			Buda-Berge, Ungarn	Bertsch 2013
Hung. 4	32,9		Trias	251-199,6	225			Buda-Berge, Ungarn	Bertsch 2013
Hung. 5	31,7		Trias	251-199,6	225			Buda-Berge, Ungarn	Bertsch 2013
K 15	27,4	-49	Trias	251-199,6	225			Chinle Fm., Utah	Knauth/Epstein 1976; Robert 1988
K 248	17,8	-96	Trias	251-199,6	225			Prida Fm., Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 252	23,7	-83	Trias	251-199,6	225			Excelsior Fm., Minna, Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 256	23,7		Trias	251-199,6	225			Trias, Nordamerika	Knauth/Epstein 1976; Robert 1988
P-41	27,4		Trias	251-199,6	225			Zion Nat. Park, Utah	Karhu/Epstein 1986
K 28	29,9	-75	Perm	299-251	275			Kaibab LS Arizona	Knauth/Epstein 1976
P-31	30,1		Perm	299-251	275			Vinton Canyon, Texas	Karhu/Epstein 1986
P-42	29,9		Perm	299-251	275			Grand Canyon National Park, Arizona	Karhu/Epstein 1986
K 9	33,2	-62	Karbon/Penns.	325-299	312			Lee Canyon, Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 22	29,9	-81	Karbon/Penns.	325-299	312			Supai Fm., Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 49	31,4		Karbon/Penns.	325-299	312			Pennsylvanikum, Nordamerika	Knauth/Epstein 1976; Robert 1988
P-27	33,2		Karbon/Penns.	325-299	312			Atoka Fm., Nevada	Karhu/Epstein 1986
P-30	31,4		Karbon/Penns.	325-299	312			Atoka Fm., La Tuna, Texas	Karhu/Epstein 1986
P-64	33,1		Karbon/Penns.	325-299	312			Dimple ls., Texas	Karhu/Epstein 1986

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
K 8	28,6	-85	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Monte Cristo LS, Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 24	29,3	-58	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Red Wall LS, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 25	28,9	-82	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Red Wall LS, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 41	31,3	-63	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Lake Valley Fm., New Mexico	Knauth/Epstein 1976
K 59	29,1	-38	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Helms Fm., Texas	Knauth/Epstein 1976
K 120	29,2	-34	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Boone Chert, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 121	28,3	-29	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Boone Chert, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 128	29,6	-50	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 136	32	-53	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Elsey Fm., Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 138	31,4	-52	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 154	33,8	-33	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			St. Louis LS, Illinois	Knauth/Epstein 1976
K 156	31,8	-52	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 157	31,4	-52	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 167	33,4	-62	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 169	30,7	-58	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 171	32,5	-60	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
P-56	29,2		Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Monte Cristo LS, Nevada	Karhu/Epstein 1986
P-65	34,3		Karbon/Mississip.	359,2-325	342			St. Louis LS, Illinois	Karhu/Epstein 1986
K 111	29	-58	Devon	416-359,2	388			Arkansas Novaculite, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 139	30,1	-37	Devon	416-359,2	388			Bailey LS, Illinois	Knauth/Epstein 1976
K 268	29,1	-52	Devon	416-359,2	388			Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 272	31,7	-67	Devon	416-359,2	388			Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 152	32	-56	Devon	416-359,2	388			Clear Creek Fm., Illinois	Knauth/Epstein 1976
K 270a	28,6	-68	Devon	416-359,2	388			Green Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 270b	29,8	-61	Devon	416-359,2	388			Black Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
C 123	28,4		Devon	416-359,2	388			Caballos Fm., Texas	McBride/Perry 1967
C 126	29,9		Devon	416-359,2	388			Caballos Fm., Texas	McBride/Perry 1968
St 281	30	-60	Silur	443,7-416	430			Tennessee	Knauth/Epstein 1976
K 6	25,5	-89	Ordovizium	488,3-443,7	466			Pogonip Fm., SW Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 244	26,9	-103	Ordovizium	488,3-443,7	466			Pogonip Fm., SW Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 76	29,7	-53	Ordovizium	488,3-443,7	466			Maravillis Chert, Marathon, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 81	26	-46	Ordovizium	488,3-443,7	466			Fort Pena Chert, Marathon, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 93	25,7	-79	Ordovizium	488,3-443,7	466			Tanyard Fm., Lonhorn Cavern, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 95	29,8	-50	Ordovizium	488,3-443,7	466			Viola LS Arbuckle Mtns, Oklahoma	Knauth/Epstein 1976
K 124	27,8	-44	Ordovizium	488,3-443,7	466			Cotter Dolomite, Busch, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 158	28	-31	Ordovizium	488,3-443,7	466			Gasconade Fm., Lawrenceton, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 260	17	-115	Ordovizium	488,3-443,7	466			Palmetto Fm., Magruder Mt., Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 274	26,9	-45	Ordovizium	488,3-443,7	466			Ft. Pena Chert, Marathon, Texas	Knauth/Epstein 1976
P-44	29,5		Ordovizium	488,3-443,7	466			Maravillis Chert, Marathon, Texas	Karhu/Epstein 1986
P-45	29,1		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Karhu/Epstein 1986
P-46	29,6		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Karhu/Epstein 1986
D 28	27,3		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 54	26,3		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 68	26,9		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 75	26,2		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 85	26,8		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
B 12	25,1		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
B 20	24,2		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
RK 6	28,4		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
RK 8	28,8		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
N 4	26,8		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 36	25,8		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
H-1	27,5		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
H 350	27,3		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 30	25,4		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 40	26,2		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 48	25,8		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
D 60	23,7		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
C-5	25,5		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
C 10	25,4		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
C-3	25,9		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
M-2	24,9		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 21	21		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 22	24,9		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 26	23,4		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
O-1	25,2		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 8	28		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 17	26		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
N 20	24,4		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
H-A2	27		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
H 480	27,9		Ordovizium	488,3-443,7	466			Arbuckle Mtns., Oklahoma	Gao/Land 1991
K 1	26,7	-60	Kambrium	542-488,3	515			Nopah Fm., Nopah Mtns, California	Knauth/Epstein 1976
K 3	26	-72	Kambrium	542-488,3	515			Nopah Fm., Nopah Mtns, California	Knauth/Epstein 1976
K 160	28,3	-50	Kambrium	542-488,3	515			Potosi Fm., Lawrenceton, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 161	24,1	-68	Kambrium	542-488,3	515			Potosi Fm., Lawrenceton, Missouri	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
K 221	26,4	-75	Kambrium	542-488,3	515			St. Charles LS, Bear Lake, Idaho	Knauth/Epstein 1976
K 259	20,1	-105	Kambrium	542-488,3	515			Emigrant LS Magruder Mt., Nevada	Knauth/Epstein 1976
L 325	27,8	-51	Kambrium	542-488,3	515			Arbuckle LS, Arbuckle Mtns, Oklahoma	Knauth/Epstein 1976
P-39	26		Kambrium	542-488,3	515			Nopah Fm., Nopah Mtns, California	Karhu/Epstein 1986
P-60	25,2		Kambrium	542-488,3	515			Bircher, Utah	Karhu/Epstein 1986
P-47	26		Kambrium	542-488,3	515			St. Charles LS, Bear Lake, Idaho	Karhu/Epstein 1986
P-50	20,1		Kambrium	542-488,3	515			Emigrant LS Magruder Mt., Nevada	Karhu/Epstein 1986
C 99	20,5		Neoproterozoikum	1000-542	771			Toresian, Australien	Robert 1988
C 43	19,2		Neoproterozoikum	1000-542	771			Boorthana, Afrika	Robert 1988
P-154	25,4		Neoproterozoikum	1000-542	771			Rysso Fm., Svalbard, Nordanstlandet	Karhu/Epstein 1986
P-157	26,6		Neoproterozoikum	1000-542	771			Rysso Fm., Svalbard, Nordanstlandet	Karhu/Epstein 1986
P-85	27,7		Neoproterozoikum	1000-542	771			Bitter Springs Fm., Ross River, Australia	Karhu/Epstein 1986
P-59	17,6		Neoproterozoikum	1000-542	771			Bangewall, Australia	Karhu/Epstein 1986
P-109	21,5		Neoproterozoikum	1000-542	771			Glacier National Park, Montana	Karhu/Epstein 1986
K 194	21		Neoproterozoikum	1000-542	771			Belt Series, Nordamerika	Robert 1988
C 13	17,6		Neoproterozoikum	1000-542	771			Bangemali, Australien	Robert 1988
B 16-67	26,6		Neoproterozoikum	1000-542	771			Bitter Springs Fm., Australia	Barghorn 1966; Perry 1967
K 26	30,8	-60	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Bass LS, Grand Canyon, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 31	28,1	-51	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal L, Roosevelt Dam, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 34	29,5	-85	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal L, Roosevelt Dam, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 188	19,1	-68	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Belt Supergroup, Siey LS, Montana	Knauth/Epstein 1976
K 278	17,6	-80	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Beck Spring Dolomite, Death Valley, CA	Knauth/Epstein 1976; Robert 1988
C 31	20,6		Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Beck Spring, Nordamerika	Robert 1988
K 500	23,3		Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Gunflint, Nordamerika	Robert 1988

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
P-51	20,3		Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Beck Spring Dolomite, California	Karhu/Epstein 1986
P-87	17,6		Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Beck Spring Dolomite, California	Karhu/Epstein 1986
C 58	21,8		Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Gunflint, Nordamerika	Robert 1988
KK 89-7	28,6	-57	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-16b	27,5	-71	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-16a	27,9	-63	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-19m	27	-69	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-19a	29	-50	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-24	29,2	-50	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-28a	27,2	-75	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-43s	19,5	-100	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-43w	29,1	-56	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-2	29	-64	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-8	27,1	-72	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-8c	32,3	-54	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-10	31,6	-59	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44	25,8	-60	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44e	27	-73	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44m	19,7	-99	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44w	27,8	-72	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-13	20,4	-85	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-9	23,8	-73	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-1	26,7	-59	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-20	32,3	-73	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
Sch 300	23,6	-73	Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Chert, Schreiber`s Beach, Ontario	Knauth/Epstein 1976
Sch 304	14,9	-56	Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Fig Tree Chert, S-Afrika	Knauth/Epstein 1976
B 13354	24,1		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Wittenoom Dolomite Iron Fm., Australien	Becker/Clayton 1976
B 13357	20,6		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Wittenoom Dolomite Iron Fm., Australien	Becker/Clayton 1976
B 13359	21,5		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Wittenoom Dolomite Iron Fm., Australien	Becker/Clayton 1976
RF 452	16,5		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Amalia, Austalien	Robert 1988
P-114	16,5		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Amelia Dolomite, McArthur Basin, Austalien	Karhu/Epstein 1986
P-106	23,1		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron Fm., Kakabeka Falls, Kanada	Karhu/Epstein 1986
P-115	20,8		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Brockman Iron Fm., W-Australien	Karhu/Epstein 1986
P-129	17,6		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Marra Mamba Fm. , W-Australien	Karhu/Epstein 1986
PPRG 134	19,8		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint	PPRG; Robert et al. 1992
K 500	18,9		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint	Knauth; Robert et al. 1992
K 559	11,9		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint	Knauth; Robert et al. 1992
M 1c-06/29/84	23,8		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron Fm., Kanada	Marin et al. 2010
M 1a-06/29/84	23,9		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron Fm., Kanada	Marin et al. 2010
M 3-06/30/84	23,3		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron Fm., Kanada	Marin et al. 2010
M 4-06/30/84	23,5		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron Fm., Kanada	Marin et al. 2010
M 5-06/28/84	21,7		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron Fm., Kanada	Marin et al. 2010
P 9-67	20,7		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron-Fm., Ontario	Perry 1967

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
P 3-67	22,7		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Gunflint Iron-Fm., Ontario	Perry 1967
P 37-66	22,1		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Biwabik Iron-Fm., Minnesota	Perry 1967
P 1-66	19,6		Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Biwabik Iron-Fm., Minnesota	Perry 1967
RF 025	12,1		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Tumbiana, Australien	Karhu/Epstein 1986; Robert 1988
P-123	11,9		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Tumbiana Fm., Australien	Karhu/Epstein 1986
P-113	13,1		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Rietgat Fm., Ventersdorp Basin, Afrika	Karhu/Epstein 1986
P-125	20		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Manjieri Fm., Zimbabwe, Afrika	Karhu/Epstein 1986
P-126	18,3		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Manjieri Fm., Zimbabwe, Afrika	Karhu/Epstein 1986
P-127	18,3		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Manjieri Fm., Zimbabwe, Afrika	Karhu/Epstein 1986
P-128	12,9		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Manjieri Fm., Zimbabwe, Afrika	Karhu/Epstein 1986
RF 278	13,1		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Rietgat, Afrika	Robert 1988
RF 224	20,1		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Manjieri, Afrika	Robert 1988
PPRG 278	12		Neoarchaikum	2800-2500	2750			Rietgat	PPRG; Robert et al. 1992
P-52	19,5		Mesoarchaikum	3200-2800	3000			Schreiber Beach, Ontario, Kanada	Karhu/Epstein 1986
P-122	11,4		Mesoarchaikum	3200-2800	3000			Wit Mfolozi Inlier, Afrika	Karhu/Epstein 1986
B 11-67	14,1		Mesoarchaikum	3200-2800	3000			Fig Tree Fm., S-Afrika	Barghorn 1966; Perry 1967
K 584	15,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Robert 1988
K 626	16,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Knauth/Lowe 1978; Robert 1988
C 140	22,7		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Robert 1988
K 589	20,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Robert 1988
P-107	17,5		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Zwartkoppie Fm., Onverwacht, Afrika	Karhu/Epstein 1986
P-108	16,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Onverwacht, Afrika	Karhu/Epstein 1986
P-124	15,2		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Onverwacht, Afrika	Karhu/Epstein 1986

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
P-112	15,6		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Upper Hoogenoeg Fm., Onverwacht, Afrika	Karhu/Epstein 1986
K 567	22		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Robert 1988
PPRG 6	15,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Wararawoona	PPRG; Robert et al. 1992
PPRG 2-1	14,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Wararawoona	PPRG; Robert et al. 1992
PPRG 16-1	11		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Wararawoona	PPRG; Robert et al. 1992
PPRG 182	13,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	PPRG; Robert et al. 1992
B.369A	15,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
B.7025	12,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
B.363	12,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
B.155	12,5		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
B.426	14,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
B.379	12,6		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
M.143	14		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht, Afrika	Boudou; Robert et al. 1992
C120	17,5		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree, Afrika	Robert 1988
AK 15	15,4		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Onverwacht, Afrika	Abraham et al. 2011
AK 2	19,5		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Onverwacht, Afrika	Abraham et al. 2011
AK 14	16,5		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Onverwacht, Afrika	Abraham et al. 2011
H 3B	16,7		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Onverwacht, Afrika	Abraham et al. 2011
H 2B	17		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Onverwacht, Afrika	Abraham et al. 2011
A H14	15,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Onverwacht, Afrika	Abraham et al. 2011
F T 21	14,7		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
F T 24	15,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
F T 25	14,9		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
F T 28	17		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
A 180.1	18,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 180.2	17,6		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 180.3	17,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 180.3	18,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 180.6	17,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 183a	15,4		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 183.2	15,4		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Fig Tree Fm., S-Afrika	Perry/Tan 1972
A 123.1	14,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 123.2	14,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 123.3	14,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 123.4	14,5		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 124.1	13,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 124.2	17,6		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 124.3	17,2		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 124.4	17,1		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
Sheba 2	16,2		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Onverwacht Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
OV 10	17,6		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 105	14,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 106	14,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 108	14,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 109	13,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 110	13,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 91	13,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 93.1	16,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 93.2	17		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-wasser	Fundort	Autor
OV 14	18,7		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Kromberg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 165	13,4		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 168	15,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 172.3	18,6		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 174	15		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 176.1	16,3		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
A 176.2	16,8		Paläoarchaikum	3600-3200	3400			Hooggenoeg Fm., Afrika	Perry/Tan 1972
P-116	16,2		Eoarchaikum	4000-3600	3800			Isua, SW-Grönland	Karhu/Epstein 1986
P-117	17,3		Eoarchaikum	4000-3600	3800			Isua, SW-Grönland	Karhu/Epstein 1986

D4 $\delta^{18}O$-und δD-Werte von Cherts aus der Literatur

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
K 353	35,2	-86	Eozän	55,8-33,9	45	T		Q	JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974/76
K 354	35,2	-79	Eozän	55,8-33,9	45	T		Q	JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974/76
167-33-1(113-115)	34,6	-92	Eozän	55,5-33,9	45	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-34cc	34,8	-86	Eozän	55,5-33,9	45	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
K 70	27,5	-83	Kreide	145,5-65,5	105			Q	Aguja Fm. Texas	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
K 262	32,7	-68	Kreide	145,5-65,5	105			Q	Frederickburg LS Texas	Knauth/Epstein 1976
K 263	32,6	-65	Kreide	145,5-65,5	105			Q	Frederickburg LS Texas	Knauth/Epstein 1976
K 266	31,6	-73	Kreide	145,5-65,5	105			Q	Frederickburg LS Texas	Knauth/Epstein 1976
K 283	33,5	-79	Kreide	145,5-65,5	105			Q	Dover-Flint, England	Knauth/Epstein 1976
K 356	35,8	-79	Kreide	145,5-65,5	105	T		Q	JOIDES DSPD	Knauth/Epstein 1974/76
166-27-2(136-138)B	30,1	-100	Kreide	145,5-65,5	105	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-44-1(109-112)	35,8	-84	Kreide	145,5-65,5	105	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
167-65-1(70-73)	33,3	-84	Kreide	145,5-65,5	105	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
KF 94 Fragment	34,6	-98	Kreide	145,5-65,5	105		F	Q	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
KS 13 Fragment	31,5	-98	Kreide	145,5-65,5	105		F	Q	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
MY 54 Fragment	31,5	-92	Kreide	145,5-65,5	105		F	Q	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
SE 166 Fragment	29,7	-115	Kreide	145,5-65,5	105		F	Q	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
3953 Fragment	30,5	-76	Kreide	145,5-65,5	105		F	Q	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
8289 Fragment	29,8	-113	Kreide	145,5-65,5	105		F	Q	Chert Brekzie, Mishash Fm., Israel	Kolodny et al. 2005
100-1-5(0-1)	30,9	-83	Kreide/Oberjura	150,8-136,4	144	T		Q	JOIDES DSPD	Vengosh et al.1987

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
99A-10-2	31,7	-89	Oberjura	161,2-145,5	153	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
50.0-2-1(122-124)	35,7	-83	Oberjura	161,2-145,5	153	T		Q	JOIDES DSPD	Kolodny/Epstein 1976
O 1a	32,1	-59,2	Oberjura	161,2-145,5	153		F	Q	Holy Cross Mountains, Polen	Sharp et al. 2002
O 1b	32,1	-107	Oberjura	161,2-145,5	153		F	Q	Holy Cross Mountains, Polen	Sharp et al. 2002
K 15	27,4	-49	Trias	251-199,6	225			Q	Chinle Fm., Utah	Knauth/Epstein 1976; Robert 1988
K 248	17,8	-96	Trias	251-199,6	225			Q	Prida Fm., Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 252	23,7	-83	Trias	251-199,6	225			Q	Excelsior Fm., Minna, Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 28	29,9	-75	Perm	299-251	275			Q	Kaibab LS Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 9	33,2	-62	Karbon/Penns.	325-299	312			Q	Lee Canyon, Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 22	29,9	-81	Karbon/Penns.	325-299	312			Q	Supai Fm., Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 8	28,6	-85	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Monte Cristo LS, Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 24	29,3	-58	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Red Wall LS, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 25	28,9	-82	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Red Wall LS, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 41	31,3	-63	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Lake Valley Fm., New Mexico	Knauth/Epstein 1976
K 59	29,1	-38	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Helms Fm., Texas	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
K 120	29,2	-34	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Boone Chert, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 121	28,3	-29	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Boone Chert, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 128	29,6	-50	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 136	32	-53	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Elsey Fm., Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 138	31,4	-52	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 154	33,8	-33	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	St. Louis LS, Illinois	Knauth/Epstein 1976
K 156	31,8	-52	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 157	31,4	-52	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 167	33,4	-62	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 169	30,7	-58	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 171	32,5	-60	Karbon/Mississip.	359,2-325	342			Q	Burlington LS, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 111	29	-58	Devon	416-359,2	388			Q	Arkansas Novaculite, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 139	30,1	-37	Devon	416-359,2	388			Q	Bailey LS, Illinois	Knauth/Epstein 1976
K 268	29,1	-52	Devon	416-359,2	388			Q	Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 272	31,7	-67	Devon	416-359,2	388			Q	Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
K 152	32	-56	Devon	416-359,2	388			Q	Clear Creek Fm., Illinois	Knauth/Epstein 1976
K 270a	28,6	-68	Devon	416-359,2	388			Q	Green Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 270b	29,8	-61	Devon	416-359,2	388			Q	Black Caballos Novaculite, Texas	Knauth/Epstein 1976
St 281	30	-60	Silur	443,7-416	430			Q	Tennessee	Knauth/Epstein 1976
K 6	25,5	-89	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Pogonip Fm., SW Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 244	26,9	-103	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Pogonip Fm., SW Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 76	29,7	-53	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Maravillis Chert, Marathon, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 81	26	-46	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Fort Pena Chert, Marathon, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 93	25,7	-79	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Tanyard Fm., Lonhorn Cavern, Texas	Knauth/Epstein 1976
K 95	29,8	-50	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Viola LS Arbuckle Mtns, Oklahoma	Knauth/Epstein 1976
K 124	27,8	-44	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Cotter Dolomite, Busch, Arkansas	Knauth/Epstein 1976
K 158	28	-31	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Gasconade Fm., Lawrenceton, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 260	17	-115	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Palmetto Fm., Magruder Mt., Nevada	Knauth/Epstein 1976
K 274	26,9	-45	Ordovizium	488,3-443,7	466			Q	Ft. Pena Chert, Marathon, Texas	Knauth/Epstein 1976

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
K 1	26,7	-60	Kambrium	542-488,3	515			Q	Nopah Fm., Nopah Mtns, California	Knauth/Epstein 1976
K 3	26	-72	Kambrium	542-488,3	515			Q	Nopah Fm., Nopah Mtns, California	Knauth/Epstein 1976
K 160	28,3	-50	Kambrium	542-488,3	515			Q	Potosi Fm., Lawrenceton, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 161	24,1	-68	Kambrium	542-488,3	515			Q	Potosi Fm., Lawrenceton, Missouri	Knauth/Epstein 1976
K 221	26,4	-75	Kambrium	542-488,3	515			Q	St. Charles LS, Bear Lake, Idaho	Knauth/Epstein 1976
K 259	20,1	-105	Kambrium	542-488,3	515			Q	Emigrant LS Magruder Mt., Nevada	Knauth/Epstein 1976
L 325	27,8	-51	Kambrium	542-488,3	515			Q	Arbuckle LS, Arbuckle Mtns, Oklahoma	Knauth/Epstein 1976
K 26	30,8	-60	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			MegaQ	Bass LS, Grand Canyon, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 31	28,1	-51	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal L, Roosevelt Dam, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 34	29,5	-85	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal L, Roosevelt Dam, Arizona	Knauth/Epstein 1976
K 188	19,1	-68	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Belt Supergroup, Siey LS, Montana	Knauth/Epstein 1976
K 278	17,6	-80	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			MegaQ	Beck Spring Dolomite, Death Valley, CA	Knauth/Epstein 1976; Robert 1988
KK 89-7	28,6	-57	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
KK 89-16b	27,5	-71	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-16a	27,9	-63	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-19m	27	-69	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-19a	29	-50	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-24	29,2	-50	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-28a	27,2	-75	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-43s	19,5	-100	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-43w	29,1	-56	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-2	29	-64	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-8	27,1	-72	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-8c	32,3	-54	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-10	31,6	-59	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44	25,8	-60	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44e	27	-73	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 89-44m	19,7	-99	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992

Chert	$\delta^{18}O$	δD	Zeit	Ma	Ø Ma	Tiefsee	Flach-Wasser	Quarz	Fundort	Autor
KK 89-44w	27,8	-72	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-13	20,4	-85	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-9	23,8	-73	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-1	26,7	-59	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
KK 90-20	32,3	-73	Mesoproterozoikum	1600-1000	1300			Q	Mescal Limestone, Arizona	Kenny/Knauth 1992
Sch 300	23,6	-73	Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			Q	Gunflint Chert, Schreiber`s Beach, Ontario	Knauth/Epstein 1976
Sch 304	14,9	-56	Paläoproterozoikum	2500-1600	2050			MegaQ	Fig Tree Chert, S-Afrika	Knauth/Epstein 1976

E Statistik

E1 Signifikanz der Normalverteilung nach verschiedenen Methoden

E1.1 TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, LOI

Arnhofen	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,313	0,927	0,930	0,120	0,374	0,438	0,029	0,681	0,096	0,526
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,013	0,200	0,200	0,001	0,024	0,041	0,000	0,175	0,000	0,200
Shapiro-Wilk-Test	0,136	0,653	0,759	0,015	0,001	0,018	0,000	0,119	0,000	0,297
David-Test, angenähert normalverteilt	3,50	3,43	3,97	4,29	4,11	3,77	3,94	2,93	3,63	2,87
Borgerhau	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,061	0,013	0,884	0,002	0,164	0,550	0,305	0,343	0,482	0,279
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,000	0,000	0,200	0,000	0,002	0,097	0,015	0,021	0,063	0,011
Shapiro-Wilk-Test	0,003	0,000	0,360	0,000	0,031	0,002	0,157	0,004	0,035	0,006
David-Test, angenähert normalverteilt	4,12	3,39	3,60	3,00	3,80	3,53	3,87	3,81	3,04	3,69
Wippingen	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,210	0,988	0,444	0,110	0,820	0,838	0,328	0,779	0,122	0,887
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,003	0,200	0,043	0,000	0,200	0,200	0,016	0,200	0,001	0,200
Shapiro-Wilk-Test	0,008	0,893	0,006	0,019	0,050	0,041	0,000	0,293	0,003	0,460
David-Test, angenähert normalverteilt	3,55	3,17	3,38	3,33	2,60	3,55	3,82	3,48	4,21	3,34
Wittlingen	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,505	0,684	0,962	0,746	0,388	0,976	0,035	0,328	0,415	0,915
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,066	0,178	0,200	0,200	0,027	0,200	0,000	0,016	0,034	0,200
Shapiro-Wilk-Test	0,160	0,365	0,944	0,396	0,017	0,875	0,000	0,062	0,084	0,222

David-Test, angenähert normalverteilt	3,67	3,42	3,46	3,85	3,65	3,63	4,08	3,74	3,57	3,60
Alle 65 Hornsteine	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,164	0,173	0,539	0,043	0,060	0,025	0,000	0,005	0,000	0,204
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,003	0,004	0,182	0,000	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000	0,011
Shapiro-Wilk-Test	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020
David-Test, angenähert normalverteilt	4,70	5,94	5,65	2,37	6,46	5,57	5,89	3,89	7,41	4,49

(signifikante Werte grau hinterlegt)

E1.2 Ba, Cr, Ni, Rb, Sr, V, Eu, Sm, Yb

Arnhofen	*Ba*	*Cr*	*Ni*	*Rb*	*Sr*	*V*	*Eu*	*Sm*	*Yb*
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,800	0,967	0,999	0,908	0,930	0,943	0,916	0,918	0,727
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,200	0,200	0,200	0,000	0,200	0,200	0,200	0,200	0,146
Shapiro-Wilk-Test	0,022	0,509	0,244	0,002	0,274	0,248	0,098	0,162	0,015
David-Test, angenähert normalverteilt	3,77	3,67	3,32	3,52	4,10	3,40	2,90	2,94	2,55
Borgerhau	*Ba*	*Cr*	*Ni*	*Rb*	*Sr*	*V*	*Eu*	*Sm*	*Yb*
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,990	0,977	0,614	0,565	0,311	0,719	0,121	0,242	0,155
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,200	0,200	0,082	0,000	0,016	0,043	0,001	0,007	0,002
Shapiro-Wilk-Test	0,998	0,227	0,046	0,000	0,000	0,011	0,001	0,118	0,000
David-Test, angenähert normalverteilt	4,12	4,01	3,08	2,95	4,28	3,07	4,13	4,17	3,54
Wippingen	*Ba*	*Cr*	*Ni*	*Rb*	*Sr*	*V*	*Eu*	*Sm*	*Yb*
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,926	0,801	0,732	0,985	0,565	0,260	0,855	0,864	0,781
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,000	0,200	0,200	0,000	0,096	0,007	0,200	0,200	0,200
Shapiro-Wilk-Test	0,000	0,160	0,154	0,001	0,006	0,001	0,208	0,250	0,136
David-Test, angenähert normalverteilt	3,53	2,87	3,97	2,97	3,18	4,56	3,01	3,02	2,77

Wittlingen	***Ba***	***Cr***	***Ni***	***Rb***	***Sr***	***V***	***Eu***	***Sm***	***Yb***
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,935	0,806	0,713	0,917	0,774	0,914	0,588	0,752	0,404
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,001	0,200	0,131	0,001	0,200	0,200	0,110	0,200	0,040
Shapiro-Wilk-Test	0,000	0,119	0,608	0,002	0,395	0,973	0,055	0,080	0,033
David-Test, angenähert normalverteilt	3,40	2,92	3,84	3,71	3,54	4,06	3,81	3,82	3,16
Alle 65 Hornsteine	***Ba***	***Cr***	***Ni***	***Rb***	***Sr***	***V***	***Eu***	***Sm***	***Yb***
Kolmogorov-Smirnov-Test	0,180	0,340	0,743	0,000	0,062	0,434	0,089	0,210	0,411
Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lillefors	0,004	0,028	0,200	0,000	0,000	0,057	0,001	0,007	0,043
Shapiro-Wilk-Test	0,004	0,001	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
David-Test, angenähert normalverteilt	5,35	4,97	4,40	3,09	4,53	6,17	3,77	3,78	5,13

(signifikante Werte grau hinterlegt)

E2 Post-hoc-Mehrfachvergleichstabelle der ANOVA (signifikante Mittelwerte grün)

Variable	(I) Fundort	(J) Fundort	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
TiO_2	Arnhofen	Borgerhau	,000007020118	,000003950916	,414	-,00000406630	,00001810654
		Wippingen	,000004631829	,000004109909	,850	-,00000714669	,00001641035
		Wittlingen	-,000017368398*	,000004058490	,002	-,00002898889	-,00000574791
	Borgerhau	Wippingen	-,000002388289	,000004742676	,997	-,00001569683	,00001092026
		Wittlingen	-,000024388516*	,000004698187	,000	-,00003756610	-,00001121093
	Wippingen	Wittlingen	-,000022000227*	,000004832657	,001	-,00003567770	-,00000832276
Al_2O_3	Arnhofen	Borgerhau	,000221592769	,000106552238	,246	-,00007787814	,00052106368
		Wippingen	,000292979993*	,000071537409	,002	,00008909531	,00049686468
		Wittlingen	-,000192819651	,000081282983	,140	-,00042286454	,00003722524
	Borgerhau	Wippingen	,000071387223	,000098962090	,980	-,00020980894	,00035258339
		Wittlingen	-,000414412420*	,000106220609	,003	-,00071304192	-,00011578292
	Wippingen	Wittlingen	-,000485799644*	,000071042516	,000	-,00068818464	-,00028341465

Variable	(I) Fundort	(J) Fundort	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
Fe_2O_3	Arnhofen	Borgerhau	,000314427628*	,000065869867	,001	,00012288991	,00050596535
		Wippingen	-,000120866742	,000120398901	,907	-,00046859091	,00022685742
		Wittlingen	-,000077040104	,000103827903	,977	-,00037362897	,00021954876
	Borgerhau	Wippingen	-,000435294370*	,000108790894	,006	-,00076105107	-,00010953767
		Wittlingen	-,000391467732*	,000090109915	,003	-,00065897126	-,00012396420
	Wippingen	Wittlingen	,000043826638	,000135191911	1,000	-,00033997884	,00042763212
MnO	Arnhofen	Borgerhau	,000004560007*	,000001274007	,007	,00000099502	,00000812499
		Wippingen	-,000000289517	,000001304000	1,000	-,00000399085	,00000341181
		Wittlingen	-,000002895187	,000001709327	,484	-,00000783809	,00000204772
	Borgerhau	Wippingen	-,000004849524*	,000001399424	,009	-,00000877470	-,00000092434
		Wittlingen	-,000007455194*	,000001783191	,002	-,00001254809	-,00000236230
	Wippingen	Wittlingen	-,000002605670	,000001804741	,652	-,00000776787	,00000255653
MgO	Arnhofen	Borgerhau	,000026903760	,000013490464	,316	-,00001286332	,00006667084
		Wippingen	,000033847445	,000013773844	,133	-,00000647313	,00007416802
		Wittlingen	,000018224575	,000014423704	,774	-,00002343852	,00005988767
	Borgerhau	Wippingen	,000006943685	,000007463262	,931	-,00001405466	,00002794203
		Wittlingen	-,000008679185	,000008603763	,903	-,00003315526	,00001579689
	Wippingen	Wittlingen	-,000015622870	,000009041621	,453	-,00004130900	,00001006326
CaO	Arnhofen	Borgerhau	,000096570281	,000087045499	,860	-,00015469807	,00034783863
		Wippingen	,000231683900	,000081535980	,064	-,00000928158	,00047264938
		Wittlingen	,000247592774*	,000077804701	,036	,00001239235	,00048279320
	Borgerhau	Wippingen	,000135113619	,000050747761	,070	-,00000729346	,00027752070
		Wittlingen	,000151022493*	,000044506075	,014	,00002334133	,00027870366
	Wippingen	Wittlingen	,000015908875	,000032434363	,997	-,00007813799	,00010995574
Na_2O	Arnhofen	Borgerhau	,000116810112	,000064656294	,436	-,00007896456	,00031258479
		Wippingen	,000125198371	,000063914570	,353	-,00006967392	,00032007067
		Wittlingen	,000001157031	,000089969610	1,000	-,00025347033	,00025578440
	Borgerhau	Wippingen	,000008388259	,000013139968	,989	-,00002876627	,00004554279
		Wittlingen	-,000115653081	,000064669291	,447	-,00031146786	,00008016170
	Wippingen	Wittlingen	-,000124041340	,000063927719	,363	-,00031895396	,00007087128

Variable	(I) Fundort	(J) Fundort	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
K_2O	Arnhofen	Borgerhau	,000066790505*	,000012652481	,000	,00003023495	,00010334606
		Wippingen	,000060494055*	,000012255584	,000	,00002467851	,00009630960
		Wittlingen	-,000057592209*	,000017703457	,018	-,00010786181	-,00000732260
	Borgerhau	Wippingen	-,000006296450	,000007912217	,966	-,00002843675	,00001584386
		Wittlingen	-,000124382713*	,000015027183	,000	-,00016838696	-,00008037847
	Wippingen	Wittlingen	-,000118086264*	,000014694568	,000	-,00016153149	-,00007464103
P_2O_5	Arnhofen	Borgerhau	,000035674464	,000016657897	,261	-,00001479776	,00008614669
		Wippingen	,000043418377	,000016541797	,112	-,00000691169	,00009374845
		Wittlingen	,000038786392	,000016486336	,185	-,00001147807	,00008905086
	Borgerhau	Wippingen	,000007743913	,000003565682	,204	-,00000224857	,00001773640
		Wittlingen	,000003111928	,000003298833	,927	-,00000620186	,00001242572
	Wippingen	Wittlingen	-,000004631985	,000002651004	,441	-,00001217322	,00000290925
LOI	Arnhofen	Borgerhau	,000978229287*	,000163586445	,000	,00051544050	,00144101808
		Wippingen	,001031841733*	,000179514783	,000	,00052370979	,00153997367
		Wittlingen	,000336547795	,000207577548	,525	-,00025303765	,00092613324
	Borgerhau	Wippingen	,000053612446	,000159060936	1,000	-,00039539822	,00050262312
		Wittlingen	-,000641681492*	,000190166407	,015	-,00118660236	-,00009676062
	Wippingen	Wittlingen	-,000695293938*	,000204030131	,013	-,00127569951	-,00011488837
Ba	Arnhofen	Borgerhau	,000013730976*	,000001536922	,000	,00000930726	,00001815470
		Wippingen	,000016574809*	,000001838874	,000	,00001136949	,00002178013
		Wittlingen	,000013149798*	,000002139374	,000	,00000707229	,00001922731
	Borgerhau	Wippingen	,000002843832	,000001479318	,339	-,00000140002	,00000708769
		Wittlingen	-,000000581179	,000001839523	1,000	-,00000595344	,00000479108
	Wippingen	Wittlingen	-,000003425011	,000002098374	,518	-,00000939680	,00000254678
Cr	Arnhofen	Borgerhau	-,000014445680*	,000004926007	,037	-,00002830809	-,00000058327
		Wippingen	-,000021811262*	,000005396259	,002	-,00003708598	-,00000653654
		Wittlingen	-,000035187802*	,000009317472	,008	-,00006250443	-,00000787117
	Borgerhau	Wippingen	-,000007365582	,000005062172	,639	-,00002163799	,00000690683
		Wittlingen	-,000020742122	,000009128048	,195	-,00004769623	,00000621199
	Wippingen	Wittlingen	-,000013376540	,000009390172	,673	-,00004083290	,00001407982

Variable	(I) Fundort	(J) Fundort	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
Ni	Arnhofen	Borgerhau	,000003848462	,000002176028	,435	-,00000243113	,00001012805
		Wippingen	-,000009733646*	,000002626284	,006	-,00001716801	-,00000229928
		Wittlingen	-,000012321792*	,000003789288	,021	-,00002324610	-,00000139748
	Borgerhau	Wippingen	-,000013582108*	,000002089752	,000	-,00001959188	-,00000757234
		Wittlingen	-,000016170254*	,000003439244	,001	-,00002640701	-,00000593350
	Wippingen	Wittlingen	-,000002588146	,000003740410	,984	-,00001340485	,00000822856
Rb	Arnhofen	Borgerhau	-,000000043429	,000000217218	1,000	-,00000065947	,00000057261
		Wippingen	,000000448770	,000000266043	,479	-,00000030515	,00000120269
		Wittlingen	-,000000269262	,000000247241	,867	-,00000096899	,00000043047
	Borgerhau	Wippingen	,000000492200	,000000237699	,260	-,00000018714	,00000117154
		Wittlingen	-,000000225832	,000000216448	,888	-,00000083950	,00000038784
	Wippingen	Wittlingen	-,000000718032	,000000265414	,067	-,00000147025	,00000003419
Sr	Arnhofen	Borgerhau	,000001492516*	,000000359581	,002	,00000046224	,00000252279
		Wippingen	,000001259447	,000000448981	,053	-,00000001170	,00000253060
		Wittlingen	,000000718029	,000000445067	,529	-,00000054185	,00000197791
	Borgerhau	Wippingen	-,000000233069	,000000378634	,991	-,00000132281	,00000085667
		Wittlingen	-,000000774487	,000000373985	,263	-,00000184970	,00000030072
	Wippingen	Wittlingen	-,000000541418	,000000460598	,822	-,00000184500	,00000076217
V	Arnhofen	Borgerhau	,000000217871	,000000316382	,984	-,00000066744	,00000110318
		Wippingen	-,000000830944	,000000477356	,458	-,00000222281	,00000056092
		Wittlingen	-,000000497988	,000000344666	,650	-,00000147933	,00000048335
	Borgerhau	Wippingen	-,000001048815	,000000492681	,239	-,00000246957	,00000037194
		Wittlingen	-,000000715859	,000000365594	,308	-,00000174453	,00000031281
	Wippingen	Wittlingen	,000000332956	,000000511303	,988	-,00000113327	,00000179918
Eu	Arnhofen	Borgerhau	,000000348159*	,000000056536	,000	,00000017950	,00000051681
		Wippingen	,000000251891*	,000000061759	,003	,00000007328	,00000043050
		Wittlingen	,000000170822	,000000071717	,138	-,00000003244	,00000037408
	Borgerhau	Wippingen	-,000000096269	,000000034049	,057	-,00000019451	,00000000198
		Wittlingen	-,000000177337*	,000000049886	,014	-,00000032522	-,00000002945
	Wippingen	Wittlingen	-,000000081068	,000000055735	,646	-,00000024101	,00000007887

Variable	(I) Fundort	(J) Fundort	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
Sm	Arnhofen	Borgerhau	,000004552073*	,000000744766	,000	,00000233021	,00000677393
		Wippingen	,000003257162*	,000000807064	,003	,00000091819	,00000559613
		Wittlingen	,000002206184	,000000942252	,150	-,00000046469	,00000487705
	Borgerhau	Wippingen	-,000001294911*	,000000436388	,041	-,00000255125	-,00000003857
		Wittlingen	-,000002345889*	,000000653391	,013	-,00000428239	-,00000040939
	Wippingen	Wittlingen	-,000001050978	,000000723600	,648	-,00000313072	,00000102876
Yb	Arnhofen	Borgerhau	,000000073106	,000000039679	,371	-,00000003794	,00000018415
		Wippingen	,000000182404*	,000000032975	,000	,00000008851	,00000027630
		Wittlingen	,000000144765*	,000000039090	,006	,00000003407	,00000025546
	Borgerhau	Wippingen	,000000109297*	,000000035574	,026	,00000000940	,00000020919
		Wittlingen	,000000071659	,000000041306	,441	-,00000004404	,00000018736
	Wippingen	Wittlingen	-,000000037639	,000000034915	,873	-,00000013743	,00000006216

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

E3 Korrelationen nach Pearson auf beiliegender CD

E3.1 Korrelationen nach Pearson für alle Hornsteine der vier untersuchten Fundorte auf beiliegender CD

E3.2 Korrelationen nach Pearson der Hornsteine von Arnhofen auf beiliegender CD

E3.3 Korrelationen nach Pearson der Hornsteine von Borgerhau auf beiliegender CD

E3.4 Korrelationen nach Pearson der Hornsteine von Wippingen auf beiliegender CD

E3.5 Korrelationen nach Pearson der Hornsteine von Wittlingen auf beiliegender CD

E4 Faktorenanalyse

E4.1 Anti-Image-Matrizen

Alle Hornsteine der vier untersuchten Fundorte: Anti-Image-Matrizen

		TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Ba	Cr	Ni	Rb	Sr	Eu	Sm	Yb
Anti-Image-Korrelation	TiO_2	,619a	0,151	-0,113	0,082	-0,007	0,071	-0,606	0,177	0,088	0,301	-0,316	0,224	0,049	-0,492	-0,103	0,106	0,058
	Al_2O_3	0,151	,764a	0,153	0,07	-0,178	0,154	-0,502	-0,009	-0,159	0,266	0,02	-0,031	-0,055	-0,118	-0,077	0,069	0,045
	Fe_2O_3	-0,113	0,153	,747a	-0,184	0,043	0,118	0,021	-0,195	-0,238	0,278	0,309	-0,319	-0,067	0,03	-0,109	0,096	0,013
	MnO	0,082	0,07	-0,184	,832a	-0,048	0,054	-0,282	0,031	0,063	0,166	-0,176	-0,249	0,245	-0,261	0,179	-0,23	0,249
	MgO	-0,007	-0,178	0,043	-0,048	,710a	-0,236	-0,038	-0,041	0,274	-0,202	0,267	-0,211	-0,144	-0,012	0,165	-0,165	-0,219
	Na_2O	0,071	0,154	0,118	0,054	-0,236	,697a	-0,317	-0,055	0,026	0,054	-0,012	0,237	0,013	0,159	-0,184	0,152	0,193
	K_2O	-0,606	-0,502	0,021	-0,282	-0,038	-0,317	,658a	-0,043	-0,341	-0,204	0,19	-0,194	-0,247	0,196	0,157	-0,134	-0,158
	P_2O_5	0,177	-0,009	-0,195	0,031	-0,041	-0,055	-0,043	,847a	-0,118	0	-0,008	0,124	-0,131	-0,203	-0,004	0,005	-0,150
	LOI	0,088	-0,159	-0,238	0,063	0,274	0,026	-0,341	-0,118	,772a	-0,344	0,061	-0,041	0,076	0,139	-0,099	0,087	-0,087
	Ba	0,301	0,266	0,278	0,166	-0,202	0,054	-0,204	0	-0,344	,698a	0,047	-0,047	-0,146	-0,395	0,012	-0,028	-0,063
	Cr	-0,316	0,02	0,309	-0,176	0,267	-0,012	0,19	-0,008	0,061	0,047	,611a	-0,552	-0,159	0,001	-0,043	0,061	-0,194
	Ni	0,224	-0,031	-0,319	-0,249	-0,211	0,237	-0,194	0,124	-0,041	-0,047	-0,552	,628a	0,056	0,267	-0,194	0,176	0,353
	Rb	0,049	-0,055	-0,067	0,245	-0,144	0,013	-0,247	-0,131	0,076	-0,146	-0,159	0,056	,749a	-0,072	0,018	-0,007	0,105
	Sr	-0,492	-0,118	0,03	-0,261	-0,012	0,159	0,196	-0,203	0,139	-0,395	0,001	0,267	-0,072	,716a	-0,245	0,196	0,272
	Eu	-0,103	-0,077	-0,109	0,179	0,165	-0,184	0,157	-0,004	-0,099	0,012	-0,043	-0,194	0,018	-0,245	,695a	-0,994	-0,206
	Sm	0,106	0,069	0,096	-0,23	-0,165	0,152	-0,134	0,005	0,087	-0,028	0,061	0,176	-0,007	0,196	-0,994	,701a	0,156
	Yb	0,058	0,045	0,013	0,249	-0,219	0,193	-0,158	-0,15	-0,087	-0,063	-0,194	0,353	0,105	0,272	-0,206	0,156	,657a

a. Maß der Stichprobeneignung (MSA-Werte blau hinterlegt).

Arnhofen: Anti-Image-Matrizen

		Al_2O_3	CaO	K_2O	LOI	Ba	Rb	Sr	V	Eu	Sm
Anti-Image-Korrelation	Al_2O_3	,607[a]	0,085	-0,704	0,489	-0,039	-0,315	0,26	-0,052	-0,176	0,162
	CaO	0,085	,583[a]	-0,083	0,507	-0,521	-0,604	-0,176	0,046	-0,216	0,234
	K_2O	-0,704	-0,083	,734[a]	-0,479	0,124	0,092	0,041	-0,349	0,01	-0,014
	LOI	0,489	0,507	-0,479	,579[a]	-0,103	-0,741	0,125	-0,016	-0,377	0,386
	Ba	-0,039	-0,521	0,124	-0,103	,720[a]	0,045	-0,38	-0,124	0,226	-0,221
	Rb	-0,315	-0,604	0,092	-0,741	0,045	,567[a]	-0,059	-0,096	0,573	-0,582
	Sr	0,26	-0,176	0,041	0,125	-0,38	-0,059	,718[a]	-0,273	-0,436	0,4
	V	-0,052	0,046	-0,349	-0,016	-0,124	-0,096	-0,273	,891[a]	-0,056	0,077
	Eu	-0,176	-0,216	0,01	-0,377	0,226	0,573	-0,436	-0,056	,510[a]	-0,998
	Sm	0,162	0,234	-0,014	0,386	-0,221	-0,582	0,4	0,077	-0,998	,505[a]

a. Maß der Stichprobeneignung (MSA-Werte blau hinterlegt)

Borgerhau: Anti-Image-Matrizen

		TiO_2	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Ni	Rb	Sr	Eu	Sm
Anti-Image-Korrelation	TiO_2	,701[a]	-,344	-,306	,279	-,587	-,215	,489	,126	-,308	,159	-,034
	MnO	-,344	,665[a]	,463	-,354	,146	-,055	-,250	,576	,097	,172	-,337
	MgO	-,306	,463	,668[a]	-,755	,328	-,203	-,145	,151	,330	,169	-,252
	Na_2O	,279	-,354	-,755	,632[a]	-,633	,087	,312	-,067	-,129	-,322	,393
	K_2O	-,587	,146	,328	-,633	,590[a]	-,104	-,381	-,171	,283	,101	-,189
	P_2O_5	-,215	-,055	-,203	,087	-,104	,837[a]	,155	-,108	-,247	-,361	,360
	Ni	,489	-,250	-,145	,312	-,381	,155	,756[a]	,112	,358	-,103	,082
	Rb	,126	,576	,151	-,067	-,171	-,108	,112	,667[a]	-,094	,095	-,152
	Sr	-,308	,097	,330	-,129	,283	-,247	,358	-,094	,777[a]	-,110	-,069
	Eu	,159	,172	,169	-,322	,101	-,361	-,103	,095	-,110	,641[a]	-,964
	Sm	-,034	-,337	-,252	,393	-,189	,360	,082	-,152	-,069	-,964	,624[a]

a. Maß der Stichprobeneignung (MSA-Werte blau hinterlegt)

Wippingen: Anti-Image-Matrizen

		TiO_2	Fe_2O_3	MnO	P_2O_5	LOI	Ba	Ni	Sr	V	Eu	Sm
Anti-Image-Korrelation	TiO_2	,521[a]	-,315	-,106	-,492	,175	-,396	,112	-,790	,225	,470	-,441
	Fe_2O_3	-,315	,675[a]	-,002	-,125	-,518	,212	-,126	,522	-,580	-,615	,502
	MnO	-,106	-,002	,739[a]	,331	,003	,110	-,806	-,324	-,475	-,141	,085
	P_2O_5	-,492	-,125	,331	,767[a]	-,084	,360	-,047	,144	-,278	-,378	,369
	LOI	,175	-,518	,003	-,084	,522[a]	-,448	-,139	-,173	,102	,215	-,135
	Ba	-,396	,212	,110	,360	-,448	,796[a]	-,172	,163	,216	-,078	,109
	Ni	,112	-,126	-,806	-,047	-,139	-,172	,630[a]	,231	,355	,070	-,066
	Sr	-,790	,522	-,324	,144	-,173	,163	,231	,550[a]	-,180	-,529	,470
	V	,225	-,580	-,475	-,278	,102	,216	,355	-,180	,558[a]	,640	-,526
	Eu	,470	-,615	-,141	-,378	,215	-,078	,070	-,529	,640	,593[a]	-,972
	Sm	-,441	,502	,085	,369	-,135	,109	-,066	,470	-,526	-,972	,625[a]

a. Maß der Stichprobeneignung (MSA-Werte blau hinterlegt)

Wittlingen: Anti-Image-Matrizen

		TiO_2	Al_2O_3	K_2O	MnO	Ba	Cr	Rb	Sr	Eu	Sm
Anti-Image-Korrelation	TiO_2	,685[a]	,455	-,487	-,374	-,081	,053	,156	-,380	-,251	,276
	Al_2O_3	,455	,559[a]	-,860	-,354	,271	,227	-,275	-,203	-,091	,102
	K_2O	-,487	-,860	,538[a]	,299	-,482	-,019	,339	-,118	,245	-,216
	MnO	-,374	-,354	,299	,789[a]	,093	-,371	-,074	-,030	,250	-,282
	Ba	-,081	,271	-,482	,093	,536[a]	-,090	-,831	,439	-,006	-,066
	Cr	,053	,227	-,019	-,371	-,090	,776[a]	,105	-,154	-,225	,246
	Rb	,156	-,275	,339	-,074	-,831	,105	,589[a]	-,365	-,128	,194
	Sr	-,380	-,203	-,118	-,030	,439	-,154	-,365	,840[a]	-,102	-,009
	Eu	-,251	-,091	,245	,250	-,006	-,225	-,128	-,102	,702[a]	-,991
	Sm	,276	,102	-,216	-,282	-,066	,246	,194	-,009	-,991	,694[a]

a. Maß der Stichprobeneignung (MSA-Werte blau hinterlegt)

E4.2 Eigenwerte und Gesamtvarianz

Arnhofen: Erklärte Gesamtvarianz

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	4,245	42,446	42,446	3,422	34,218	34,218
2	2,709	27,090	69,536	2,676	26,760	60,979
3	1,654	16,540	86,075	2,510	25,097	86,075
4	,512	5,120	91,195			
5	,426	4,262	95,457			
6	,162	1,624	97,081			
7	,136	1,361	98,442			
8	,098	,980	99,422			
9	,057	,572	99,994			
10	,001	,006	100,000			

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Borgerhau: Erklärte Gesamtvarianz

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	4,795	36,881	36,881	4,030	30,999	30,999
2	3,563	27,409	64,290	3,222	24,788	55,787
3	1,948	14,986	79,276	3,054	23,489	79,276
4	,837	6,437	85,713			
5	,554	4,259	89,973			
6	,461	3,546	93,518			
7	,297	2,287	95,806			
8	,194	1,489	97,295			
9	,141	1,081	98,376			
10	,111	,855	99,231			
11	,052	,400	99,631			
12	,044	,335	99,966			
13	,004	,034	100,000			

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Wippingen: Erklärte Gesamtvarianz

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	5,408	49,161	49,161	3,550	32,271	32,271
2	2,374	21,581	70,742	3,443	31,303	63,574
3	1,623	14,751	85,493	2,411	21,919	85,493
4	,758	6,893	92,386			
5	,436	3,967	96,353			
6	,154	1,403	97,755			
7	,109	,995	98,750			
8	,054	,493	99,244			
9	,045	,410	99,654			
10	,035	,317	99,971			
11	,003	,029	100,000			

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Wittlingen: Erklärte Gesamtvarianz

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	4,428	44,278	44,278	4,287	42,867	42,867
2	3,139	31,394	75,672	2,293	22,934	65,800
3	,890	8,903	84,575	1,878	18,775	84,575
4	,609	6,091	90,667			
5	,387	3,872	94,539			
6	,279	2,794	97,333			
7	,183	1,828	99,161			
8	,050	,496	99,657			
9	,033	,333	99,990			
10	,001	,010	100,000			

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

E4.3 KMO-Tests

Arnhofen: KMO-Test	
Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin	,623

Borgerhau: KMO-Test	
Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin	,681

Wippingen: KMO-Test	
Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin	,640

Wittlingen: KMO-Test	
Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin	,672

E5 Diskriminanzanalyse

E5.1 Klassifizierungsergebnisse

Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: Klassifizierungsergebnisse (mit ungruppierten Fällen: Grund)

		Fundort	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
			Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	
Original	Anzahl	Arnhofen	15	0	0	0	15
		Borgerhau	0	20	0	0	20
		Wippingen	0	2	13	0	15
		Wittlingen	0	0	2	13	15
		ungruppierte Fälle	1	3	0	1	5
	%	Arnhofen	100,0	,0	,0	,0	100,0
		Borgerhau	,0	100,0	,0	,0	100,0
		Wippingen	,0	13,3	86,7	,0	100,0
		Wittlingen	,0	,0	13,3	86,7	100,0
		ungruppierte Fälle	20,0	60,0	,0	20,0	100,0

Alle Variablen, zwei Diskriminanzfunktionen:
Klassifizierungsergebnisse

		Fundort	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
			Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	
Original	Anzahl	Arnhofen	15	0	0	0	15
		Borgerhau	0	18	2	0	20
		Wippingen	0	3	12	0	15
		Wittlingen	0	0	2	13	15
	%	Arnhofen	100,0	,0	,0	,0	100,0
		Borgerhau	,0	90,0	10,0	,0	100,0
		Wippingen	,0	20,0	80,0	,0	100,0
		Wittlingen	,0	,0	13,3	86,7	100,0

a. 89,2% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanzfunktionen:**
Klassifizierungsergebnisse

		Fundort	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
			Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	
Original	Anzahl	Arnhofen	15	0	0	0	15
		Borgerhau	0	19	1	0	20
		Wippingen	0	4	11	0	15
		Wittlingen	0	0	3	12	15
	%	Arnhofen	100,0	,0	,0	,0	100,0
		Borgerhau	,0	95,0	5,0	,0	100,0
		Wippingen	,0	26,7	73,3	,0	100,0
		Wittlingen	,0	,0	20,0	80,0	100,0

a. 87,7% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*), **zwei Diskriminanzfunktionen:**
Klassifizierungsergebnisse

		Fundort	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
			Arnhofen	Borgerhau	Wippingen	Wittlingen	
Original	Anzahl	Arnhofen	15	0	0	0	15
		Borgerhau	0	18	2	0	20
		Wippingen	0	3	12	0	15
		Wittlingen	0	0	2	13	15
	%	Arnhofen	100,0	,0	,0	,0	100,0
		Borgerhau	,0	90,0	10,0	,0	100,0
		Wippingen	,0	20,0	80,0	,0	100,0
		Wittlingen	,0	,0	13,3	86,7	100,0

a. 89,2% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

E5.2 Fallweise Statistik

E5.2.1 Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken (mit Grund)

Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken (mit Grund)

	Fallnummer	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe					Diskriminanzwerte		
			Vorhergesagte Gruppe	P(D>d | G=g)		P(G=g | D=d)	Quadrierter Mahalanobis-Abstand zum Zentroid	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
				P	Df					
Arnh. 1	1	1	1	,094	3	,968	6,381	2,844	-,246	-1,673
Arnh. 2	2	1	1	,033	3	,993	8,756	2,114	1,258	-2,182
Arnh. 3	3	1	1	,881	3	1,000	,667	4,209	1,511	,808
Arnh. 4	4	1	1	,706	3	1,000	1,399	2,885	,848	,994
Arnh. 5	5	1	1	,288	3	1,000	3,762	3,591	-,003	1,852
Arnh. 6	6	1	1	,397	3	,999	2,964	2,068	1,238	,366
Arnh. 7	7	1	1	,098	3	1,000	6,288	5,900	-,227	,509
Arnh. 8	8	1	1	,473	3	1,000	2,511	3,105	1,140	1,691
Arnh. 9	9	1	1	,749	3	1,000	1,217	3,435	,232	,864
Arnh. 10	10	1	1	,823	3	1,000	,910	4,603	1,405	-,102
Arnh. 11	11	1	1	,048	3	1,000	7,918	6,554	1,540	,364
Arnh. 12	12	1	1	,709	3	1,000	1,387	4,605	1,862	,582
Arnh. 13	13	1	1	,749	3	1,000	1,215	4,657	1,157	-,405
Arnh. 14	14	1	1	,990	3	1,000	,116	3,608	1,372	,329
Arnh. 15	15	1	1	,098	3	,999	6,294	2,508	3,215	-,127
Borg. 1	16	2	2	,871	3	,978	,710	,229	-1,605	-,585
Borg. 2	17	2	2	,411	3	1,000	2,876	,196	-3,311	-2,204
Borg. 3	18	2	2	,676	3	,975	1,529	,475	-2,563	,146

Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken (mit Grund)

	Fallnummer	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe					Diskriminanzwerte		
			Vorhergesagte Gruppe	P(D>d | G=g)		P(G=g | D=d)	Quadrierter Mahalanobis-Abstand zum Zentroid	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
				P	Df					
Borg. 4	19	2	2	,987	3	,991	,139	,147	-2,175	-,692
Borg. 5	20	2	2	,462	3	,944	2,576	-1,399	-1,369	-1,273
Borg. 6	21	2	2	,834	3	,959	,866	-,793	-2,660	-,330
Borg. 7	22	2	2	,680	3	1,000	1,508	,684	-2,003	-1,747
Borg. 8	23	2	2	,486	3	,998	2,439	-1,236	-2,802	-1,887
Borg. 9	24	2	2	,678	3	,986	1,518	,438	-2,862	,035
Borg. 10	25	2	2	,327	3	,996	3,453	-,562	-,967	-2,121
Borg. 11	26	2	2	,229	3	1,000	4,322	,407	-2,516	-2,882
Borg. 12	27	2	2	,261	3	,644	4,004	-,003	-2,437	1,101
Borg. 13	28	2	2	,863	3	,932	,745	-,538	-2,349	-,123
Borg. 14	29	2	2	,963	3	,998	,285	-,195	-2,684	-1,253
Borg. 15	30	2	2	,785	3	,960	1,068	,036	-1,321	-,597
Borg. 16	31	2	2	,998	3	,991	,041	-,340	-2,296	-,946
Borg. 17	32	2	2	,890	3	,933	,630	-,710	-2,134	-,355
Borg. 18	33	2	2	,941	3	,998	,399	,390	-2,133	-1,183
Borg. 19	34	2	2	,780	3	,874	1,088	-,394	-2,083	,101
Borg. 20	35	2	2	,579	3	,999	1,967	,261	-3,633	-1,001
Wipp. 1	36	3	2	,660	3	,873	1,599	-1,304	-2,107	-,419
Wipp. 2	37	3	3	,833	3	,965	,870	-2,089	-,971	,714
Wipp. 3	38	3	2	,362	3	,576	3,197	-1,676	-1,719	-,167
Wipp. 4	39	3	3	,422	3	,990	2,809	-1,504	,621	1,977
Wipp. 5	40	3	3	,617	3	,566	1,789	-,903	-1,608	,469

Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken (mit Grund)

	Fallnummer	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe					Diskriminanzwerte		
			Vorhergesagte Gruppe	P(D>d | G=g)		P(G=g | D=d)	Quadrierter Mahalanobis-Abstand zum Zentroid	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
				P	Df					
Wipp. 6	41	3	3	,099	3	,780	6,275	,883	-1,482	1,882
Wipp. 7	42	3	3	,438	3	,999	2,716	-2,287	-1,976	2,533
Wipp. 8	43	3	3	,615	3	,988	1,799	-1,121	,300	1,398
Wipp. 9	44	3	3	,136	3	1,000	5,549	-2,729	-,301	3,379
Wipp. 10	45	3	3	,572	3	,998	2,004	-2,869	-,505	1,448
Wipp. 11	46	3	3	,843	3	,999	,825	-1,768	-,713	2,302
Wipp. 12	47	3	3	,868	3	,997	,724	-1,228	-,857	2,249
Wipp. 13	48	3	3	,683	3	,930	1,495	-1,888	-,641	,342
Wipp. 14	49	3	3	,988	3	,984	,130	-1,492	-1,311	1,585
Wipp. 15	50	3	3	,795	3	,993	1,025	-1,033	-1,343	2,262
Witt. 1	51	4	4	,857	3	,999	,769	-1,601	2,234	-,773
Witt. 2	52	4	4	,309	3	1,000	3,591	-1,968	2,008	-2,179
Witt. 3	53	4	4	,675	3	1,000	1,533	-1,987	2,698	-1,746
Witt. 4	54	4	4	,355	3	,928	3,245	-1,792	1,840	,862
Witt. 5	55	4	4	,364	3	1,000	3,187	-,792	4,119	-1,012
Witt. 6	56	4	4	,235	3	1,000	4,254	-,339	3,956	,017
Witt. 7	57	4	4	,486	3	,996	2,440	-2,562	1,538	-,974
Witt. 8	58	4	3	,047	3	,664	7,935	-3,674	,726	,782
Witt. 9	59	4	4	,006	3	1,000	12,331	-4,919	4,973	-,466
Witt. 10	60	4	4	,551	3	1,000	2,107	-1,518	4,293	-,644
Witt. 11	61	4	4	,934	3	1,000	,428	-2,593	3,226	-,774
Witt. 12	62	4	4	,021	3	1,000	9,775	-,574	5,604	-1,266

Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken (mit Grund)

	Fallnummer	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe					Diskriminanzwerte		
			Vorhergesagte Gruppe	P(D>d | G=g)		P(G=g | D=d)	Quadrierter Mahalanobis-Abstand zum Zentroid	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
				P	Df					
Witt. 13	63	4	4	,432	3	1,000	2,747	-2,466	4,115	,566
Witt. 14	64	4	3	,094	3	,490	6,398	-2,445	,449	-,418
Witt. 15	65	4	4	,847	3	,998	,809	-1,541	2,434	-,001
Grund 1	66	ungruppiert	1	,003	3	,991	13,718	4,159	-1,005	-2,775
Grund 2	67	ungruppiert	2	,000	3	,995	18,607	2,978	-2,246	-3,865
Grund 3	68	ungruppiert	4	,059	3	,996	7,446	,476	3,200	-1,533
Grund 4	69	ungruppiert	2	,085	3	,999	6,633	-1,863	-2,873	-2,720
Grund 5	70	ungruppiert	2	,002	3	,950	14,613	2,860	-1,638	-3,159

E5.2.2 Alle Variablen, zwei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken auf beiliegender CD

E5.2.3 Sechs Variablen (TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu), zwei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken auf beiliegender CD

E5.2.4 Schrittweise Diskriminanzanalyse (K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu), zwei Diskriminanzfunktionen: fallweise Statistiken auf beiliegender CD

E5.3 Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten (nicht standardisiert)

Alle Variablen, zwei und drei Diskriminanzfunktionen: kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten

	Funktion		
	1	2	3
TiO_2	-6176,371	14759,730	1160,545
Al_2O_3	365,490	-550,538	-1232,429
Fe_2O_3	-689,767	485,207	1272,325
MnO	-54325,019	-127739,120	-131969,961
MgO	5631,162	-8169,050	3745,752
CaO	1252,163	316,554	-3037,951
Na_2O	-2564,696	1265,696	866,213
K_2O	-10102,543	31138,677	-7301,199
P_2O_5	7841,834	-2337,062	6181,859
LOI	1009,847	-259,338	-420,735
Ba	152079,791	63502,863	79094,142
Cr	-9040,942	23451,710	-19898,059
Ni	-51946,353	39312,209	98660,176
Rb	-484088,135	-158277,226	-515366,543
Sr	-235025,662	-331496,349	441745,200
V	107803,811	89710,498	485213,742
Eu	29786464,074	-7656740,226	-22067113,720
Sm	-1824940,790	1035073,419	1677221,821
Yb	137014,997	-1821390,178	-1477154,232
(Konstant)	-4,595	-4,327	-,943

Nicht-standardisierte Koeffizienten

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanzfunktionen: kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**

	Funktion	
	1	2
K_2O	1414,322	24563,326
LOI	1016,223	-632,440
Ba	145289,747	-41000,878
Ni	-29539,674	76709,021
Eu	4635129,627	-199415,756
TiO_2	-7275,843	19172,902
(Konstant)	-5,961	-3,183

Nicht-standardisierte Koeffizienten

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*), **zwei Diskriminanzfunktionen: Kanonische Diskriminanzkoeffizienten (nicht standardisiert)**

	Funktion	
	1	2
K_2O	2339,394	29949,350
LOI	1005,299	-672,695
Ba	144341,654	-55532,992
Cr	1215,007	25545,126
Ni	-25284,602	38543,606
Eu	4449466,513	78866,363
(Konstant)	-6,620	-2,753

Nicht-standardisierte Koeffizienten

E5.4 Standardisierte Diskriminanzfunktionskoeffizienten

Für die standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten werden die Werte jeder Variablen so transformiert, dass sie einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 aufweisen. Aus den standardisierten Koeffizienten lassen sich Rückschlüsse auf den Erklärungsbeitrag der einzelnen Variablen ableiten (Brosius 2011, 662).

Alle Variablen, zwei und drei Diskriminanzfunktionen: Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten

	Funktion		
	1	2	3
TiO_2	-,079	,189	,015
Al_2O_3	,103	-,155	-,346
Fe_2O_3	-,195	,137	,360
MnO	-,239	-,563	-,582
MgO	,176	-,255	,117
CaO	,233	,059	-,565
Na_2O	-,436	,215	,147
K_2O	-,377	1,163	-,273
P_2O_5	,248	-,074	,196
LOI	,518	-,133	-,216
Ba	,759	,317	,395
Cr	-,184	,478	-,406
Ni	-,427	,323	,811
Rb	-,325	-,106	-,346
Sr	-,265	-,374	,499
V	,128	,106	,575
Eu	4,463	-1,147	-3,307
Sm	-3,577	2,029	3,288
Yb	,015	-,200	-,162

Standardisierte Koeffizienten

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Funktionen: standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**

	Funktion	
	1	2
K_2O	,053	,918
LOI	,521	-,324
Ba	,725	-,205
Ni	-,243	,630
Eu	,695	-,030
TiO_2	-,093	,245

Standardisierte Koeffizienten

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*) für zwei Diskriminanzfunktionen: standardisierte kanonische Diskriminanz-funktionskoeffizienten

	Funktion	
	1	2
K_2O	,087	1,119
LOI	,516	-,345
Ba	,721	-,277
Cr	,025	,521
Ni	-,208	,317
Eu	,667	,012

Standardisierte Koeffizienten

E5.5 Gemeinsame Korrelationen: Strukturmatrix

Die Strukturmatrix zeigt gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen von Hornsteinen (im Wesentlichen die Fundorte) zwischen Diskriminanzvariablen und kanonisierten Diskriminanzfunktionen (1 bis 3 beziehungsweise 1 und 2) nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktionen geordnet auf.
Hellblau markiert sind die jeweils größten absoluten Korrelationen zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion.

Alle Variablen, drei Diskriminanzfunktionen: gemeinsame Korrelationen: Strukturmatrix

	Funktion		
	1	2	3
Ba	,528	,218	-,053
Cr	-,255	,105	-,056
P_2O_5	,232	,066	-,004
CaO	,227	-,063	-,139
MgO	,145	,111	-,071
K_2O	-,016	,650	-,302
TiO_2	-,102	,338	-,170
LOI	,230	,329	-,093
Al_2O_3	,017	,306	-,270
Sm	,254	,303	,261
Eu	,257	,302	,255
MnO	-,060	,282	,274
Sr	,157	,183	,078
Na_2O	,061	,157	-,073
Fe_2O_3	-,048	,212	,506
Ni	-,230	,263	,419
Rb	,009	,092	-,358
V	-,091	,063	,287
Yb	,258	-,013	-,264

Alle Variablen, zwei Diskriminanzfunktionen: gemeinsame Korrelationen: Strukturmatrix

	Funktion	
	1	2
Ba	,528*	,218
Yb	,258*	-,013
Cr	-,255*	,105
P_2O_5	,232*	,066
CaO	,227*	-,063
MgO	,145*	,111
V	-,091*	,063
K_2O	-,016	,650*
TiO_2	-,102	,338*
LOI	,230	,329*
Al_2O_3	,017	,306*
Sm	,254	,303*
Eu	,257	,302*
MnO	-,060	,282*
Ni	-,230	,263*
Fe_2O_3	-,048	,212*
Sr	,157	,183*
Na_2O	,061	,157*
Rb	,009	,092*

*. Größte absolute Korrelation zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion

Gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen zwischen Diskriminanzvariablen und standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen, Variablen sind nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktion geordnet.

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanzfunktionen: gemeinsame Korrelationen: Strukturmatrix**

	Funktion	
	1	2
Ba	,643*	-,130
Eu	,419*	,147
LOI	,407*	,196
K_2O	,338	,715*
Ni	-,086	,441*
TiO_2	,083	,437*

*. Größte absolute Korrelation zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion

Gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen zwischen Diskriminanzvariablen und standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen, Variablen sind nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktion geordnet.

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanzfunktionen: gemeinsame Korrelationen: Stukturmatrix**

	Funktion	
	1	2
Ba	,635*	-,170
Sm[a]	,430*	,083
Eu	,426*	,092
LOI	,419*	,155
Sr[a]	,398*	,156
Na_2O[a]	,246*	-,137
Rb[a]	,191*	,059
P_2O_5[a]	,159*	,116
Yb[a]	,152*	-,029
CaO[a]	,105*	-,083
K_2O	,382	,652*
Al_2O_3[a]	,203	,463*
Ni	-,061	,398*
MnO[a]	,270	,358*
TiO_2[a]	,176	,351*
Cr	-,178	,288*
MgO[a]	,141	,196*
Fe_2O_3[a]	,082	,176*
V[a]	-,085	,141*

*.Größte absolute Korrelation zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion
a. Diese Variable wird in der Analyse nicht verwendet.

Gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen zwischen Diskriminanzvariablen und standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen, Variablen sind nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktion geordnet.

E5.6 Funktionen bei den Gruppenzentroiden

Alle Variablen, zwei oder drei Diskriminanzfunktionen: Funktionen bei den Gruppenzentroiden

Fundort	Funktion		
	1	2	3
Arnhofen	3,779	1,087	,258
Borgerhau	-,145	-2,295	-,890
Wippingen	-1,534	-,974	1,464
Wittlingen	-2,051	2,948	-,535

Nicht-standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen, die bezüglich des Gruppen-Mittelwertes bewertet werden

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanz-funktionen: Funktionen bei den Gruppenzentroiden**

Fundort	Funktion	
	1	2
Arnhofen	3,337	-,679
Borgerhau	-1,196	-1,498
Wippingen	-1,627	-,124
Wittlingen	-,116	2,800

Nicht-standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen, die bezüglich des Grup-pen-Mittelwertes bewertet werden

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*)**, zwei oder drei Diskriminanzfunktionen: Funktionen bei den Gruppenzentroiden**

Fundort	Funktion	
	1	2
Arnhofen	3,258	-,979
Borgerhau	-1,298	-1,365
Wippingen	-1,654	-,264
Wittlingen	,127	3,063

Nicht-standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen, die bezüglich des Grup-pen-Mittelwertes bewertet werden

E5.7 Eigenwerte und Wilk's Lambda

Alle Variablen, zwei und drei Diskriminanzfunktionen: Wilk's Lambda

Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1 bis 3	,016	216,576	57	,000
2 bis 3	,099	121,364	36	,000
3	,534	32,951	17	,011

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanzfunktionen: Eigenwert**

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	3,861[a]	56,1	56,1	,891
2	2,781[a]	40,4	96,5	,858
3	,240	3,5	100,0	,440

a. Die ersten 2 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden in dieser Analyse verwendet.
b. Maximale Anzahl der Funktionen ist 2.

Sechs Variablen (*TiO_2, K_2O, LOI, Ba, Ni, Eu*)**, zwei Diskriminanzfunktionen: Wilk's Lambda**

Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1 bis 3	,044	184,438	18	,000
2 bis 3	,213	91,146	10	,000
3	,807	12,676	4	,013

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*), **zwei Diskriminanzfunktionen: Eigenwert**

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	3,839[a]	52,1	52,1	,891
2	3,171[a]	43,0	95,1	,872
3	,363	4,9	100,0	,516

a. Die ersten 2 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden in dieser Analyse verwendet.
b. Maximale Anzahl der Funktionen ist 2.

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*), **zwei Diskriminanzfunktionen : Wilks Lambda**

Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	Df	Signifikanz
1 bis 3	,036	195,559	18	,000
2 bis 3	,176	102,535	10	,000
3	,734	18,275	4	,001

E5.8 Schrittweise Diskriminanzanalyse

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*)**: Variablen in der Analyse**

Schritt		Toleranz	F-Wert für den Ausschluß	Wilks-Lambda
1	***K_2O***	1,000	39,316	
2	***K_2O***	,972	35,872	,378
	Ba	,972	30,359	,341
3	***K_2O***	,963	33,529	,237
	Ba	,951	25,817	,203
	Eu	,963	10,658	,135
4	***K_2O***	,809	42,780	,194
	Ba	,951	19,572	,122
	Eu	,959	10,454	,093
	Cr	,825	8,759	,088
5	***K_2O***	,799	37,538	,138
	Ba	,947	17,352	,089
	Eu	,924	8,818	,068
	Cr	,636	5,730	,061
	Ni	,720	5,675	,060
6	***K_2O***	,640	31,658	,098
	Ba	,935	14,670	,065
	Eu	,900	9,239	,054
	Cr	,633	5,042	,046
	Ni	,669	6,778	,050
	LOI	,709	5,226	,047

Schrittweise Diskriminanzanalyse (*K_2O, LOI, Ba, Cr, Ni, Eu*)**: Schrittweise Statistik**

Schritt	Aufgenommen	Wilks-Lambda											
						Exaktes F				Näherungsweises F			
		Statistik	df1	df2	df3	Statistik	df1	df2	Signifikanz	Statistik	df1	df2	Signifikanz
1	***K_2O***	,341	1	3	61,000	39,316	3	61,000	,000				
2	***Ba***	,135	2	3	61,000	34,356	6	120,000	,000				
3	***Eu***	,088	3	3	61,000					27,425	9	143,741	,000
4	***Cr***	,060	4	3	61,000					24,195	12	153,745	,000
5	***Ni***	,047	5	3	61,000					21,436	15	157,753	,000
6	***LOI***	,036	6	3	61,000					19,666	18	158,877	,000

Bei jedem Schritt wird die Variable aufgenommen, die das gesamte Wilks-Lambda minimiert.

a. Maximale Anzahl der Schritte ist 38.
b. Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3.84.
c. Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluß ist 2.71.
d. F-Niveau, Toleranz oder VIN sind für eine weitere Berechnung unzureichend.

E6 Clusteranayse

E6.1 ANOVA der Clusterzentrenanalyse

ANOVA

	Cluster		Fehler		F	Sig.
	Mittel der Quadrate	df	Mittel der Quadrate	df		
TiO_2	0,00000000057146	3	0,00000000022094	58	2,586	,062
Fe_2O_3	0,00000093949741	3	0,00000007030201	58	13,364	,000
MnO	0,00000000007785	3	0,00000000002377	58	3,275	,027
MgO	0,00000000207209	3	0,00000000104753	58	1,978	,127
CaO	0,00000003895836	3	0,00000003999085	58	,974	,411
Na_2O	0,00000007982733	3	0,00000002983178	58	2,676	,055
K_2O	0,00000003303569	3	0,00000000250038	58	13,212	,000
P_2O_5	0,00000000274997	3	0,00000000120745	58	2,277	,089
LOI	0,00000750891054	3	0,00000006485032	58	115,788	,000
Ba	0,00000000029134	3	0,00000000005209	58	5,593	,002
Cr	0,00000000054497	3	0,00000000054039	58	1,008	,396
Ni	0,00000000019454	3	0,00000000010267	58	1,895	,141
Rb	0,00000000000039	3	0,00000000000051	58	,758	,522
V	0,00000000000494	3	0,00000000000135	58	3,654	,018
Eu	0,00000000000012	3	0,00000000000003	58	3,552	,020
Yb	0,00000000000005	3	0,00000000000002	58	3,024	,037

Die F-Tests sollten nur für beschreibende Zwecke verwendet werden, da die Cluster so gewählt wurden, dass die Differenzen zwischen Fällen in unterschiedlichen Clustern maximiert werden. Dabei werden die beobachteten Signifikanzniveaus nicht korrigiert und können daher nicht als Tests für die Hypothese der Gleichheit der Clustermittelwerte interpretiert werden.

E6.2 Verarbeitete Fälle in der Clusteranalyse

Clusteranalyse: Verarbeitete Fälle

Fälle					
Gültig		Fehlende Werte		Insgesamt	
N	Prozent	N	Prozent	N	Prozent
62	100,0%	0	,0%	62	100,0%

a. Quadrierte Euklidische Distanz wurde verwendet

E6.3 Auf der Basis der quadrierten euklidischen Distanz erstellte Näherungsmatrix auf beiliegender CD

E6.4 Agglomerationsschritte der Clusteranalyse

Zuordnungsübersicht

Schritt	Zusammengeführte Cluster		Koeffizienten	Erstes Vorkommen des Clusters		Nächster Schritt
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
1	35	36	,674	0	0	28
2	26	30	1,484	0	0	28
3	21	28	2,336	0	0	13
4	8	10	3,217	0	0	22
5	45	46	4,118	0	0	20
6	41	43	5,151	0	0	39
7	20	27	6,380	0	0	13
8	18	19	7,728	0	0	14
9	44	48	9,220	0	0	10
10	44	47	10,835	9	0	20
11	24	25	12,636	0	0	15
12	22	23	14,543	0	0	29
13	20	21	16,701	7	3	30
14	16	18	18,888	0	8	30
15	24	29	21,440	11	0	34
16	32	33	24,064	0	0	32
17	38	39	27,126	0	0	24
18	50	51	30,286	0	0	46
19	53	54	33,454	0	0	37
20	44	45	36,737	10	5	35
21	13	14	40,073	0	0	33
22	8	9	43,708	4	0	53
23	4	5	47,430	0	0	33
24	37	38	51,169	0	17	32
25	59	61	55,053	0	0	31
26	3	6	58,992	0	0	45
27	57	58	62,943	0	0	39
28	26	35	67,247	2	1	34
29	22	34	71,737	12	0	38
30	16	20	77,352	14	13	38
31	59	62	83,308	25	0	50
32	32	37	89,504	16	24	41
33	4	13	95,735	23	21	43
34	24	26	102,160	15	28	42
35	40	44	109,318	0	20	41
36	15	49	116,991	0	0	58
37	52	53	125,209	0	19	47
38	16	22	134,011	30	29	48
39	41	57	143,038	6	27	44
40	1	2	152,259	0	0	43
41	32	40	162,199	32	35	55

Zuordnungsübersicht

Schritt	Zusammengeführte Cluster		Koeffizienten	Erstes Vorkommen des Clusters		Nächster Schritt
	Cluster 1	Cluster 2		Cluster 1	Cluster 2	
42	24	31	172,796	34	0	48
43	1	4	184,224	40	33	45
44	41	56	196,356	39	0	51
45	1	3	210,259	43	26	53
46	50	55	224,434	18	0	47
47	50	52	239,367	46	37	50
48	16	24	255,121	38	42	49
49	16	17	271,853	48	0	60
50	50	59	288,619	47	31	56
51	41	60	306,371	44	0	56
52	7	12	329,985	0	0	54
53	1	8	354,892	45	22	57
54	7	11	389,259	52	0	57
55	32	42	426,524	41	0	59
56	41	50	468,584	51	50	59
57	1	7	513,160	53	54	58
58	1	15	565,676	57	36	60
59	32	41	626,378	55	56	61
60	1	16	764,747	58	49	61
61	1	32	915,000	60	59	0

E6.5 Ergebnis der Clusteranalyse

Cluster-Zugehörigkeit

Fall	4 Cluster	3 Cluster	2 Cluster
1: Arnh.01	1	1	1
2: Arnh.02	1	1	1
3: Arnh.03	1	1	1
4: Arnh.04	1	1	1
5: Arnh.05	1	1	1
6: Arnh.06	1	1	1
7: Arnh.07	1	1	1
8: Arnh.08	1	1	1
9: Arnh.09	1	1	1
10:Arnh.10	1	1	1
11:Arnh.11	1	1	1
12:Arnh.12	1	1	1
13:Arnh.13	1	1	1
14:Arnh.14	1	1	1
15:Arnh.15	1	1	1

Cluster-Zugehörigkeit

Fall	4 Cluster	3 Cluster	2 Cluster
16:Borg.01	2	2	1
17:Borg.02	2	2	1
18:Borg.03	2	2	1
19:Borg.04	2	2	1
20:Borg.05	2	2	1
21:Borg.06	2	2	1
22:Borg.07	2	2	1
23:Borg.08	2	2	1
24:Borg.09	2	2	1
25:Borg.11	2	2	1
26:Borg.12	2	2	1
27:Borg.13	2	2	1
28:Borg.14	2	2	1
29:Borg.15	2	2	1
30:Borg.16	2	2	1
31:Borg.17	2	2	1
32:Borg.18	3	3	2
33:Borg.19	3	3	2
34:Borg.20	2	2	1
35:Wipp.02	2	2	1
36:Wipp.03	2	2	1
37:Wipp.04	3	3	2
38:Wipp.05	3	3	2
39:Wipp.06	3	3	2
40:Wipp.07	3	3	2
41:Wipp.08	4	3	2
42:Wipp.09	3	3	2
43:Wipp.10	4	3	2
44:Wipp.11	3	3	2
45:Wipp.12	3	3	2
46:Wipp.13	3	3	2
47:Wipp.14	3	3	2
48:Wipp.15	3	3	2
49:Witt.01	1	1	1
50:Witt.02	4	3	2
51:Witt.03	4	3	2
52:Witt.04	4	3	2
53:Witt.05	4	3	2
54:Witt.06	4	3	2
55:Witt.07	4	3	2
56:Witt.08	4	3	2
57:Witt.09	4	3	2
58:Witt.10	4	3	2
59:Witt.11	4	3	2

Cluster-Zugehörigkeit

Fall	4 Cluster	3 Cluster	2 Cluster
60:Witt.12	4	3	2
61:Witt.13	4	3	2
62:Witt.15	4	3	2

Katalog

Er enthält Einzelbeschreibungen und -farbbestimmungen der 75 untersuchten Hornsteine.

Alle Hornsteine wurden mehrfach farblich sortiert: nach der Farbe des patinierten Cortex, der sichtbaren Hornsteinfarbe am unveränderten Rohmaterial und nach der Sägeschnittfarbe; ferner wurden die jeweiligen Farbgrenzen, z. B. zwischen WH, GR, YG, YB, festgelegt. Außerdem wurden die Farbwechsel und die Verteilung der Inhomogenitäten verglichen. Aus diesen und weiteren ermittelten Daten entstand das Übersichtsblatt A2 im Anhang.

Alle Fotos - außer den mit Abbildungsnachweis versehenen - stammen von der Autorin.

Katalogverzeichnis

I Abkürzungen in den Hornsteinbeschreibungen 298

II Fundort Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim 300

III Fundstelle Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis 326

IV Fundstelle Wippingen „Höfermahd“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis 380

V Fundort Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen 414

VI Fundstelle Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis ... 446

VII Fundorte in Ungarn 456

I Abkürzungen in den Hornsteinbeschreibungen

(verändert nach Fisher 2007[23])

Abkürzung	Deutsch	Englisch
RM	**Rohmaterialart**	**Raw material type**
JC	weißer oder grauer Jurahornstein	white or gray chert
BC	brauner, ocker- oder beigefarbener Jurahornst.	brown, yellow-brown or beige Jura chert
KC	Keuperhornstein	Keuper chert
MC	Muschelkalkhornstein	Muschelkalk chert
TC	Bayrischer Plattenhornstein	Bavarian tabular chert
TRC	Triashornstein	Trias chert
UK	Unbestimmtes Rohmaterial	other material, not identifiable
GF	**Rohmaterialform**	**Type of raw material block**
TB	Plattenhornstein	tabular chert
ND	Knolle	nodule
FN	Fladen	flat nodule
IN	nicht bestimmbar	indeterminate
BT	**Artefakt-Grundform**	**Blank type**
CO	Kern oder Kernfragment mit > 3 Abschlags-negativen	core with more than 3 flake scars
FL	Abschlag	flake
BL	Klinge	blade
SH	Trümmer (keine Ventralfläche)	shatter (no ventral face)
NSH	natürlicher Trümmer (kein Artefakt)	natural shatter, non-artifact
TSH	getestete Knolle mit ≤ 3 Abschlagsnegativen	tested nodule with ≤ 3 flake scars
COR	**Cortexart**	**Corttype**
FR	rauer Cortex	“fresh” chert cortex
TH	glatter Cortex	cortex smoothed
AB	Cortex fehlend	cortex absent
COT	**Cortexdicke**	**Cortex thickness**
1	sehr dünner Cortex, < 1 mm	very thin cortex, < 1 mm
2	Cortex bis 2 mm dick	Cortex to 2 mm thickness
3	Cotex bis 5 mm dick	Cortex to 5 mm thickness
4	Cortex bis 10 mm dick	Cortex to 10 mm thickness
5	Cortex bis 16 mm dick	Cortex to 16 mm thickness
6	Cortex bis 28 mm dick	Cortex to 28 mm thickness

[23] L. Fisher (2007), Analysis of Survey Finds 2006/2007: Detaillierte Aufnahme.

Abkürzung	Deutsch	Englisch
COE	**Cortexausbreitung**	**Cortex extent**
0	keine	no Cortex
1	< 50 %	< 50 %
2	≥ 50 %	≥ 50 %
3	100 %	100 %
COC	**Cortexfarbe**	**Cortex color**
W	weißlich bis sehr hellgrau	white to very light gray
G	beige-grau	yellow-gray
B	beige bis braun	very pale brown to brown
Y	gelblich bis ocker-orange	yellow to reddish yellow
CL	**Hornsteinfarbe**	**Chert color**
WH	weißlich bis sehr hellgrau	white to light gray
GR	hell- bis dunkelgrau	medium to dark gray
YG	beige-grau	yellow-gray
YB	ocker bis rotbraun	yellow to brown
	Musterung	**Pattern**
CB	konzentrisch gebändert	concentric banding
PB	parallel gebändert	parallel banding
SM	schlierig/marmoriert	smeary/marbled
IN	nicht bestimmbar	indeterminate
CC	**Farbwechsel**	**Color change**
od	Richtung Rinde dunkler werdend	direction cortex more dark
md	Richtung Zentrum dunkler werdend	direction centrum more dark
IC	**Einschlüsse**	**Inclusions**
INH	Inhomogenitäten	inhomogeneity
FOS	Fossilien	fossils
SPN	Schwammnadeln	sponges spicules
PA	**Patinierung**	**Patination**
GL	**Lackglanz**	**Lack gloss**
QU	**Qualität**	**Quality**
1	sehr feinkörnig, glänzend	very fine-grained /shiny, lustrous
2	feinkörnig, glatt	fine-grained, smooth break surface
3	mittelkörnig, matt bis leicht körnig	medium-grained, matte to slightly grainy
4	grobkörnig, Bruchfläche rau	coarse-grained, fracture surface rough
5	heterogen, > 20 % fällt in 2 oder mehr Gruppen	inhomogen, > 20 % fall into 2 or more groups
6	kein muscheliger Bruch	no conchoidal break
9	unbestimmbar	unable to determine

II Fundort Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim

Arnh. 1 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: H. Floss

Größter Durchmesser: 75 mm
Gewicht: 72 g

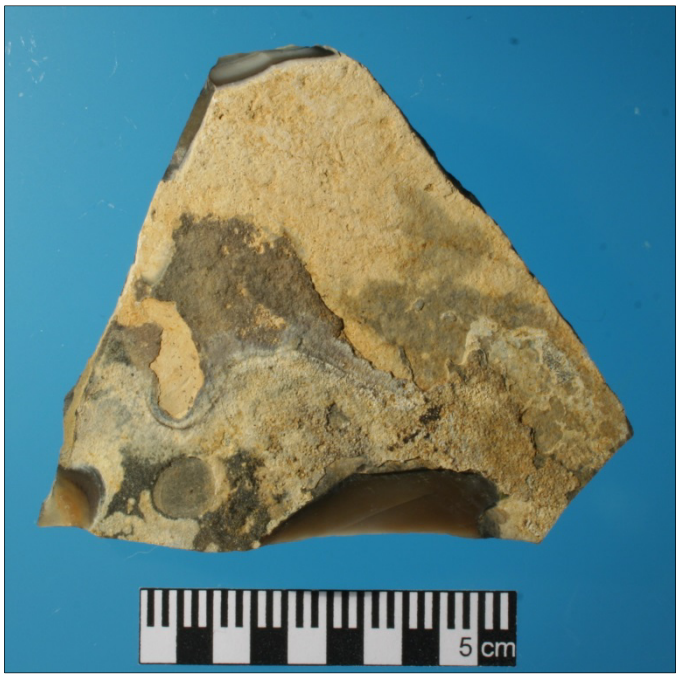


Abb. 1 Arnh. 1: Zweite Cortexseite.

Grundform: Trapezförmiger getesteter Trümmer (TSH) von Plattenhornstein (TC) aus dem Jura; 11 mm dick; mit vier Bruchflächen und drei Abschlagsnegativen (vermutlich zeitnah intentional)

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt die gesamte Ober- und Unterseite (3, 100 %) mit Ausnahme der Abschläge; < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: zwei unterschiedliche Seiten: weißlich (10YR 8/1 white) über grau (5Y 6/1 gray) bis braun (10YR 6/4 bis 5/4 light yellowish brown bis yellowish brown) auf der 1. Seite, auf der 2. Seite (Abb. 1) ockerfarben (10YR 8/3 bis 8/4 very pale brown) mit grauen, raueren Auflagerungen (10YR 5/1 gray), die zum Teil wiederum von ockerfarbenem Cortex bedeckt sind; wenige schwarze Punkte (10YR 2/1 black), wohl von Mangan; im Anschnitt weißlich



Abb. 2 Arnh. 1: Bruchfläche zweite Cortexseite oben.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR); rindenparallel gebändert (PB), mittig dunkler (md); einzelne Farben: ca. 9 Schichten weißlich (GLEY1 8/N white), überwiegend hellgrau (GLEY1 7/N light gray) und mittelgrau (GLEY1 5/N gray), ferner dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray), direkt unter der Rinde auf beiden Seiten auch bräunlich-grau (10YR 5/2 grayish brown) (Abb. 1 unten), was durch den Sägeschnitt (Abb. 3) bestätigt wurde

Sägeschnitt: insgesamt mittelgrau (GR); bläulicher als erwartet (GLEY2 7/5PB bis 6/5PB light bluish gray bis bluish gray)



Abb. 3 Arnh. 1: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): auf drei Bruchflächen weißlich (5Y 8/1 white), ferner grau (GLEY2 4/5B dark bluish gray) und bräunlich (10YR 5/3 bis 4/3 brown).

Arnh. 2 – Dunkelgrauer, sehr fein- bis mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: H. Floss

Größter Durchmesser: 67 mm
Gewicht: 69 g



Abb. 1 Arnh. 2: Zweite Cortexseite.

Grundform: etwa quaderförmiger getesteter Trümmer (TSH) eines Plattenhornsteins (TC) aus dem Jura; ≤ 20 mm dick; mit vier Bruchflächen und drei Abschlagsnegativen oder Teilen davon auf dem Cortex (vermutlich zeitnah intentional)

Cortex: außen rau (FR); bedeckt die gesamte Ober- und Unterseite (3, 100 %) mit Ausnahme der Abschläge; < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ockerorange (Y); einzelne Farben: zwei unterschiedliche Seiten: 1. Seite stark verwittert, hellbeige (10YR 8/1 white) bis ocker (10YR very pale brown) mit fleckigen Stellen in orange (7.5YR 7/8 bis 6/8 reddish yellow) und einer in braun (7.5YR 4/3 brown), 2. Seite (Abb. 1) ocker (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) bis braun (7.5YR 5/4 brown); im Anschnitt beige (10YR 8/2 very pale brown)



Abb. 2 Arnh. 2: Bruchfläche, erste Cortexseite oben.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); rindenparallel gebändert (PB), oben und unten dunkler (od); einzelne Farben: drei gut unterscheidbare Bänder, das oberste und unterste dunkelgrau (GLEY1 4/N bis 3/N dark gray bis very dark gray), im obersten Band (in Abb. 2) sind ca. 5 parallele Streifen unterscheidbar, mittleres Band mit sehr heterogenen Bereichen: grau (GLEY1 4/N dark gray), hellbeige (10YR 8/1 white), ocker (7.5YR 8/6 bis 7/6 reddish yellow), wenig dunkelgrau (GLEY1 3N very dark gray); braune Ablagerungen (7.5YR 5/4 bis 5/6 brown bis strong brown) auf einer Bruchfläche



Abb. 3 Arnh. 2: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3, gedreht): insgesamt dunkelgrau (GR); einzelne Farben heller und bläulicher: leicht bläuliches grau (GLEY2 5/5PB bis 4/5PB bluish gray bis dark bluish gray), weißlich (7.5YR 8/1 white)

Einschlüsse: makroskopisch keine, unter der Lupe wenige Schwammnadeln in den dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: dunkelgraue Bänder sehr feinkörnig, glänzend (QU 1), mittleres Band heterogen: feinkörnig, glatt (QU 2) im grauen und beigefarbenen Bereich, mittelkörnig, matt, kein muscheliger Bruch (QU 6) im ockerfarbenen Bereich (Abb. 2); insgesamt QU 3

Patinierung (PA)**:** ocker (7.5YR 7/6 reddish yellow) bis bräunlich (7.5YR 5/4 brown).

Arnh. 3 – Dunkelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: H. Floss

Größter Durchmesser: 60 mm
Gewicht: 39 g



Abb. 1 Arnh. 3: Cortexseite.

Grundform *(Abb. 1):* Getesteter Trümmer (TSH) eines Plattenhornsteins (TC) aus dem Jura mit dem ungefähren Grundriss eines Parallelogramms; ≤ 15 mm dick; mit fünf Bruchflächen und drei Abschlagsnegativen (vermutlich zeitnah intentional)

Cortex *(Abb. 1):* außen rau (FR); bedeckt die gesamte Ober- und Unterseite (3, 100 %) mit Ausnahme der Abschläge; < 2 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: zwei unterschiedliche Seiten: 1. Seite (Abb. 1) mit dickerem Cortex ockerfarben (10YR 8/4 bis 7/4 very pale brown), fast mittig etwas orangefarbener Fleck (5YR 6/6 reddish yellow) von ≤ 6 mm Durchmesser; verstreut kleinere dunkelbraune Flecken (7.5YR 4/3 brown) und schwarze punktförmige Strukturen (7.5YR 2.5/1 black), 2. Seite mit sehr dünnem Cortex, teilweise angeschlagen, dort weißlich, etwas heller ockerfarben (10YR 8/3 bis 7/3 very pale brown), bräunliche Flecken (7.5YR 4/3 brown) und gräuliche Strukturen (10YR 5/1 gray); im Anschnitt weißlich (5Y 8/1 white)

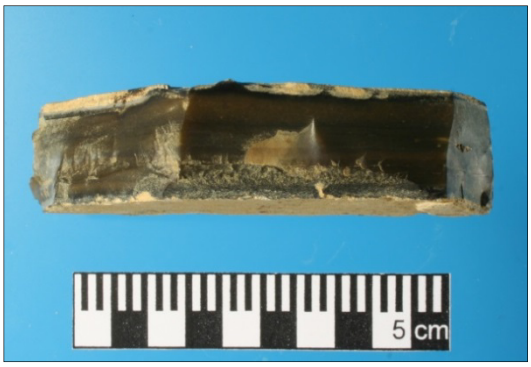


Abb. 2 Arnh. 3: Bruchfläche.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); rindenparallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: mindestens vier gut unterscheidbare Bänder, das oberste und dritte bräunlich (10YR 4/1 bis 4/2 dark gray bis dark grayish brown) (Abb. 2 links), das zweite und das unterste im Plattenquerschnitt dunkler (10YR 3/1 very dark gray), im zweiten Band vier parallele Streifen unterscheidbar, teilweise dünne weißliche Schicht von < 1 mm Dicke in Schicht 2

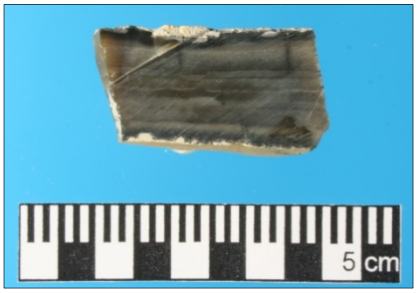


Abb. 3 Arnh. 3: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); heller und bläulicher als die Bruchkante und mehr deutlich unterscheidbare Schichten; einzelne Farben: Schicht 1 dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray), Schicht 2 hell bläulichgrau (GLEY1 6/N gray), Schicht 3 mit vier parallelen Streifen in verschiedenen Grautönen (GLEY1 5/N, 4/N und 3/N gray, dark gray, very dark gray), Schicht 4 bläulichgrau bis grau (GLEY1 5/N bis 4/N gray bis dark gray), Schicht 5 hellbläulichgrau (GLEY1 6/N gray), Schicht 6 dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray)

Einschlüsse: makroskopisch keine, unter der Lupe wenige Schwammnadeln in den dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): zwei Bruchflächen ganz**,** drei Bruchflächen nur teilweise gräulich-beige (10YR 6/3 pale brown).

Arnh. 4 – Dunkelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: H. Floss

Größter Durchmesser: 66 mm
Gewicht: 51 g

Grundform (Abb. 1)**:** Getesteter Trümmer (TSH) eines Plattenhornsteins (TC) aus dem Jura mit dem ungefähren Grundriss eines Trapezes (Abb. 1); ≤ 15 mm dick; mit vier Bruchflächen, eine davon evtl. rezent (Abb. 2) und drei Abschlagsnegativen (vermutlich zeitnah intentional)



Abb. 1 Arnh. 4: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt nur eine Oberfläche (2 , ≥ 50 %) des Plattenhornsteins; < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: erhaltener, teilweise bandförmiger, dickerer Cortex ockerfarben (10YR 8/4 bis 8/6 very pale brown bis yellow) (Abb. 1 oben); mit bläulich-grauen Auflagerungen (GLEY1 6/N bis 5/N light gray bis gray) (Abb. 1 mittleres Band), Mitte und unten Cortex dünn, gräulich und beige gefleckt (10YR 8/4 bis 7/4 very pale brown); unterschiedlich große, ≤ 7 mm, dunkelgraue bis schwarze Flecken (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (5Y 8/1 white)



Abb. 2 Arnh. 4: Bruchfläche.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); rindenparallel gebändert (PB), oben und unten dunkler (od); einzelne Farben: mindestens sechs gut unterscheidbare Bänder, das oberste dunkelgrau (10 YR 3/1 very dark gray), das folgende in verschiedenen bläulichen Grauabstufungen (GLEY1 5/N bis 3/N gray, dark gray bis very dark gray), das dritte und fünfte und unterste bräunlichgrau (10YR 4/2 dark grayish brown), das vierte weißlich (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray), teilweise mit Mittelstreifen

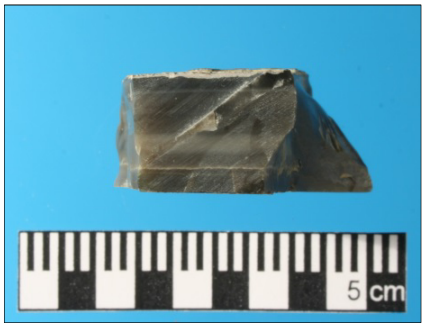


Abb. 3 Arnh. 4: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt dunkelgrau (GR) wie die Bruchfläche, vielleicht eine Spur heller und bläulicher

Einschlüsse: makroskopisch keine; mit Lupe und im Dünnschliff wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern (Abb. 4)

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)



Abb. 4 Arnh. 4: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop mit einer Schwammnadel (oben Mitte links) (gesamter Maßstab 1 mm).

Patinierung (PA): zwei Seiten patiniert, eine Seite gräulich (10YR 4/1 dark gray), eine zweite weißlich und ocker (10YR 8/3 very pale brown), ferner die untere Bruchfläche großfleckig hellgrau (GLEY1 7/N light gray), dunkelgrau (10YR 4/1 dark gray), beige bis ocker (10YR 8/3 very pale brown) mit weißlichen (10YR 8/1 white) und schwarzgrauen (10YR 3/1 very dark gray) Punkten.

Arnh. 5 – Dunkelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: H. Floss

Größter Durchmesser: 62 mm
Gewicht: 83 g

Grundform (Abb. 1)**:** Kern (CO) eines Plattenhornsteins (TC) aus dem Jura mit dem Grundriss eines unregelmäßigen Vierecks; ≤ 15 mm dick; mit fünf Bruchflächen und mindestens sechs Abschlagsnegativen ≤ 24 mm (vermutlich zeitnah intentional)



Abb. 1 Arnh. 5: Aufsicht auf die 1. Seite mit dickerem Cortex.

Cortex: bedeckt ca. 45 % der gesamten Ober- und Unterseite (1, < 50 %); < 2 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: zwei unterschiedliche Seiten: 1. Seite mit dickerem Cortex (Abb. 1), ca. 20 % erhalten, außen rau (FR), ockerfarben (10YR 8/4 very pale brown), dunkelbraune Punkte und ein ca. 2 mm breites rostbraunes Band (5YR 5/4 reddish brown), 2. Seite zur Hälfte mit sehr dünnem, relativ glattem Cortex (TH), ockerfarben (10YR 8/4 very pale brown) bis gräulich (GLEY1 5/N bis 5/10Y gray bis greenish gray); rostfarbene Punkte (5YR 4/6 yellowish red) meist als größere Flecken angeordnet, kleine hellgraue Punkte und zwei größere braun-schwarze Flecken (≤ 4 mm) (5YR 2.5/1 black); im Anschnitt weißlich (10YR 8/1 white)



Abb. 2 Arnh. 5: Bruchfläche.

Platteninneres (Abb. 2)**:** mittelgrau (GR); rindenparallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: mindestens acht gut unterscheidbare Bänder, das oberste dunkelgrau (GLEY1 4/N bis 3/N dark gray bis very dark gray) (Abb. 2), das zweite mittelgrau (GLEY1 5/N gray), das dritte und fünfte grau-beige (10YR 6/2 light brownish gray), das vierte weißlich (2.5Y 8/1 white) und die drei untersten im Plattenquerschnitt weißlich (2.5Y 8/1 white) mit verschiedenen Graublau-Tönen (GLEY1 5/N bis 3/N gray, dark gray und very dark gray)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt dunkelgrau (GR), etwas dunkler und grauer als die Bruchfläche; Schicht 1 und 2 bilden hier eine einzige Schicht, die von oben fünfte Schicht ist durch zwei schwache braune Linien in sich unterteilt; die Farben haben teilweise weniger Blaustich

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern



Abb. 3 Arnh. 5: Sägeschnitt.

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA)**:** teilweise auf vier Bruchflächen beigefarben-gräulich (10YR 6/3 light brownish gray), auf der fünften rostfarben (5YR 4/6 yellowish red).

Arnh. 6 – Dunkelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: H. Floss

Größter Durchmesser: 116 mm
Gewicht: 115 g

Grundform (Abb. 1)**:** Kern (CO) eines Plattenhornsteins (TC) aus dem Jura; ≤ 15 mm dick; mit fünf Bruchflächen und mindestens fünf Abschlagsnegativen ≤ 51 mm (vermutlich zeitnah intentional)



Abb. 1 Arnh. 6: Aufsicht auf die bearbeitete Seite (Oberseite).

Cortex (Abb. 1)**:** außen überwiegend rau (FR), ca. ein viertel relativ glatt (TH) auf der Unterseite; bedeckt etwa 65 % der Ober- und Unterseite (2, ≥ 50 %), davon die Unterseite ganz; < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: hell ockerfarben (10YR 8/3 very pale brown), von hellgrauen Strukturen (GLEY1 7/N light gray) durchsetzt und mit dunkelgrauen Flecken (GLEY1 4/N dark gray); ≤ 3 mm tiefe, fast kreisförmige Eintiefung (Ø ≤ 8 mm) auf der Unterseite; im Anschnitt weißlich (2.5Y 8/1 white)



Abb. 2 Arnh. 6: Bruchkante mit zwei Abschlagsnegativen.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt beigegrau (YG); rindenparallel gebändert (PB), mittig dunkler (md); einzelne Farben: acht gut unterscheidbare Schichten, von oben nach unten dunkelgrau (10YR 3/1 bis 2/1very dark gray bis black), braun (10YR 4/2 dark grayish brown), dunkelgrau (10YR 3/1 very dark gray), dann wieder braun, dunkelgrau, braun, grau, zuunterst dunkelgrau

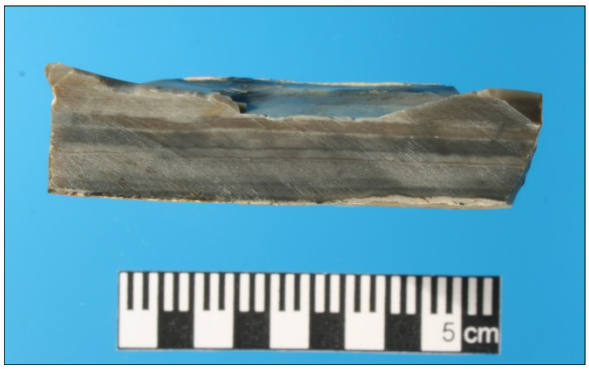


Abb. 3 Arnh. 6: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt dunkelgrau (GR), heller und bläulicher als die patinierte Bruchfläche

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA) (Abb. 2)**:** auf zwei Seiten teilweise gräulich (10YR 7/1 light gray), auf einer Seite beigefarben-ocker (10YR 7/3 very pale brown) und auf einer weiteren Seite ocker (10YR 8/3 very pale brown) und weißlich (5Y 8/1 white).

Arnh. 7 – Mittelgrauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Herr Hammerl, Museum Abensberg , 20. 10. 2009

Größter Durchmesser: 54 mm
Gewicht: 77 g







Grundform (Abb. 1)**:** Kern (CO) von unregelmäßiger Form aus Plattenhornstein (TC) aus dem Jura; ≤ 29 mm dick; mit vier patinierten Bruchflächen und fünf Abschlagsnegativen (vermutlich zeitnah intentional) und Kantenbeschädigung

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt die eine Oberfläche ganz (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: weißlich (GLEY1 8/N white) bis beige (10YR 8/2 very pale brown); im Anschnitt weißlich

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt dunkelgrau (GR), parallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: ca. 8 Schichten, jeweils durch feine, dunkelgraue Schichten (GLEY1 5/N bis 4/N gray bis dark gray), im Querschnitt als Linien erscheinend, abgegrenzt, überwiegend beige-grau (7.5YR 5/1 bis 5/2 gray bis brown) und bläulich-grau (GLEY1 6/N bis 5/N gray)

Sägeschnitt: insgesamt mittelgrau (GR), etwas heller und grauer als die Bruchkanten

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: überwiegend mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)

Patinierung (PA) (Abb. 3)**:** weißlich (GLEY1 8/N white) und beigefarben (10YR 8/2 very pale brown).

oben: *Abb. 1 Arnh. 7: Cortex und Patinierung.*

Mitte: *Abb. 2 Arnh. 7: Aufsicht.*

unten: *Abb. 3 Arnh. 7: Bruchseite mit Bänderung.*

Arnh. 8 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Herr Hammerl, Museum Abensberg, 04.11.2009

Größter Durchmesser: 60 mm
Gewicht: 38 g

Grundform (Abb. 1)**:** Getesteter Trümmer (TSH) von unregelmäßiger Form aus Plattenhornstein (TC) aus dem Jura; ≤ 24 mm dick; mit zwei patinierten Bruchflächen, ein Abschlagsnegativ; wohl aus derselben Schicht wie Arnh. 9



Abb. 1 Arnh. 8: Aufsicht mit Cortex.

Reste des Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt die Hälfte der gesamten Ober- und Unterseite (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt weißlich (W); einzelne Farben: mittelgrau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray) bis weißlich (5Y 8/1 white) und dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray); im Anschnitt weißlich



Abb. 2 Arnh. 8: Bruchseite mit Bänderung.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR); parallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: ca. sieben Schichten, jeweils durch feine, dunkelgraue Schichten (GLEY1 3/N very dark gray) oder weißliche Schichten (GLEY1 8/1 white), im Querschnitt als Linien erscheinend, abgegrenzt, überwiegend hellgrau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray), mittelgrau (GLEY1 6/N und 5/N gray) und dunkelgrau (GLEY1 4/N bis 10YR 4/1 dark gray)

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR) wie die Bruchkante (Abb. 2), aber Farben um eine Nuance bläulicher



Abb. 3 Arnh. 8: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA)**:** auf zwei der Bruchflächen bräunlich (10YR 5/2 grayish brown).

Arnh. 9 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Herr Hammerl, Museum Abensberg, 04.11.2009

Größter Durchmesser: 52 mm
Gewicht: 45 g



Abb. 1 Arnh. 9: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Getesteter Trümmer (TSH) von unregelmäßiger Form aus Plattenhornstein (TC) aus dem Jura; ≤ 24 mm dick; mit zwei patinierten Bruchflächen und einem Abschlagsnegativ (vermutlich zeitnah intentional), wohl aus derselben Schicht wie Arnh. 8

Reste des Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp ⅔ der Ober- und Unterseite (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt weißlich (W); einzelne Farben: mittelgrau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray) bis weißlich (5Y 8/1 white) und dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray); im Anschnitt weißlich



Abb. 2 Arnh. 9: Bruchseite mit Bänderung.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR); parallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: ca. sieben Schichten, jeweils durch feine, dunkelgraue Schichten (GLEY1 3/N very dark gray) oder weißliche Schichten (GLEY1 8/1 white), im Querschnitt als Linien erscheinend, abgegrenzt, überwiegend hellgrau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray), mittelgrau (GLEY1 6/N und 5/N gray), die leicht beige-graue Stelle im zweiten Band von unten (10YR 5/1 gray) und dunkelgrau (GLEY1 4/N dark gray)



Abb. 3 Arnh. 9: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR); Farben und Bänder wie in Abb. 2, aber Farben etwas stärker ins Bläuliche gehend; die leicht beige-graue Stelle im dunklen Band etwas heller (10YR 6/1 gray)

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunklen Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA) (Abb. 2)**:** auf zwei der Bruchflächen bräunlich (10YR 5/2 grayish brown).

Arnh. 10 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Herr Hammerl, Museum Abensberg, 04.11.2009

Größter Durchmesser: 56 mm
Gewicht: 37 g







Grundform (Abb. 1)**:** Getesteter Trümmer (TSH) von unregelmäßiger Form aus Plattenhornstein (TB) oder Fladen (FN) aus dem Jura; ≤ 36 mm dick; mit einer patinierten Bruchfläche; zwei Abschlagsnegative (vermutlich zeitnah intentional)

Reste des Cortex (Abb. 1)**:** relativ glatt (TH); bedeckt die Hälfte der Ober- und Unterseite (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt weißlich bis hellgrau (W); einzelne Farben: hellgrau (GLEY1 7/N bis 7/10Y) und weißlich (10YR 8/1 white), einzelne mittelgraue (10YR 5/1 gray) Flecken; im Anschnitt weißlich

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt hellgrau (GR); parallel gebändert (PB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: mindestens sieben Schichten, jeweils durch feine, graue Schichten (10YR 5/1 gray), im Querschnitt als Linien erscheinend, abgegrenzt, überwiegend graubeige (10YR 6/1 bis 5/1 gray), das breiteste Band in sich marmoriert, außerdem hellgraue (GLEY1 7/N bis 7/10Y light gray bis light greenish gray) und weißliche (GLEY1 8/N white), schmalere Bänder

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); Bänderung wie die Bruchfläche (Abb. 2), grau um eine Nuance bläulicher, besonders die Trennlinie (GLEY1 5/N bis 4/N gray bis dark gray)

Einschlüsse: makroskopisch kleinere Inhomogenitäten von < 2 mm, unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunkleren Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): weißlich (GLEY1 8/N white) (Abb. 1 unten links).

oben: *Abb. 1 Arnh. 10: Cortexseite.*

Mitte: *Abb. 2 Arnh. 10: Platteninneres.*

unten: *Abb. 3 Arnh. 10: Sägeschnitt.*

Arnh. 11 – Dunkelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Anne Marie Bertsch, 04.12.2009

Größter Durchmesser: 80 mm
Gewicht: 48 g



Abb. 1 Arnh. 11: Erste Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) aus Plattenhornstein (TC) mit einem etwa rechtwinkligen Dreieck als Grundfläche; ≤ 14 mm dick; mit zwei patinierten Bruchflächen; Kantenbeschädigungen

Cortex (Abb. 1)**:** zwei unterschiedliche Seiten: erste Seite rau (FR), zweite Seite relativ glatt (TH); bedeckt beide Seiten (3, 100 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: hellbeige (10YR 8/2 very pale brown) bis ocker (10YR 7/6 reddish yellow), auf der ersten Seite überwiegen die Ockertöne, die zweite Seite ist heller, hier überwiegen die Beigetöne; dunkelgraue (10YR 4/1 dark gray), meist winzige punktförmige Auflagerungen und ein ebensolcher Fleck < 3 mm; im Anschnitt weißlich

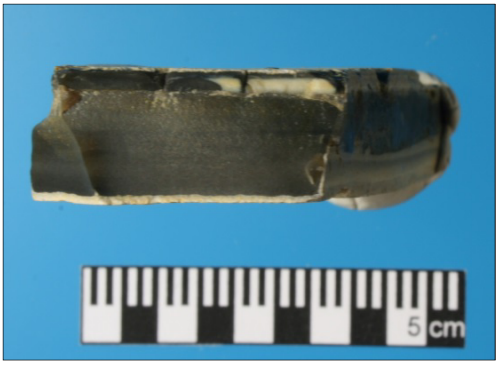


Abb. 2 Arnh. 11: Platteninneres.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); parallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: überwiegend mittel- und dunkelgrau (GLEY1 5/N gray bis 4/N dark gray), mindestens sieben Schichten, jeweils durch feine, dunkelgraue Schichten (GLEY1 3/N very dark gray), im Querschnitt als Linien erscheinend, abgegrenzt

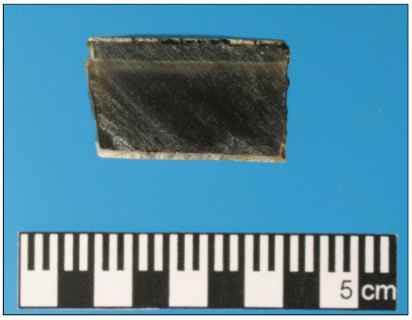


Abb. 3 Arnh. 11: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); nur drei Schichten deutlich unterscheidbar und insgesamt leicht bläulich; einzelne Farben: oberste Schicht (< 2 mm dick) dunkel bläulich-grau (GLEY2 4/5PB dark bluish gray), gefolgt von hellerem bläulich-grau (GLEY2 6/5PB bluish gray), die unterste Schicht (< 9 mm) erscheint als Ganzes dunkel bläulich-grau (GLEY2 4/5PB dark bluish gray bis 3/5PB very dark bluish gray), sie ist nur undeutlich in bis zu fünf Schichten unterteilbar

Einschlüsse: makroskopisch keine sichtbar; unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunkleren Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA) (Abb. 2): bräunlich (7.5YR 5/3 bis 4/3 brown), angrenzend an den Cortex auch weißlich (7.5YR 8/1 und GLEY1 8/N white).

Arnh. 12 – Dunkelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Anne Marie Bertsch, 04.12.2009

Größter Durchmesser: 48 mm
Gewicht: 46 g



Abb. 1 Arnh. 12: Erste Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) aus Plattenhornstein (TC) mit der Grundfläche eines etwa gleichseitigen Dreiecks; ≤ 17 mm dick; mit einer patinierten Bruchfläche; Kantenbeschädigungen

Cortex: zwei unterschiedliche Seiten: erste Seite (Abb. 1) rau (FR), zweite Seite relativ glatt (TH); bedeckt beide Seiten (3, 100 %); < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: erste Seite heller: hellbeige (10YR 8/4 very pale brown) bis ocker (10YR 7/6 bis 6/6 yellow bis brownish yellow) mit einigen kleineren dunkleren Flecken, zweite Seite dunkler: (10YR 7/6 yellow, 7.5YR 6/8 bis 5/8 reddish yellow bis strong brown) und noch dunklere braune Auflagerungen (7.5YR 4/4 brown); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Arnh. 12: Platteninneres.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt dunkelgrau (GR), parallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: durch grau-beige Schicht (10YR 6/1 bis 6/2 gray bis light brownish gray) in zwei ungleich dicke, dunkle Schichten unterteilt, die sich jeweils wieder in drei Schichten unterteilen, jeweils durch feine, hellere oder dunklere Linien im Querschnitt abgegrenzt, das oberste und unterste Band dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray), die mittleren wenig heller (10YR 4/1 dark gray)



Abb. 3 Arnh. 12: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt dunkelgrau (GR); Bänderung wie die Bruchfläche (Abb. 2); einzelne Farben: grau um eine Nuance bläulicher, besonders die hellere Trennschicht (GLEY1 6/N gray); die untersten drei Schichten und die oberste sind dunkel bläulich-grau (GLEY2 4/5PB bis 3/5PB dark bluish gray bis very dark bluish gray), die beiden Schichten dazwischen mehr dunkel beige-grau (5YR 4/1 dark gray)

Einschlüsse: makroskopisch kleinere Risse; unter der Lupe wenige Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): leicht rostfarben überlaufen mit intensiver gefärbten Stellen (7.5YR 5/8) und weißlich (10YR 8/1 white).

Arnh. 13 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Anne Marie Bertsch, 04.12.2009

Größter Durchmesser: 85 mm
Gewicht: 139 g



Abb. 1 Arnh. 13: Erste Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) aus Plattenhornstein (TC) aus dem Jura mit etwa dreieckiger Grundfläche; ≤ 23 mm dick; mit drei patinierten Bruchflächen; Kantenbeschädigungen

Reste des Cortex: Erste Seite (Abb. 1)**:** größtenteils relativ glatt (TH), die eiförmige Struktur (≤ 20 mm) etwas rau (FR), ebenso der Cortex der zweiten Seite; bedeckt die erste Seite und einen geringen Teil der zweiten Seite (2, ≥ 50 %); hauchdünn, < 1 mm dick; insgesamt weißlich bis sehr hellgrau (W); einzelne Farben: hellgrau (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) und wenig mittelgrau (GLEY1 6/N gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Arnh. 13: Platteninneres.

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt beigegrau (YG); parallel gebändert (PB), mittig dunkler (md); mindestens drei Schichten, die oberste und breiteste sehr fein gebändert (ca. 15 Bänder); einzelne Farben: soweit erkennbar überwiegend grau-beige (10YR 5/2 bis 4/2 grayish brown bis dark grayish brown), oben blau-grau (GLEY2 4/5PB dark bluish gray)

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR); Bänderung wie die Bruchfläche (Abb. 2), grau um eine Nuance bläulicher; einzelne Farben: unten (< 8 mm hoch) mittelgrau (GLEY1 5/N gray) mit helleren oder heller gerandeten, dunkler kernigen Inhomogenitäten, mittlere Schicht (≤ 3 mm hoch) unterschiedlich intensiv gefärbt mit helleren Rändern, mittelgrau bis bläulich dunkelgrau (GLEY2 4/5PB dark bluish gray), obere Schicht (≤ 7 mm hoch) heller

grau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray), nicht durchweg ganz parallel gebändert, an einer Bruchstelle, wohl aus der Entstehungszeit, auch verschobene Bänder, abschließend eine dünne, < 1 mm dicke, dunkel bläulich graue Schicht (GLEY2 4/5PB dark bluish gray)

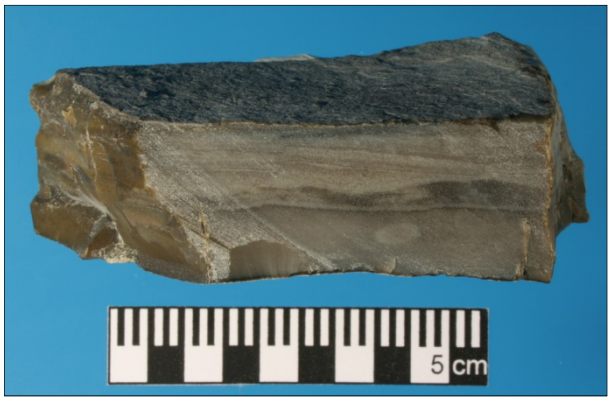


Abb. 3 Arnh. 13: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch einige wohl linsenförmige Inhomogenitäten von ≤ 8 mm im mittelgrauen Band (Abb. 3); unter der Lupe wenige Schwammnadeln in dunkleren Bändern

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): ocker (10YR 5/4 yellowish brown) und weißlich (GLEY1 8/N white) (Abb. 2).

Arnh. 14 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Anne Marie Bertsch, 04.12.2009

Größter Durchmesser: 74 mm
Gewicht: 82 g

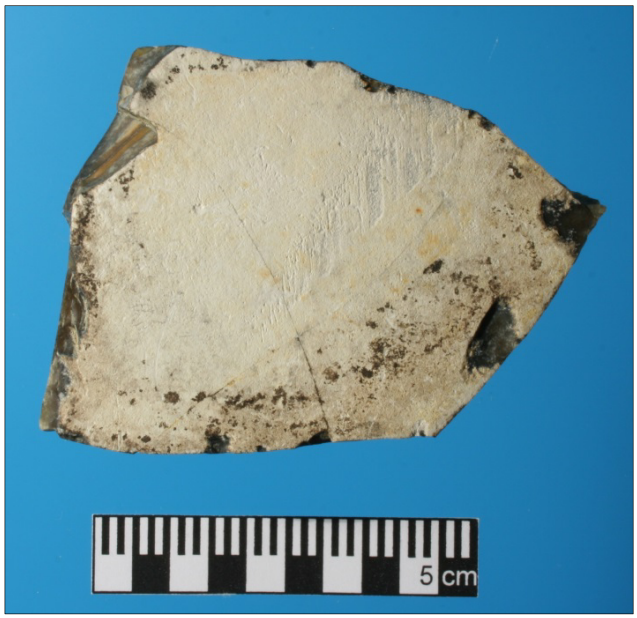


Abb. 1 Arnh. 14: Erste Cortexseite.



Abb. 2 Arnh. 14: Platteninneres.



Abb. 3 Arnh. 14: Sägeschnitt.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) aus Plattenhornstein (TC) mit unregelmäßig viereckiger Grundfläche aus dem Jura; ≤ 36 mm dick; mit drei deutlich patinierten Bruchflächen; Kantenbeschädigungen

Reste des Cortex: relativ glatt (TH) auf der ersten Seite (Abb. 1), teils glatt, teils rau (FR) auf der zweiten Seite; bedeckt beide Seiten (3, 100 %); < 1 mm dick; insgesamt weißlich bis hellgrau (W); einzelne Farben: erste Seite: weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar) mit ockerfarbenen (10YR 7/6 yellow) und grau-schwarzen Flecken (10YR 3/1 very dark gray), zweite Seite: überwiegend hellgrau (10YR 7/1 light gray) und wenig mittelgrau (GLEY1 6/N bis 5/N gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt beigegrau (YG); parallel gebändert (PB), Mittelband dunkler (md); einzelne Farben: mindestens fünf Schichten, oben, mittig und unten bräunlich: oben (7.5YR 4/1 bis 4/2 dark gray bis brown), mittig (7.5YR 4/3 brown), unten (7.5YR 4/1 bis 3/1 dark gray bis very dark gray), dazwischen bläulichgrau (GLEY2 2.5/5PB bluish gray)

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR), heller und bläulicher als die Bruchfläche (Abb. 2); einzelne Farben: obere Hälfte: hell bläulich-grau (GLEY2 7/5PB light bluish gray) in vier Schichten unterteilt, die jeweils dunkler abgegrenzt sind, untere Hälfte: dunkler bläulich-grau als die obere (GLEY2 6/5PB bis 5/5PB bluish gray), ebenfalls in vier Schichten unterteilt, die jeweils dunkler abgegrenzt sind, mittig

< 2 mm hohe, dunklere und weniger bläuliche Schicht (GLEY1 5/N gray)

Einschlüsse: makroskopisch keine; unter der Lupe wenige Schwammnadeln, dabei lagenweise Unterschiede

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): überwiegend ocker (10YR 5/4 yellowish brown), wenig weißlich (10YR 8/1 white).

Arnh. 15 – Mittelgrauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Kiesgrube „Brandl“, Abensberg-Arnhofen, Kreis Kelheim
Lesefund: Anne Marie Bertsch, 04.12.2009

Größter Durchmesser: 65 mm
Gewicht: 60 g



Abb. 1 Arnh. 15: Erste Cortexseite.

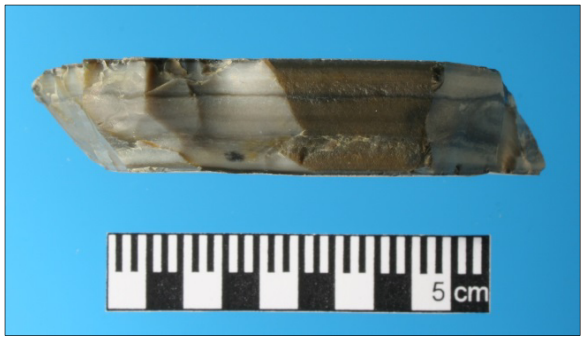


Abb. 2 Arnh. 15: Platteninneres.

Grundform (Abb. 1)**:** Kern (CO) aus Plattenhornstein (TC) mit ungefähr trapezförmiger Grundfläche aus dem Jura; ≤ 18 mm dick; mit vier patinierten Bruchflächen; sieben Abschlagsnegativen (vermutlich zeitnah intentional)

Reste des Cortex: relativ glatt (TH); bedeckt beide Seiten (3, 100 %); < 1 mm dick; insgesamt weißlich bis hellgrau (W); einzelne Farben: weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar und 10YR 8/1 und GLEY1 8/N white) ferner hellgrau auf der ersten Seite (GLEY1 7/N light gray) (Abb. 1), auf der zweiten Seite fleckig hellgrau (10YR 7/1 light gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Platteninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR); parallel gebändert (PB), nicht deutlich md/od; mindestens fünf Schichten, jeweils durch feine Linien im Querschnitt abgegrenzt; einzelne Farben: unterste Schicht weißlich (GLEY1 8/N), oberste und mittlere Schicht hellgrau (GLEY1 7/N), dazwischen bläulichgraue Bänder (GLEY2 5/5PB bluish gray)



Abb. 3 Arnh. 15: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR); Bänderung wie die Bruchfläche (Abb. 2); einzelne Farben um eine Nuance bläulicher: unterste und oberste Schicht helles Bläulich-grau (GLEY2 7/5PB light bluish gray), zweitunterste dunkelste Schicht (GLEY2 5/5PB bluish gray), weitere Schichten bläulich-grau (GLEY2 6/5PB bluish gray), im Querschnitt durch meist dunklere oder durch eine hellere Linie abgegrenzt

Einschlüsse: makroskopisch Inhomogenitäten von überwiegend < 9 mm unterhalb des Cortex; unter der Lupe etwas mehr Schwammnadeln als bei anderen Hornsteinen aus Arnhofen

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): ockerfarben 10YR 5/4 yellowish brown.

III Fundstelle Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis

Borg. 1 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 303
Schnitt: 3
Fläche: 3
Fundnr.: 215



Abb. 1 Borg. 1: Cortexseite.



Abb. 2 Borg. 1: Abschlagseite.

Größter Durchmesser: 95 mm
Gewicht: 131 g

Grundform (Abb. 1)**:** Trümmer (SH) oder Kern (CO) einer wohl linsenförmigen Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit drei Bruchflächen; auf der Cortexseite vier Abschlagsnegative bis 18 mm Länge (vermutlich intentional)

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt gut $^{1}/_{3}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-4 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen teilweise stark verwittert, dort weißlich (5Y 8/1 white), sonst hellbeige (10YR 8/3 very pale brown) bis rötlich-gelb (7.5YR 7/8 bis 6/8 reddish yellow); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt mittel- bis dunkelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), Kern dunkler als der Rand (md); einzelne Farben: relativ homogenes, unregelmäßig geformtes Zentrum, mittelgrau (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), umgeben von ca. 10-15 Bändern < 1 mm bis 9 mm breit, in Farben zwischen fast weiß (5Y 8/1 white) und dunkelgrau (GLEY 1 4/N bis 5/N gray bis dark gray); in den Randbereichen feineres Material

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR), die Grautöne erscheinen heller und weniger beige; konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: Mitte: hellgrau bis grau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray) umrahmt von mittelgrau (GLEY1 6/N bis 5/N gray), Richtung Cortex mehr hellgrau bis weißlich (GLEY1 7/ N light gray und 8/N white)



Abb. 3 Borg. 1: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch kleine Inhomogenitäten bis 4 mm Durchmesser; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: überwiegend sehr feinkörnig, glatt, teilweise glänzend (QU 1-2), Hauptausnahme zwei kleinere Bereiche mit heterogenen Strukturen (QU 5); insgesamt QU 2

Patinierung: sehr schwach.

Borg. 2 - Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 505
Schnitt: 5E
Fläche: 3
Fundnr.: 246

Größter Durchmesser: 97 mm
Gewicht: 338 g



Abb. 1 Borg. 2: Cortexseite.



Abb. 2 Borg. 2: Knolleninneres.

Grundform (Abb. 1): Bruchstück (SH) einer Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit einer Bruchfläche

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt gut $^{2}/_{3}$ der Oberfläche des Trümmers (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick (soweit bestimmbar); insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen teilweise stärker verwittert, dort weißlich (5Y 8/1 white), sonst überwiegend hellbeige (10YR 8/3 bis 8/4 very pale brown) bis ocker (10YR 7/4 bis 7/6 very pale brown bis yellow); punktförmige orangefarbene bis braune Strukturen von Eisensalzen und braun-schwarze Pünktchen, wohl von Mangan; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: linsenförmige Mitte eher verschwommen abgegrenzt, mittelgrau-beige (10YR 7/2 light gray), von einem graueren Band (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) durchzogen, umgeben von ca. fünf heller

beigefarbenen (5Y 8/1 white) bis gräulichen (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) Bändern, < 1 mm bis 15 mm breit; in der Mitte teilweise gröbere Struktur

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); einzelne Farben: Mitte mittelgrau (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), Rand weißlich (5Y 8/1 white)



Abb. 3 Borg. 2: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch kleinere Inhomogenitäten (< 3 mm); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: in der Mitte überwiegend mittelkörnig (QU 3), das grauere durchziehende Band feinkörniger, glatt (QU 2), in den Randbereichen feinkörnig, glatt (QU 2); insgesamt QU 2

Patinierung (PA) (Abb. 2 und 3): hellbeige (10YR 8/3 bis 8/4 very pale brown) an alten Bruchflächen, in Abb. 2 rechts und links oben, rechts unten; wenige dunkelbraun-graue Punkte, vermutlich Mangan.

Borg. 3 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 505
Schnitt: 5E
Fläche: 3
Fundnr. 260

Größter Durchmesser: 69 mm
Gewicht: 92 g

Grundform (Abb. 1)**:** Abschlag (FL) einer wohl länglichen Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit zwei größeren Artefaktnegativen



Abb. 1 Borg. 3: Cortexseite.



Abb. 2 Borg. 3: Abschlagseite, rechts in Abb. 1.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt gut die Hälfte der Oberfläche (2, ≥ 50 %); sehr dünn, < 1 mm, teilweise stark verwittert; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen weißlich (2.5Y 8/1 bis 8/2 white bis pinkish white), sonst überwiegend gelblich bis orange (10YR 8/6 bis 7/6 yellow und 7.5YR 6/8 reddish yellow); braun-schwarze Flecken (10YR 2/1 black), wohl von Mangan; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: vorherrschend weißlich (5Y 8/1 white), eine nur wenig dunklere Mitte (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) nicht deutlich abgegrenzt, von ca. drei hellen Bändern umgeben; in der Mitte gröbere Struktur (auf einen Wurm- oder Krebsgang zurückzuführen)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt etwas heller weißlich bis hellgrau (WH); nur undeutlich konzentrisch gebändert (CB), wenig dunklere Mitte (md); einzelne Farben: weißlich am Rand (GLEY1 8/N bis 5Y 8/1 white), in der Mitte (GLEY1 8/N bis 8/10Y white bis light greenish gray), fast ausschließlich im Zentrum verschieden geformte Strukturen in verschiedenen Grautönen (GLEY1 6/N und 5/N gray sowie 4/N gray)

Einschlüsse (Abb. 3)**:** makroskopisch kleine Inhomogenitäten von ≤ 2 mm; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln, ferner Fossilreste

Qualität des Rohmaterials: überwiegend sehr feinkörnig, glatt, schwach glänzend (QU 1-2); etwa in der Mitte heterogen (QU 5); insgesamt QU 2



Abb. 3 Borg. 3: Sägeschnitt.

Patinierung (PA) (Abb. 2)**:** sehr schwach, wenig hellorange- bis ockerfarbene Flecken, außerdem einige dunkelgraue bis schwarze Punkte.

Borg. 4 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 305b
Schnitt: 5
Fläche: 4
Fundnr.: 536

Größter Durchmesser: 107 mm
Gewicht: 729 g



Abb. 1 Borg. 4: Cortex und Bruchfläche.

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit zwei Bruchflächen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt ca. ¾ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); teilweise sehr dünn, < 1 mm (in Abb. 1 unten und rechts), teilweise recht dick (4-16 mm); insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: überwiegend gelblich (10YR 8/4 bis 8/6 very pale brown bis yellow), ockerfarben (10YR 7/4 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown), in zwei Bändern bräunlicher (10YR 6/6 brownish yellow), in Vertiefungen zum Teil rostfarben (bis 7.5YR 5/8 strong brown); braun-schwarze, meist punktförmige Aggregate, wohl von Mangan; im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR), soweit bestimmbar; einzelne Farben: vorherrschend mittelgrau (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) mit schmalen weißlichen (5Y 8/1 white) Bändern (< 2 mm breit)



Abb. 2 Borg. 4: Bruchfläche.



Abb. 3 Borg. 4: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), Richtung Cortex dunkler (od), Bänderung verwaschen um zwei oder drei Kerne, das Ganze noch einmal von ca. drei undeutlich abgegrenzten Bändern umgeben; einzelne Farben: weißlich grau bis mittelgrau (GLEY1 8/N white, 7/N light gray bis 6/N gray)

Einschlüsse: makroskopisch mehr mittig wenige Inhomogenitäten < 4 mm; unter der Lupe wenig Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 2)**:** weißlich, teilweise sehr stark, teilweise nicht vorhanden; orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) bis gräulich (10YR 5/1 gray).

Borg. 5 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 412
Schnitt: 4
Fläche: 9
Fundnr.: 1328

Größter Durchmesser: 82 mm
Gewicht: 203 g



Abb. 1 Borg 5: Cortexseite.



Abb. 2 Borg. 5: Bruchflächen.

Grundform (Abb. 1)**:** einer von drei natürlichen Trümmern (NSH) eines ungefähr abgerundet rechteckigen Hornsteins (ND) aus Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt ca. $^{3}/_{5}$ der Oberfläche (2 $\geq$ 50 %); 4-9 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: Oberfläche gelblich (2.5Y 8/4 pale yellow bis 10Y 8/6 yellow), in Vertiefungen rostfarben (10YR 6/6 brownisch yellow); braun-schwarze Punkte (10YR 3/1 bis 3/2 very dark gray bis very dark grayish brown), wahrscheinlich von Mangan; im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Knolleninneres (Abb. 2 links)**:** am Rand nur auf ca. ¼ der Bruchfläche sichtbar; insgesamt mittelgrauer Hornstein (GR); konzentrisch gebändert (CB), Richtung Mitte dunkler (md); einzelne Farben: hellgrau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray), von ca. 4 mittelgrauen Bändern (GLEY1 6/N gray) durchzogen, zum Cortex hin weißlich abgegrenzt (5Y 8/1 white); wenig rostfarbene Schlieren Richtung Cortex

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), in der Mitte dunkler (md); einzelne Farben: am Rand wie der unpatinierte Teil der Bruchfläche (Abb. 2 links), Mitte beige-grau (zwischen GLEY1 7/N und 7/10Y light gray und light greenish gray bis zwischen GLEY1 6/N und 6/10Y gray und greenish gray), von mittelgrauen (GLEY1 6/1 gray) Bändern umgeben, zum Cortex hin heller (GLEY1 7/1 light gray), mit einem weißlichen Band (GLEY1 8/1 white) endend



Abb. 3 Borg. 5: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch wenige Inhomogenitäten (< 3 mm), mehr mittig; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln (Abb. 4)

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glatt, etwas glänzend im dunkleren Bereich (QU 1-2), am Rand feinkörnig, glatt (QU 2); insgesamt QU 2

Patinierung (PA) (Abb. 2): Richtung Cortex mehr beige-grau (2.5Y 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray), zur Mitte hin mittelgrau (5Y 6/1 bis 5/1 gray); Richtung Rand ein weißliches (2.5Y 8/1 white) Band von ≤ 4 mm, zwei weitere, weniger deutliche weißliche Bänder im Inneren.

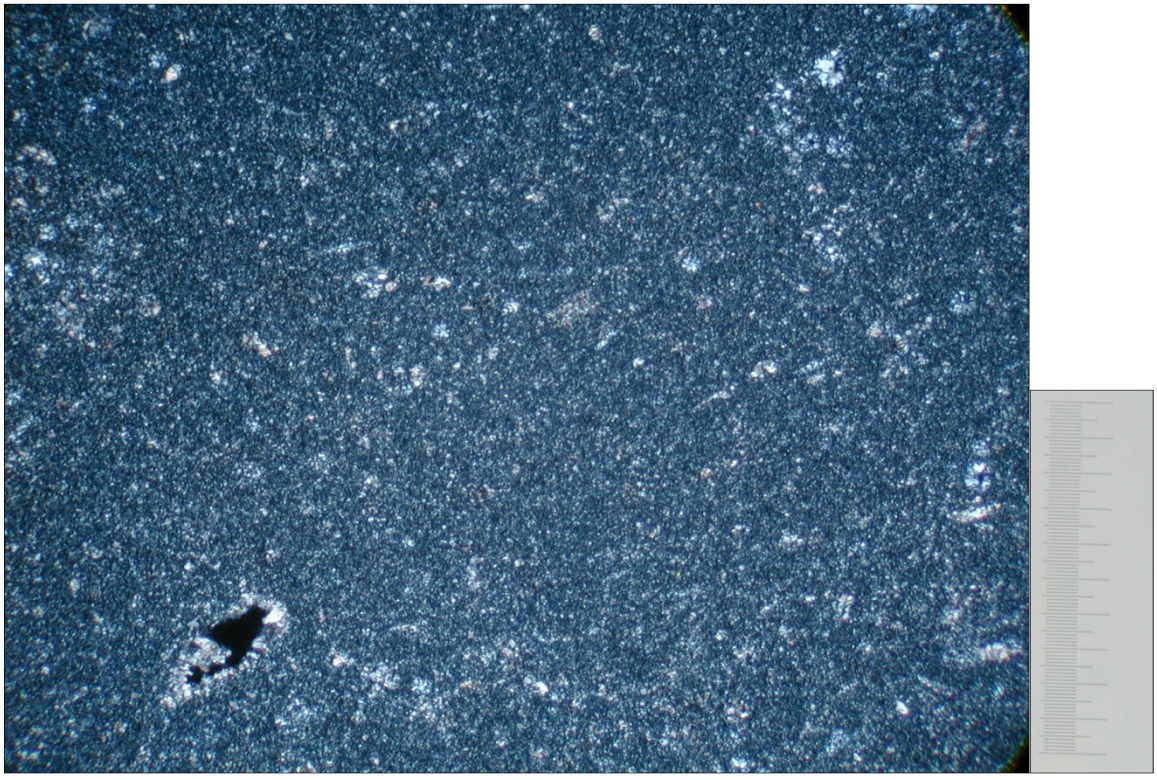


Abb. 4 Borg. 5: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop mit drei Schwammnadeln (rechts im Bild, gesamter Maßstab 1 mm) (Foto U. Neumann).

Borg. 6 – Hellgrauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 511i
Schnitt: 5
Fläche: 4
Fundnr.:1656

Größter Durchmesser: 109 mm
Gewicht: 322 g



Abb. 1 Borg. 6: Cortex und erste Bruchfläche.

Grundform (Abb. 1)**:** Getestete (TSH) Hornsteinknolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit mindestens drei Bruchflächen; an der Kante des Cortex zu einer Bruchfläche fünf Abschlagsnegative (mindestens eines intentional) (Abb. 2 unten rechts)

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp $^{1}/_{3}$ der Oberfläche (1, < 50 %); sehr dünn, < 1 mm; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen ockerfarben (10YR 7/4 bis 7/6 very pale brown bis yellow) mit dunkleren rostfarbenen Stellen (7.5YR 5/8 strong brown); einige braun-schwarze punktförmige Flecken, wohl von Mangan; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1 und 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), mittig dunkler (md); einzelne Farben: relativ homogenes Zentrum, hellgrau (2.5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray), umgeben von ca. 15 Bändern < 1-7 mm breit, weißlich (2.5Y 8/1 white) bis hellgrau (2.5Y 7/1 light gray)

Sägeschnitt (Abb. 3) insgesamt etwas heller und grauer (WH); konzentrisch gebändert (CB), innen dunkler (md); einzelne Farben: Zentrum und dunklere Bänder (GLEY1 7/N bis 7/10Y

light gray bis light greenish gray), hellere Bänder (GLEY1 8/N bis 8/10Y white bis light greenish gray)

Einschlüsse: makroskopisch kleine Inhomogenitäten < 3 mm, mehr mittig; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 2 Borg. 6: Zweite Bruchfläche.



Abb. 3 Borg. 6: Sägeschnitt.

Qualität des Rohmaterials: durchgehend gut (QU 2), da überwiegend feinkörnig und glatt

Patinierung (PA)**:** ockerfarbene (7.5YR 6/6 reddish yellow) punktförmige und streifige Verfärbungen (Abb. 1 Bruchfläche oben); winzige braunschwarze Pünktchen, vermutlich Mangan.

Borg. 7 – Hellgrauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 320
Schnitt: 3
Profil: E (Profilbegradigung)
Fundnr.:1719

Größter Durchmesser: 149 mm
Gewicht: 716 g

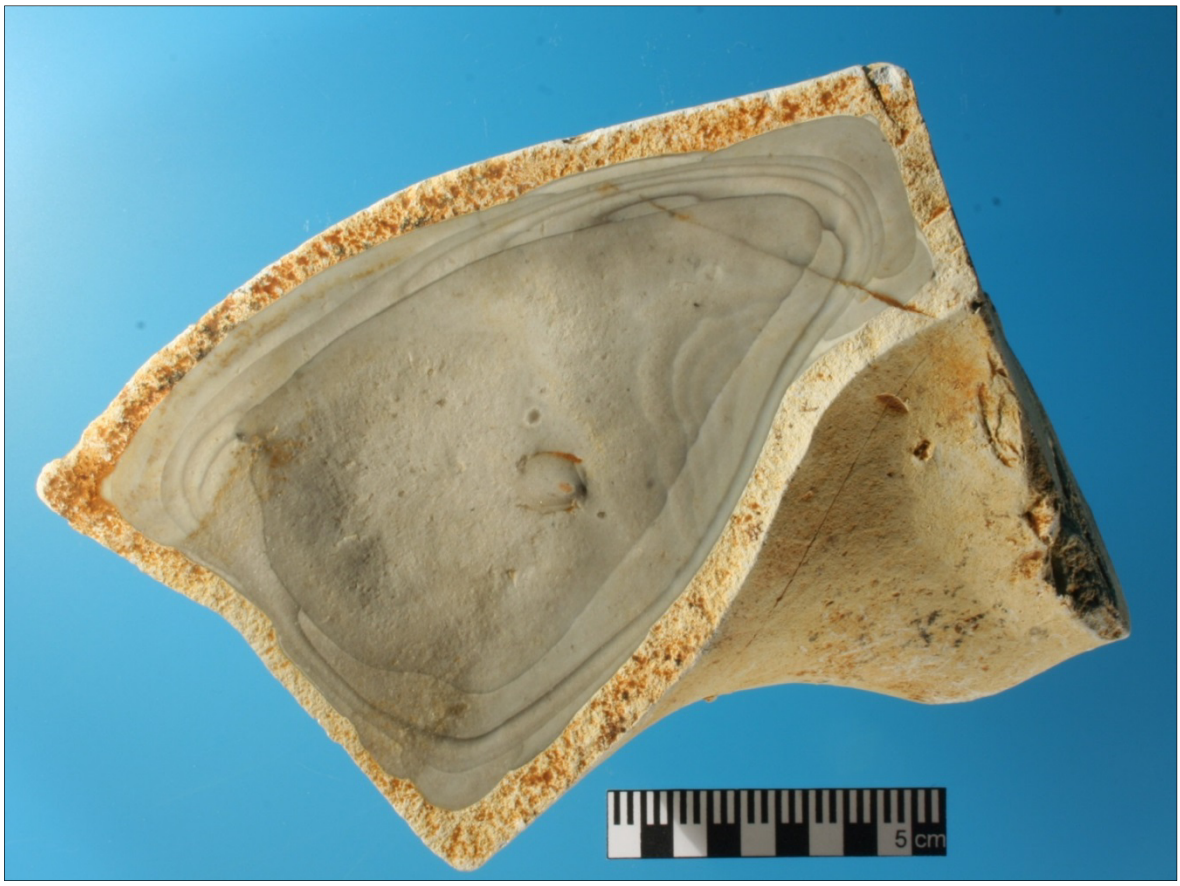


Abb. 1 Borg. 7: Cortex und Bruchfläche.

Grundform (Abb. 1): natürlicher Trümmer (NSH) einer unregelmäßig zylindrischen Hornsteinknolle (ND) aus mittelgrauem Jurahornstein (JC) mit einer Bruchfläche

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt gut ¾ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); 3-7 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: an der Oberfläche überwiegend ockerfarben (10YR 7/4 bis 7/6 light yellowish brown bis brownish yellow), an einigen Stellen rostfarben (5YR 6/8 bis 5/8 reddish yellow bis yellowish red); gräuliche U-förmige Struktur (2.5Y 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray), grau-schwarze (5Y 3/1 very dark gray), punktförmige Aggregate, wahrscheinlich von Mangan; angesägter Cortex weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1)**:** insgesamt mittelgrau (GR); überwiegend konzentrisch gebändert (CB), innen etwas dunkler als am Rand (md); einzelne Farben: etwa dreieckiges

Zentrum der Bruchfläche (5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) mit zwei breiteren weißlichen Bändern (5Y 8/1 white), kaum dunkler als Bänder im Randbereich (GLEY1 7/N bis 7/10Y light gray bis light greenish gray), dunkelgrau abgegrenzt (GLEY1 5/N gray); im Zentrum gröberes Material



Abb. 2 Borg. 7: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt weniger beige als die Bruchfläche, mittelgrau (GR); deutlich gebändert, teilweise 2-3 Kristallisationskerne umrahmend (CB), kein einheitliches dunkleres Zentrum; einzelne Farben: überwiegend sehr hellgrau bis grau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray und 7/N bis 6/N light gray bis gray) und wenig beige-grau (GLEY1 7/N bis 5Y 7/1 light gray), umgeben von mindestens einem breiteren hellgrauen Band (GLEY1 8/N bis 7/N)

Einschlüsse (Abb. 1): kleinere Inhomogenitäten (< 1-4 mm) vor allem im Bereich der gröberen Körnung, mehr mittig; **Fossilien** (FOS): fast mittig auf der Bruchfläche 10 mm lange Kammmuschel (Cingentulium sp.); unter der Lupe wenig Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: in der Mitte sehr feinkörnig, glatt, teilweise glänzend (QU 1-2), Richtung Rand fein- bis mittelkörnig, matt (QU 2-3); insgesamt QU 2

Patinierung (Abb. 1 und 2): sehr schwach, hellbeige bis ocker überlaufen

Glanz (Abb. 3)**:** an zwei Stellen (5 mm und 3 mm) und verstreut in einem Bereich von 20 mm starker Glanz.

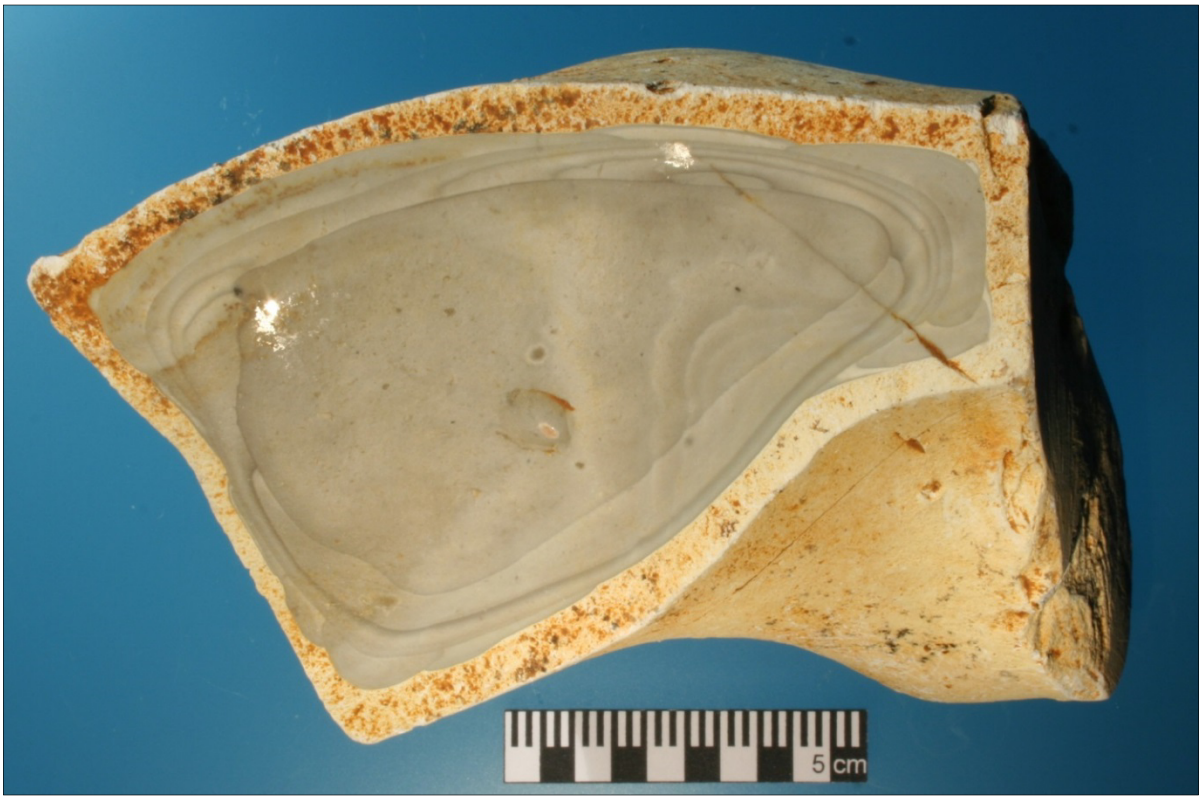


Abb. 3 Borg. 7: Glanz an der größeren Stelle rechts (5 mm Durchmesser) und links in einem Bereich von 20 mm Durchmesser; die dritte Stelle darunter (mit 3 mm Durchmesser) ist im Foto nicht sichtbar.

Borg. 8 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 320
Schnitt: 3
Profil: E
Fundnr.: 1719

Größter Durchmesser: 106 mm
Gewicht: 362 g

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer fast vollständigen Hornsteinknolle; abgerundete, dreieckige Scheibe (ND) aus Jurahornstein (JC)



Abb. 1 Borg. 8: Oben rauer Cortex, unten glatter Cortex.

Cortex (Abb. 1 und 2)**:** außen teils rau (FR), zum kleineren Teil glatt (TH); bedeckt gut ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-12 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: an der Oberfläche ockerfaben (10YR 8/4 very pale brown), z. T. mit mehr beigefarbenen (2.5Y 7/4 pale yellow) sowie orangefarbenen Stellen (5YR 6/8 bis 5/8 reddish yellow bis yellowish red); grau-schwarze (5Y 3/1 very dark gray), überwiegend punktförmige Strukturen, wohl von Mangan; im Querschnitt weiß (mit Musell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2 Mitte rechts): insgesamt mittelgrau (GR); einzelne Farben: soweit sichtbar grau (5Y 6/1 bis 6/2 light gray bis light olive gray) mit weißlichem Band (5Y 8/1 white)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: Zentrum grau mit schwacher beigefarbener Beimengung (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray und 5Y 7/1 gray), umgeben von einem bis zwei, teilweise auch

mehr, überwiegend hellgrauen und weißlichen Bändern (GLEY1 7/N light gray und GLEY1 8/1 white)



Abb. 2 Borg. 8: Oben rauer, unten glatter Cortex; Knolleninneres Mitte rechts.

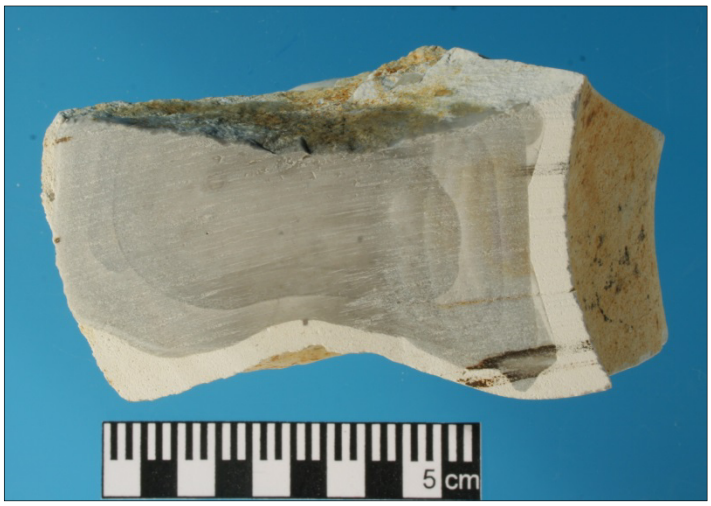


Abb. 3 Borg 8: Sägeschnitt.

Einschlüsse: in der Mitte der angeschlagenen Seite bräunliches, rundliches Gebilde von ≤ 6 mm Durchmesser, eine konkretionäre Bildung (Abb. 2 Mitte); weitere Inhomogenitäten < 1 mm mehr mittig; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln (Abb. 4)

Qualität des Rohmaterials: kleiner Bereich in der Mitte feinkörnig, glatt (QU 2), überwiegend mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3); insgesamt QU 3

Patinierung (PA)**:** (Abb. 2 und 3) ockerfarben (10YR 7/4 bis 7/6 very pale brown bis yellow).

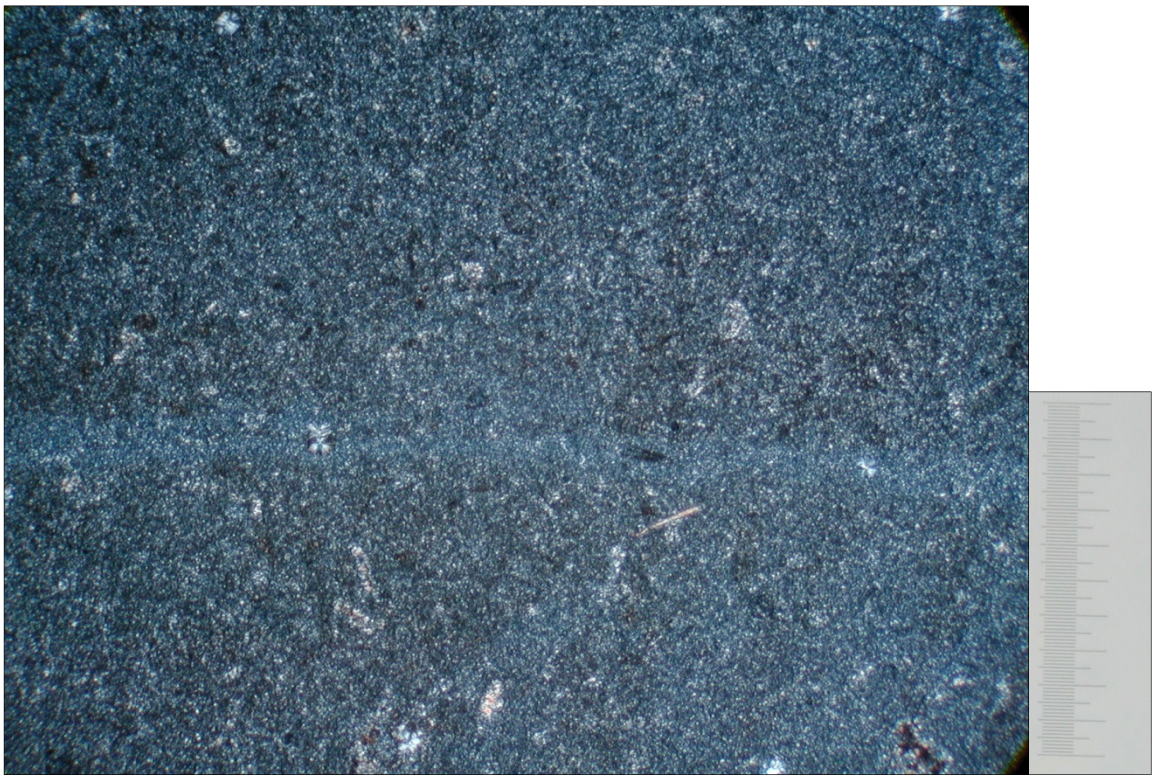


Abb. 4 Borg. 8: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop mit vier Schwammnadeln (oben rechts und links und untere Mitte rechts und links; gesamter Maßstab 1 mm) (Foto U. Neumann).

Borg. 9 – Beige-grauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: all
Schnitt: 1
Profil: S
Fundnr.: 1810

Größter Durchmesser: 146 mm
Gewicht: 927 g



Abb. 1 Borg. 9: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Getesteter Trümmer (TSH) eines eher fladenförmigen Hornsteinknolle (FN) aus Jurahornstein (JC) mit zwei größeren Bruchflächen (nur wenig davon sichtbar an den Rändern oben und unten in Abb. 1) und einer kleineren Bruchfläche; ein Abschlagsnegativ (intentional) (Abb. 1 links oben)

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt etwa ¾ der Oberfläche (2, ≥ 50 %), teilweise abgeschlagen (nicht intentional), verschieden geformte, teilweise wurmförmige Cortexstrukturen; < 1-14 mm dick, soweit bestimmbar; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen überwiegend gelb-orange (7.5YR 7/8 bis 6/8 reddish yellow) bis orange (7.5YR 6/8 bis 5/8 reddish yellow bis strong brown); dunkelrostfarbene Verfärbungen (7.5YR 5/6 bis

4/6 strong brown), z. T. in Rillen oder fleckig; braun-graue (5YR 4/1 dark gray) bis schwarze (10YR 2/1 black) Verfärbungen, wohl von Mangan; im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Borg. 9: Bruchfläche.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: dunkleres Grau (GLEY1 7/N bis 7/10Y light gray bis light greenish gray), überlagert von vier Schichten Mittelgrau (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), Schichtgrenzen durch hauchdünne dunklere Linien erkennbar; mittig gröberes Material

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt stärker farbig beige-grau (YG), am Rand teilweise gebändert (CB), überwiegend marmoriert (SM), nicht eindeutig md/od; einzelne Farben: unregelmäßig geformtes Zentrum heterogen gemustert und gefärbt: fleckig weißlich (GLEY1 8/N white), hellgrau bis leicht beige-grau (GLEY1 7/N bis 7/10Y light gray bis light greenish gray), mittel- bis wenig dunkelgrau (GLEY1 6/N bis 5/N gray und 4/N dark gray) und rostfarben (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow), mindestens zwei Kristallisationszentren erkennbar, zur Hälfte von einem bis etwa drei hellgrauen Bändern (GLEY1 7/N light gray) umgeben

Einschlüsse: makroskopisch mehrere kleine Inhomogenitäten bis 4 mm, mehr mittig; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA): nur an einigen Stellen hellockerfarbene (10YR 7/6 yellow) Patina (Abb. 2); grau-schwarze Flecken, wohl von Mangan.



Abb. 3 Borg. 9: Sägeschnitt.

Borg. 10 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 413
Schnitt: 4
Profil: N
Fundnr.: 1823

Größter Durchmesser: 120 mm
Gewicht: 575 g



Abb. 1 Borg. 10: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Fast vollständige Hornsteinknolle (ND) in der Form eines dickeren Fladensegments aus Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1 und 2)**:** außen etwa 85 % rau (FR), an einigen Stellen glatt (TH); bedeckt fast die gesamte Oberfläche (3, 100 %); > 3-13 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: teilweise stark verwittert, dort weißlich (5Y 8/1 white), sonst außen beigefarben (2.5Y 8/2 bis 8/3 pale yellow) bis ockerfarben (10YR 8/6 bis 7/6 yellow), an einzelnen Stellen rostfarben (7.5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis strong brown); wenige dunkelbraune Flecken (7.5YR 3/3 dark brown); auf der angeschlagenen Seite (Abb. 2 rechts) in einem Bereich von etwa 12x24 mm verstreut metallisch silbern schimmernde Ablagerungen; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Borg. 10: Cortex mit Bruchfläche.



Abb. 3 Borg. 10: Sägeschnitt.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2 oben links)**:** soweit sichtbar mittelgrau (GR) (GLEY 1 7/N bis 6/N light gray bis gray) mit etwas stärker beigefarbenem Band (2.5 7/1 bis 7/2 light gray)

Sägeschnitt (Abb. 3): ebenfalls insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB) um dunkleren exzentrischen Kern (md) von ≤ 24 mm; einzelne Farben: mittelgrau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray), ca. 2-4 hellgraue Schichten (GLEY1 7/N light gray); unregelmäßige rostfarbene Strukturen (5YR 6/6 reddish yellow)

Einschlüsse: makroskopisch im Sägeschnitt Inhomogenitäten < 4 mm, weniger im Randbereich; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: fast durchgehend mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)

Patinierung: kaum.

Borg. 11 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 413
Schnitt: 4
Profil: N
Fundnr.: 1823

Größter Durchmesser: 118 mm
Gewicht: 303 g

Grundform (Abb. 1): natürlicher Trümmer (NSH) einer wurstförmigen Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC), an einem Ende angeschlagen (Abb. 2)



Abb. 1 Borg. 11: Grundform mit Cortex.



Abb. 2 Borg. 11: Angeschlagener Cortex mit Patinierung.

Cortex (Abb. 1 & 2)**:** außen rau (FR); bedeckt die gesamte Oberfläche (3, 100 %); > 4-10 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen angeschlagene Bereiche des Cortex weißlich (5Y 8/1 white), sonst hell ocker (10YR 8/4 very pale brown) mit einigen orangefarbenen Stellen (7.5YR 7/8 reddish yellow); braune (7.5YR 4/3 brown) bis schwarze (7.5YR 2.5/1 black) Flecken, wohl von Mangan; andersartige Inhomogenitäten ≤ 4 mm; im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 3 Borg 11: Sägeschnitt mit mitteldicker Cortex.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3)**:** kaum einsehbar, erscheint unter der Patinierung aber gebändert (CB) und weißlich (5Y 8/1 white) (WH)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), Richtung Cortex teilweise dunkler (od); einzelne Farben: Zentrum ≤ 24 mm, eiförmig und gröber, hellgrau (10YR 7/1 light gray), von ca. 4-5 überwiegend hellgrauen (10YR 7/1 und GLEY1 7/N light gray), mittelgrau (GLEY1 6/N bis 5/N gray) abgegrenzten, Bereichen umgeben

Einschlüsse: makroskopisch im Sägeschnitt kleinere Inhomogenitäten (< 1 mm), vor allem mittig; mittig wohl ursprünglicher Krebsgang mit vermutlich herausgebrochenem **Fossil** (Abb. 3 Mitte unten) und farblosen Kristallen; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung: kaum.

Borg. 12 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 409/410
Schnitt: 4
Profil: S
Fundnr.: 1836

Größter Durchmesser: 133 mm
Gewicht: 777 g



Abb. 1 Borg. 12: Cortexseite mit Abschlagsnegativen.

Grundform: Getestetes Bruchstück (TSH) einer Hornsteinknolle (ND) oder eines Hornsteinfladens (FN) aus Jurahornstein (JC) mit vier Bruchflächen; auf einer der Cortexseiten mehrere Abschlagsnegative bis 23 mm, davon das längste intentional (Abb. 1)

Cortex (Abb. 1)**:** außen sehr rau (FR); bedeckt etwa ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-6 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: weißlich-beige (2.5Y 8/1 bis 8/2 white bis pale yellow) bis orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); ferner zwei größere grau-schwarze Stellen (10YR 3/1 very dark gray), wohl von Mangan; im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar) mit hell-orangefarbenen Schlieren (7.5YR 8/6 reddish yellow)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt mittelgrau (GR); unklare Musterung (IN), Randbereiche dunkler als die Mitte (od); einzelne Farben: ein relativ homogenes Zentrum aus mittelkörnigem Hornstein in hellgrau (2.5Y 7/1 light gray), von äußerlich grobkörniger wirkendem Hornstein in beige-grau (2.5Y 7/2 light gray) bis bräunlich-beige (2.5Y 7/3 very pale brown) umgeben, im Randbereich ca. drei Schichten sehr feinkörniges Material in hellgrau

(GLEY 1 8/1 bis 7/1 white bis light gray) und überwiegend dunkelgrau (GLEY 1 4/N bis 3/N dark gray bis very dark gray), z. T. „Schlieren“ Richtung Zentrum bildend. Die bläulich-grauen Schlieren weisen auf eine Wanderung von farbgebenden Ionen aus der breiteren am Rande dunkleren Schicht Richtung Hornsteininneres hin

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR), bläulicher als die Bruchflächen; am Rand Bänder (IN), Richtung Cortex dunkel (od); einzelne Farben: Mitte überwiegend hellgrau (GLEY1 7/N light gray), teilweise fleckig marmoriert in mittelgrau (GLEY1 6/N gray), etwas mehr beigefarbenem hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) und grau (5Y 6/1 gray), in Richtung Rand teilweise bläuliches hellgrau (GLEY2 8/5PB bis 7/5PB light bluish gray) und parallel zum Cortex blaugrau (GLEY2 5/5PB bis 4/5PB bluish gray bis dark bluish gray) und weißlich (GLEY2 8/5PB light bluish gray) gebänderter Rand

Einschlüsse: verstreut unregelmäßige Inhomogenitäten bis 7 mm Größe; mehr Komponenten und Mikrobenkrusten; unter der Lupe wenige Schwammnadeln



Abb. 2 Borg. 12: Zwei der vier Bruchseiten mit Hinweis auf Ionenwanderung.

Qualität des Rohmaterials: im Zentrum feinkörnig, glatt (QU 2), im Gegensatz zu den Bruchflächen erscheint der Sägeschnitt im Randbereich nicht feinkörniger; insgesamt QU 2



Abb. 3 Borg. 12: Sägeschnitt.

Patinierung (PA): hellbeige (10YR 8/3 very pale brown) bis rostfarben (7.5YR 6/8 reddish yellow)

Glanz: vor allem im dunklen erhöhten Randbereich dreimal punktförmiger oder länglicher Glanz von 2-6 mm Länge (z. B. Abb. 2 rechts unten) und auf ca. 9 mm Durchmesser (Abb. 2 oben Mitte) ausgebildet.

Borg. 13 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 410
Schnitt: 4
Profil: E
Fundnr.: 1843

Größter Durchmesser: 126 mm
Gewicht: 705 g



Abb. 1 Borg. 13: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit drei Bruchflächen

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt knapp 50 % der Oberfläche (1, < 50 %); 1-13 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orangefarben (Y); einzelne Farben: außen weißlich-beige (2.5Y 8/2 pale yellow), überwiegend hell ockerfarben (10YR 8/4 very pale brown) bis orange (7.5YR 7/8 bis 6/8 reddish yellow); verstreut viele kleinere rostbraune Flecken (5YR 4/6 yellowish red); ebenso einige grau-schwarze (2.5Y 3/1 very dark gray), wohl von Mangan;



Fossilien (FOS): Kammmuschel (Lamellibranchiata) (Abb. 1 oben links und Abb. 2); Cortex im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Abb. 2 Borg. 13: Fossile Kammmuschel (Lamellibranchiata) im Cortex (Vergrößerung ca. 10x).



Abb. 3 Borg. 13: Bruchfläche.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), innen nur wenig dunkler (md); einzelne Farben: heterogener dunkler (GLEY1 5/N bis 4/N gray bis dark gray) und weißlich umrahmter Kern: kleinere Hälfte aus gröberem Material erscheinend, hellgrau (5Y 7/1 light gray), größere Hälfte aus feinkörnigem Hornstein hat verschiedene Grautöne (GLEY1 7/N bis 7/10N light gray bis light greenish gray), Außenbereich etwas heller (GLEY1 7/N light gray) mit feinen weißlichen (GLEY1 8/N white) und mittelgrauen Bändern (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray), wenig gröberes Material Richtung Cortex (Abb. 3 rechts unten) bräunlich (10YR 6/3 pale brown)

Sägeschnitt (Abb. 4) insgesamt etwas grauer (GR); konzentrisch gebändert (CB), Kern deutlich dunkler als der Randbereich (md); einzelne Farben: Kern fleckig, schlierig und streifig gemustert in dunklem bläulichem Grau (GLEY2 5/5PB bis 4/5PB bluish gray bis dark bluish

gray) über hell- und mittelgraue Töne (GLEY1 7/N und 6/N light gray und gray) bis weiß (GLEY1 8/N white), Rahmung des Kerns in dunklerem Bläulich-grau (GLEY2 5/5PB bis 4/5PB bluish gray bis dark bluish gray) und Weiß (GLEY1 8/N white), Außenbereich in den oben angegebenen Farben, kleinere Stellen im Randbereich etwas mehr beige-grau (2.5Y 7/1 light gray)

Einschlüsse: angebrochene eiförmige (Abb. 3) und fußsohlenähnliche Struktur (Abb. 4) aus gröberkörnigem bis grobkörnigem Material, beige-braun (10YR 6/3 bis 6/4) (ehemaliger Tiergang); kleinere Inhomogenitäten < 6 mm verstreut; unter der Lupe und im Dünnschliff (Abb. 5) wenig Schwammnadeln



Abb. 4 Borg 13: Sägeschnitt mit Einschluss.

Qualität des Rohmaterials: Kern und Randbereich eher feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 3)**:** wenig beige bis rostfarbene Verfärbung (7.5 YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis strong brown), wenige rostrote Pünktchen und Schlieren.

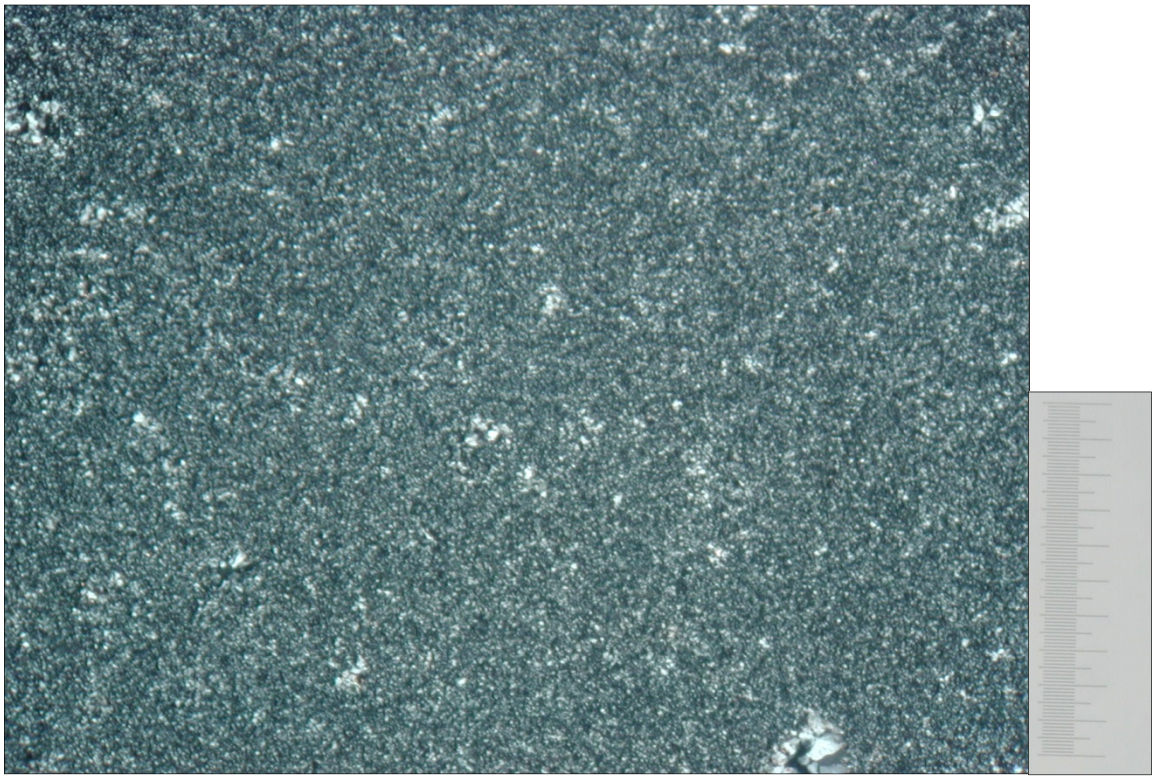


Abb. 5 Borg. 13: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop mit einer Schwammnadel (oben rechts) (gesamter Maßstab 1 mm).

Borg. 14 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 413
Schnitt: 4
Profil: E
Fundnr.: 1845

Größter Durchmesser: 116 mm
Gewicht: 649 g



Abb. 1 Borg. 14: Cortex.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer nur wenig angeschlagenen Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1 und 2)**:** außen rau (FR); bedeckt fast die gesamte Oberfläche (3, 100 %); > 1-13 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen: zum Teil verwittert, dort und an den angeschlagenen Stellen weißlich bis hellbeige (5Y 8/1 white), sonst ocker bis orange (10YR 8/4 bis 8/6 very pale brown bis yellow); zwei gräuliche Flecken ≤ 21 mm (5Y 7/2 light gray) und ein grau-beigefarbener (2.5Y 7/3 pale yellow) (≤ 24 mm), etliche kleinere braune Flecken (7.5YR 3/3 bis 3/4 dark brown), wenige grau-schwarze Punkte und Flecken (5Y 3/1 bis 2.5/1 very dark gray bis black); Inhomogenitäten (< 4 mm), evtl. Fossilreste; im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Borg. 14: Hornsteininneres rechts unten, hellgrau, im Cortexspalt.

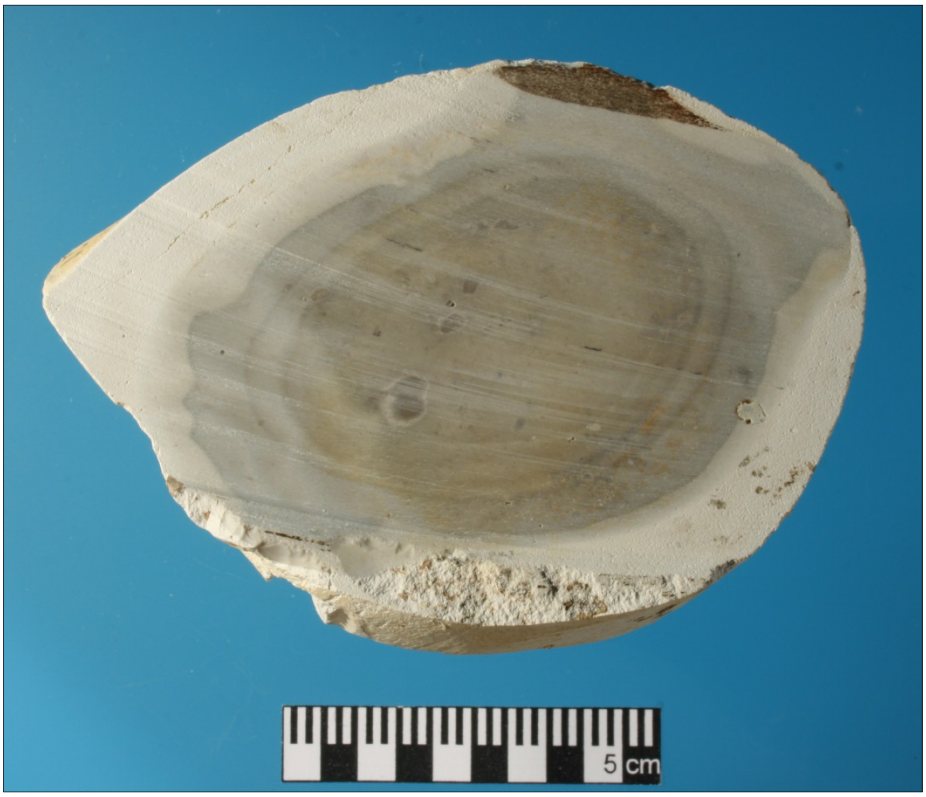


Abb. 3 Borg. 14: Sägeschnitt mit Brachyopode an der Grenze Hornstein/Cortex (rechts, Mitte).

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** soweit sichtbar hellgrau (WH) (GLEY1 7/N light gray) und weißlich (GLEY1 8/N white); konzentrisch gebändert (CB)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), nicht eindeutig md/od; einzelne Farben: eiförmiges Zentrum (≤ 45 mm) stärker beigefarbenes Hellgrau (7.5YR 7/1 light gray), teilweise am Rand gebändert, umgeben von zwei überwiegend hellgrauen (GLEY1 7/N light gray) konzentrischen Bändern, dunkler abgegrenzt (GLEY1 6/N gray)



Abb. 4 Borg.14: Fossiler Armfüßer im Sägeschnitt (Vergrößerung ca. 12x).

Einschlüsse: überwiegend im Zentrum des Sägeschnitts mittelgraue (GLEY1 6/N gray) Einschlüsse (≤ 1-4 mm); **Fossilien** (FOS): Armfüßer (Brachyopode) in der äußersten Hornsteinschicht unter dem Cortex (Abb. 3 rechts unterhalb der Mitte und Abb. 4 gedreht); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln im Sägeschnitt

Qualität des Rohmaterials: durchgehend feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung: keine.

Borg. 15 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 507
Schnitt: 5
Profil: N
Fundnr.: 1947

Größter Durchmesser: 206 mm
Gewicht: 1789 g



Abb. 1 Borg. 15: Erste Seite mit Fossilien.

Grundform (Abb. 1 und 7)**:** natürlicher Trümmer (NSH) eines Hornsteinfladens (FN) mit Löchern aus Jurahornstein (JC) mit zwei größeren und vielen kleinen Bruchflächen

Cortex (Abb. 1 und 7)**:** außen rau (FR); bedeckt > 90 % der Oberfläche (2, ≥ 50 %); deutlich < 1 mm, an wenigen Stellen bis 2 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orangefarben (Y); einzelne Farben: außen in höheren Bereichen mehr weißlich (2.5Y 8/2 pale yellow), in tieferen Bereichen meist ocker bis orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); fleckige rostbraune Strukturen (7.5YR 5/6 strong brown) und grauschwarze Punkte und Flecken; **Fossilien** (FOS): Seeigelstacheln (Echinodermata, Klasse Echinoidea) (Abb. 1 rechts Mitte) und an-



Abb. 2 Borg. 15: Fossiler halber Ammonitenkiefer im Cortex (Vergrößerung ca. 7x).

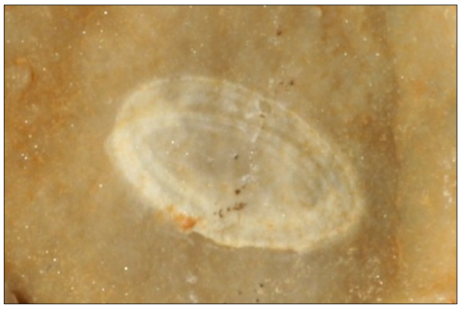
dere Seeigelreste, unterschiedliche Arten von Kammmuscheln (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata) (Abb. 3 und 4), halber Ammonitenkiefer (Mollusca, Klasse Cephalopoda) (Abb. 7 rechte obere Ecke und Abb. 2); im Querschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 3 Borg. 15: Fossile Kammmuschel (Vergrößerung ca. 7,5x).



Abb. 4 Borg. 15: Fossile Kammmuschel (Vergrößerung ca. 6,5x).



Sichtbares Fladeninneres: insgesamt mittelgrau (GR); einzelne Farben: soweit sichtbar meist gräulich (GLEY1 8/10Y bis 7/10Y light greenish gray), an einer kleinen Stelle weißlich (GLEY1 8/N); **Fossilien** (FOS): Muschel (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata) (Abb. 1 oben Mitte und Abb. 5)

Abb. 5 Borg. 15: Fossile Muschel (Vergrößerung ca. 7x).



Abb. 6 Borg. 15: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 6): insgesamt mittelgrau (GR); fleckig marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: Untereinheiten aus mehreren weißlichen (2.5Y 8/1 white) linsenförmigen Kernen mit meist 5-9 mm Durchmesser, aber auch bis 26 mm maximaler Länge, in mittelgrauer Umgebung (7.5YR 6/1 gray), heller grau-beige (10YR 7/2 light gray) gerahmt; diese zum Teil von dunklerem (10YR 6/1 bis 5/1 gray), ebenso gerahmten Material umgeben, zum Cortex hin häufiger hellere (2.5Y 7/1 light gray) Schichten

Einschlüsse: makroskopisch im Sägeschnitt verstreut verschiedene Komponenten und kleinere Inhomogenitäten (< 4 mm); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln im Sägeschnitt

Qualität des Rohmaterials: überwiegend mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)

Patinierung (Abb. 1 und 7)**:** wenig.

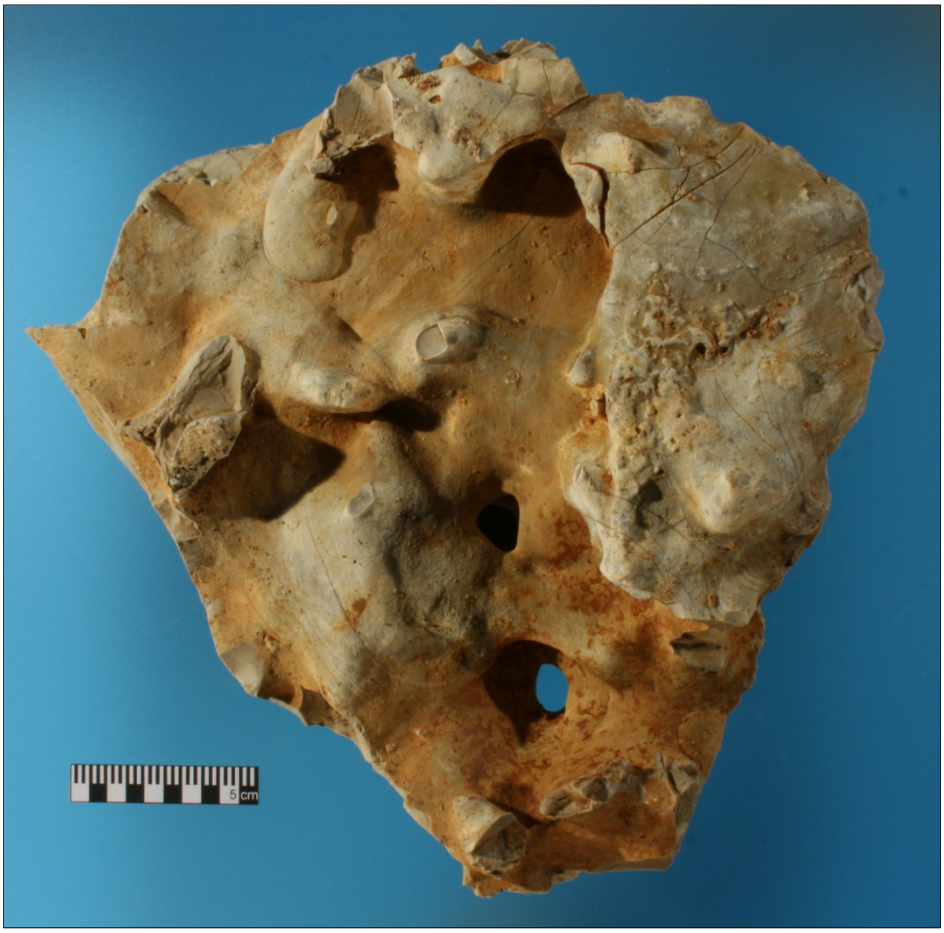


Abb. 7 Borg. 15: Zweite Fladenseite.

Borg. 16 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 505a
Schnitt: 5
Profil: E
Fundnr. : 1971

Größter Durchmesser: 133 mm
Gewicht: 805 g



Abb. 1 Borg. 16: Cortex und zwei Bruchflächen.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer Hornsteinknolle (ND) aus gebändertem Jurahornstein (JC) mit etwa fünf Bruchflächen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp die Hälfte der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-4 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: fleckig ockerfarben (10YR 7/4 very pale brown) und orangefarben (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); im Querschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); eher konzentrisch gebändert (CB), Richtung Mitte dunkler (md); einzelne Farben: heterogenes, überwiegend grobkörniges, gräuliches Zentrum (10YR 7/1 light gray), darin, von einer Seite ausgehend, Schlieren überwiegend dunkleren, feineren Materials (10YR 6/1 bis 5/1 gray), weißlich

bis hellgrau (5Y 8/1 white bis 10YR 7/1 light gray) abgegrenzt, ins Zentrum hineinziehend; ca. 4-5 hellere Bänder im Randbereich in hellgrau (2.5Y 7/1 light gray), jeweils durch eine weißliche Linie abgegrenzt in derselben Farbe wie das äußerste Band (5Y 8/1 white); im Bruch Mitte gröber



Abb. 2 Borg. 16: weitere Bruchflächen.

Sägeschnitt (Abb. 3) insgesamt deutlich grauer als die Bruchseiten (GR); konzentisch gebändert (CB), mittig überwiegend dunkler (md); einzelne Farben: Zentrum (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), weißliche Schlieren im Zentrum und am Rande hellere Bänder (5Y 8/1 white) und (5Y 8/1 bis 8/2 white bis light gray); ziemlich porig

Einschlüsse: makroskopisch verstreut verschiedene Inhomogenitäten (≤ 4 mm) aus kleinen Gesteins- und anderen Komponenten; mit der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: in geringerem Umfang und eher außen feinkörnig, glatt (QU 2), weit überwiegend mittel- bis grobkörnig, matt und rau, porig (QU 3-4); insgesamt QU 3

Patinierung (PA)**:** ockerfarben (10YR 7/4 very pale brown) (vor allem Abb. 1 untere Hälfte).



Abb. 3 Borg 16: Sägeschnitt.

Borg. 17 – Beige-grauer, grobkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 511d
Schnitt: 5
Profil: S
Fundnr.: 1999

Größter Durchmesser: 179 mm
Gewicht: 2160 g



Abb. 1 Borg. 17: Hornstein mit besonders fossilreichem Cortex.

Grundform (Abb. 1 und 8)**:** weitgehend vollständige Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1 und 8)**:** außen rau (FR); bedeckt mehr als 80 % der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: beige (2.5Y 8/2 pale yellow) bis überwiegend rost-orange (7.5YR 6/8 bis 5/8 reddish yellow bis strong brown); besonders eine Seite übersät mit überwiegend stark fragmentierten **Fossilien** (FOS) (Abb. 1): Kammmuscheln (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata), Austern (Mollusca, Klasse Lamellibranchiata) (Abb. 3), Schnecke (Mollusca, Klasse Gastropoda) (Abb. 4), Platte einer Stachelwarze eines Seeigels (Echinodermata, Klasse Echinoidea) (Abb. 5), Armfüßer (Tentaculata, Klasse Brachiopoda) und wohl auch Teil eines Ammonitenkiefers (Abb. 2) sind deutlich zu erkennen; im Anschnitt weißlich



Abb. 2 Borg. 17: Vermutlich Teil eines Ammonitenkiefers im Cortex (Vergrößerung ca. 3,5x).



Abb. 3 Borg. 17: Fossile Auster im Cortex (Vergrößerung ca. 2,6x).



Abb. 4 Borg. 17: Fossile Schnecke im Cortex (Vergrößerung ca. 5x).



Abb. 5 Borg. 17: Stachelwarze eines Seeigels im Cortex (Vergrößerung ca. 3x).

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 8 rechts)**:** wegen starker Patinierung nur wenige Aussagen möglich: graubeigefarben (YG); konzentrisch gebändert (CB)

Sägeschnitt (Abb. 6): insgesamt graubeigefarben (YG); konzentrisch gebändert (CB), nicht eindeutig md/od; einzelne Farben: um hellgraues Zentrum (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray) konzentrisch 5 Bänder, abwechselnd weißlich (5Y 8/1 white) und beigefarben (10YR 8/1 bis 8/2 white bis very pale brown)

Einschlüsse: makroskopisch sichtbar viele verstreute stark zerscherbte **Fossilien** (FOS), gut erkennbar Seeigelstachelnegativ (Echinoidea) (Abb. 7); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln; typischer verkieselter Korallenkalk

Qualität des Rohmaterials: grobkörnig, stark porig, rau (QU 4), im Zentrum mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3); insgesamt QU 4

Patina (PA) (Abb. 8 rechts)**:** beige (10YR 8/2 very pale brown) bis hell ockerfarben (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow), teilweise relativ glatt (Abb. 2 rechts).





<u>oben:</u>
Abb. 6 Borg. 17: Sägeschnitt.

<u>links:</u>
Abb. 7 Borg. 17: Negativ eines Teils eines Seeigelstachels im Hornsteininneren (Vergrößerung ca. 10x).

<u>unten:</u>
Abb. 8 Borg.17: Zweite, weniger fossilreiche Cortexeite und Knolleninneres.



Borg. 18 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 505
Schnitt: 5
Fläche: 5
Fundnr.: 659

Größter Durchmesser: 132 mm
Gewicht: 938 g

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer relativ flachen Hornsteinknolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC)



Abb. 1 Borg. 18: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt gut ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orangefarben (Y); einzelne Farben: außen teilweise stark verwittert, dort hellbeige (10YR 8/2 bis 8/3 very pale brown), sonst ocker bis orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); braune

Flecken (7.5YR 5/6 strong brown) und grau-schwarze Punkte und Flecken (7.5YR 3/1 very dark gray); Inhomogenitäten ≤ 4 mm (teilweise **Fossilreste**)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt mittelgrau (GR); nur an einer Stelle konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: überwiegend hellgrau (GLEY1 8/N bis 8/10Y white bis light greenish gray) mit mittelgrauen Teilen und Flecken (GLEY1 6/N gray), um einen kleinen (< 2 mm) Kern ca. 25 Bänder, < 1 mm breit, nach außen hin immer feiner werdend, abwechselnd weißlich (GLEY1 8/N) und mittelgrau (GLEY1 6/N gray)



Abb. 2 Borg. 18: Knolleninneres.

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); fleckig, schlierig (SM); einzelne Farben: eine Hälfte mehr weißlich-grau (GLEY1 8/N white), in der anderen Hälfte grauer Kern (7.5YR 6/1 gray) mit 14 mm Durchmesser, wohl ehemaliger Tiergang, umgeben von drei Stapeln mit je ca. 9 schmalen Bändern in mittel- und hellgrau (10YR 6/1 gray und 10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray), im übrigen hellgrau (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray), fleckig grau-beige (10YR 6/2 light brownish gray) und weißlich (5Y 8/1 white)

Einschlüsse: eher einseitig, aber dort mittig, mehrere Inhomogenitäten von 2, 8 und 12 mm Durchmesser, u. a. Tiergänge mit Verfüllung, Mikrobenkrusten (Abb. 3 rechts); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität: teilweise sehr feinkörnig, teilweise glänzend (QU 1-2), etwas porig; insgesamt QU 2

Patinierung (PA): ockerfarbene Flecken ≤ 18 mm (7.5YR 7/6 reddish yellow), mittelgraue Flecken (GLEY1 6/N gray), grau-schwarze Punkte und Flecken (10YR 3/1 very dark gray), wohl von Mangan

Glanz: metallischer Glanz an zwei Stellen einer Bruchseite (2 mm und ≤ 9 mm).



Abb. 3 Borg. 18: Sägeschnitt.

Borg. 19 – Grauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 3111
Schnitt: 3
Fläche: 7
Fundnr.: 666

Größter Durchmesser: 95 mm
Gewicht: 249 g

Grundform: Natürlicher Trümmer (NSH) einer Hornsteinknolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC)



Abb. 1 Borg. 19: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt knapp ½ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-5 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orangefarben (Y); einzelne Farben: außen teilweise stark verwittert, hellbeige (10YR 8/3 very pale brown) bis orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); viele grau-schwarze Punkte und einige Flecken (7.5 4/1 bis 3/1 dark gray bis very dark gray)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich (WH); schwach konzentrisch gebändert (CB), Richtung Cortex dunkler (od); überwiegend aus dem Kern bestehend, dieser mittig gröber; einzelne Farben: hellgrau (10YR 7/1 light gray), zum Kernrand hin heller werdend (GLEY1 8/N bis 8/10Y white bis light greenish gray), Rand teilweise aus ca. zwei gleichfarbigen Bändern bestehend, wenig dunkler abgegrenzt, teilweise weißlich (GLEY1 8/N white) und hellgrau (GLEY1 7/N light gray) abgesetzt, teilweise mit einer Orientierung nicht parallel zum Kern

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); am Rand konzentrisch gebändert (CB), teilweise Richtung Cortex dunkler (od); einzelne Farben: eiförmiger grauer Kern (7.5YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray), ≤ 40 mm, von zwei bis sechs bläulich-grauen Bändern (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray) umgeben

Einschlüsse: makroskopisch vor allem mittig Inhomogenitäten < 6 mm Durchmesser, mittelgrau (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), der größte wohl von einem Tiergang; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: durchgehend sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA)**:** kaum; wenige grau-schwarze Punkte, wohl von Mangan (7.5Y 3/1 very dark gray).



Abb. 2 Borg 19: Knolleninneres.



Abb. 3 Borg. 19: Sägeschnitt.

Borg. 20 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Asch „Borgerhau“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 510
Schnitt: 5
Fläche: 8
Fundnr.: 1069

Größter Durchmesser: 111 mm
Gewicht: 483 g

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer fladenförmigen Hornsteinknolle (FN) aus Jurahornstein (JC)



Abb. 1 Borg. 20: Cortexseite mit Seelilientrochit im Querschnitt.

Cortex (Abb. 1): außen wenig rau (FR); bedeckt gut ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-15 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orangefarben (Y); einzelne Farben: außen teilweise stark verwittert, hellbeige (10YR 8/3 very pale brown) bis orange (7.5YR 6/6 reddish yellow); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); viele grau-schwarze Punkte und einige Flecken (10YR 3/1 very dark gray); **Fossilien** (FOS): fünf Querschnitte durch einen oder mehrere Seelilienstämme (Crinoidea) (Abb. 1 und 2)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3 links): insgesamt grau (GR); wohl zumindest am Rand gebändert (CB); einzelne Farben: hellgrau (GLEY1 7/10Y light greenish gray und GLEY1 7/N light gray)



Abb. 2 Borg. 20: Fossiler Seelilientrochit (Crinoidea), quer im Cortex (Vergrößerung ca. 3x).

Sägeschnitt (Abb. 4): insgesamt mittelgrau (GR); fleckig marmoriert (SM), am Rand konzentrisch gebändert, nicht deutlich md/od; einzelne Farben: um linsenförmigen bläulich- und beigefarben gefleckten Kern (7.5YR 7/2 pinkish gray und GLEY1 6/N bis 5/N gray), ≤ 68 mm, bis drei asymmetrische Bänder, fleckig bläulich grau (GLEY1 6/N gray) bis hellgrau (7.5YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray)

Einschlüsse: makroskopisch viele teils größere Spalten und Poren, zum Teil mit kleinen farblosen Kristallen im Inneren (Lupe); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 3 Borg. 20: Cortex und Knolleninneres (links).

Qualität des Rohmaterials: teilweise feinkörnig, glatt (QU 2), teilweise mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3), größere Poren; insgesamt QU 3

Patinierung (PA)**:** wenig hellorange (7.5YR 7/6 reddish yellow); wenige grau-schwarze Punkte, wohl von Mangan (7.5Y 3/1 very dark gray).



Abb. 4 Borg. 20: Sägeschnitt.

IV Fundstelle Wippingen „Höfermahd“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis

Wipp. 1 – Grauer, überwiegend mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 205
Schnitt: 2
Fläche: 3
Fundnr.: 40

Größter Durchmesser: 126 mm
Gewicht: 885 g



Abb. 1 Wipp. 1: Cortex.

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer Hornsteinknolle (ND) mit drei Bruchflächen aus gebändertem Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR) mit welligen Strukturen; bedeckt knapp 50 % der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-3 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: hellbeige (10YR 8/3 very pale brown) bis orange (7.5 YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); wenig rostfarbene Flecken (5YR 6/8 reddish yellow) und grau-schwarze Punkte (7.5YR 3/1 very dark gray), wohl von Mangan; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), Kern dunkler (md) als der Randbereich; einzelne Farben: in der Mitte leicht violettstichiges grau (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), begleitet von grau (10YR 7/1 light gray), Bänder im Randbereich ≥ 1 weißliches (5Y 8/1 white) und ≥ 1 hellgraues Band (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray); dunklere Flecken (7.5YR 6/1 bis 5/1 gray) zwischen 1 mm und 19 mm, die größeren wohl ehemalige Tiergänge

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); Knolleninneres dunkler als Randbereich (md), fleckig, schlierig (SM), aber am Rand wenige konzentrische Bänder; einzelne Farben: ≤ 5 Bänder abwechselnd weißlich (7.5YR 8/1 white) und hellgrau (7.5YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray), nicht scharf abgegrenzt, großer Mittelbereich weniger violettstichig, etwas gräulicher (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), am Rand etwas heller (7.5YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray); dunklere Flecken gräulicher (GLEY1 6/N bis 5/N gray)

Einschlüsse: makroskopisch verstreut viele Komponenten, auch Mikrobenkrusten, unter anderem vermutlich ehemaliger Tiergang (≤ 9 mm), ockerfarben (7.5YR 7/6 reddish yellow); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 2 Wipp. 1: Bruchfläche.

Qualität des Rohmaterials: weit überwiegend mittelkörnig, matt, porig (QU 3) (Abb. 2), im Randbereich nur teilweise feinkörnig, glatt (QU 2); insgesamt QU 3

Patinierung (PA)**:** wenig hell rostfarbene Auflagerungen (10YR 7/6 bis 6/6 yellow bis brownish yellow); grau-schwarze Punkte, wohl von Mangan

Glanz: auf zwei Bruchflächen mehr im Randbereich als Strich 7 mm lang und unregelmäßig gestrichelte Fläche mit ≤ 14 mm Ausdehnung.



Abb. 3 Wipp. 1: Sägeschnitt.

Wipp. 2 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 206
Schnitt: 2
Fläche: 4
Fundnr.: 47

Größter Durchmesser: 59 mm
Gewicht: 70 g







Grundform (Abb. 1)**:** Trümmer (SH) einer nicht gebänderten Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit fünf Bruchflächen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt gut $^{1}/_{3}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: weißlich (2.5Y 8/1 white), meist orange-braun (5YR 5/6 bis 5/8 yellowish red), ein Abschlag auf dem Cortex (vermutlich intentional); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich (WH), undeutlich konzentrisch gebändert (CB), Kern etwas dunkler (md); Kern weißlich-grau (2.5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray), Randbereich weißlich (2.5Y 8/1 white)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt noch stärker weißlich (5Y 8/1 white) (WH), Kern nur wenig dunkler (md) und Bänderung kaum erkennbar

Einschlüsse: makroskopisch kleinere Inhomogenitäten bis 2 mm Durchmesser verstreut; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA): leichte ocker- bis hellorangefarbene Verfärbungen (10YR 7/8 yellow bis 7.5YR 7/6 reddish yellow).

oben: *Abb. 1 Wipp. 2: Cortex.*

Mitte: *Abb. 2 Wipp. 2: Bruchseite.*

unten: *Abb. 3 Wipp. 2: Sägeschnitt.*

Wipp. 3 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 206
Schnitt: 2
Fläche: 4
Fundnr.: 47

Größter Durchmesser: 101 mm
Gewicht: 310 g



Abb. 1 Wipp. 3: Cortex und eine der Bruchflächen.

Grundform (Abb. 1): Natürlicher Trümmer (NSH) einer gebänderten Hornsteinknolle (ND) mit drei Bruchflächen aus Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1)**:** außen relativ glatt (TH) bis rau (FR), flache Wellenstrukturen; bedeckt < ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); relativ glatter Cortex < 1 mm dick, ferner poröser Cortex bis 5 mm dick (Abb. 1 rechts); insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: beigefarben (10YR 8/3 very pale brown) bis braun (7.5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis strong brown) besonders der dicke Cortex; dunkelgraue (10YR 4/1 dark gray) bis schwarze Punkte, wohl von Mangan; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: Kern weißlich (2.5Y 8/1 white), von ca. 4 helleren und dunkleren Bändern umgeben, dunklere Bänder hellgrau (2.5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray), hellere Bänder weißlich (2.5Y 8/1 white)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH), im Sägeschnitt grauer als von außen erwartet; konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: Kern und äußerstes Band weißlich (5Y 8/1 white), dazwischen zum Teil unscharfe hellgraue (7.5Y 7/1 light gray) und weißliche Bänder; violetter Fleck (10R 6/1 bis 6/2 reddish gray bis pale red) von ≤ 19 mm Durchmesser von vermutlich ehemaligem Tiergang oder Peloid

Einschlüsse: makroskopisch kleine Inhomogenitäten bis 2 mm Durchmesser, stärker mittig verstreut, evtl. ehemaliger Tiergang < 6 mm, grau (7.5YR 6/1 gray); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 2 Wipp. 3: zwei weitere Bruchflächen.

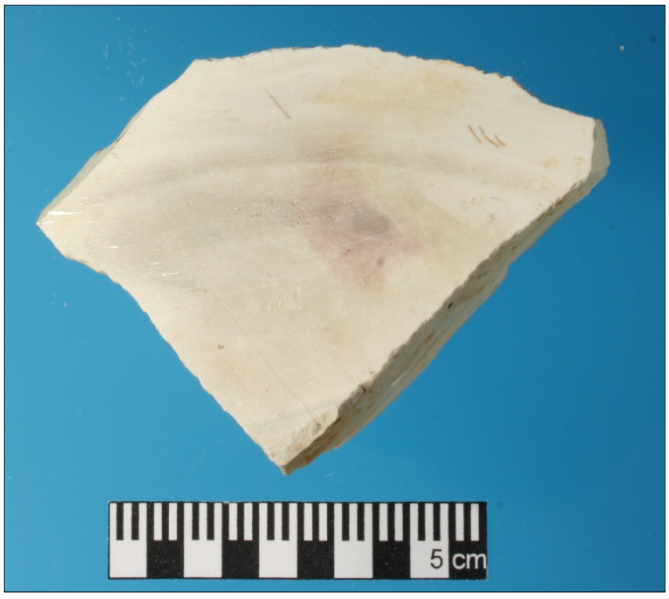


Abb. 3 Wipp. 3: Sägeschnitt.

Qualität des Rohmaterials: uneinheitlich**,** Abschlussband am Rand überwiegend sehr feinkörnig, glatt, teilweise glänzend (QU 1-2), sonst überwiegend feinkörnig, glatt (QU 2); insgesamt QU 2

Patinierung (PA)**:** orangefarbene Verfärbungen (7.5YR 7/6 reddish yellow); schwarze Punkte, wohl von Mangan

Glanz: auf einer der Bruchflächen fünf Stellen von 6 und 15 mm (Abb. 3 unten rechts) Durchmesser mit starkem Glanz, auch auf den anderen Bruchflächen (Abb. 2 unten) drei kleine Glanzflecken bis 6 mm Größe.

Wipp. 4 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 205
Schnitt: 2
Fläche: 3
Fundnr.: 42

Größter Durchmesser: 114 mm
Gewicht: 407 g

Grundform: Getesteter Trümmer (TSH) einer Hornsteinknolle (ND) mit zwei Bruchflächen aus Jurahornstein (JC) mit drei, zum Teil sicher rezenten, Abschlagsnegativen



Abb. 1 Wipp 4: Cortex und Aufsicht auf eine der Bruchflächen.

Cortex (Abb. 1 oben und unten): außen rau (FR), teilweise mit welligen Strukturen; bedeckt ca. 40 % der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-3 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker- orangefarben (Y); einzelne Farben: hellbeige (10YR 8/3 very pale brown) bis ocker-orange (7.5 YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); viele rostfarbene und braune Punkte und Flecken (7.5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis strong brown und 7.5YR 4/3 brown), grau-schwarze Punkte (7.5YR 3/1 very dark gray), wohl von Mangan; im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: Kern und Randbereich etwa gleich hell (7.5YR 8/1 white), das obere linke Viertel in Abb. 2 außen von ca. fünf hellgrauen (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) weißlich geränderten Bändern (5Y 8/1 white) umzogen, fünf größere hellgraue Flecken (5Y 7/1 light gray), vor allem am Rand im linken Teil der Knolle (Abb. 2), einer auch rechts; schwach rosafarbene Verfärbung (7.5YR 8/2 pinkish white) rechts



Abb. 2 Wipp. 4: Aufsicht auf die zweite Bruchfläche.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); nur am Rand schwach gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: Zentrum weißlich (5YR 8/1 white), am Rand gräulicher; im Zentrum hellrosa-violette Verfärbung (10R 8/2 bis 7/2 pinkish white bis pale red) und winzige (≤ 1 mm) pinkfarbene Inhomogenitäten (10R 7/3 pale red); mehrere bräunlich graue Einschlüsse (7.5YR 6/1 bis 5/1 gray)

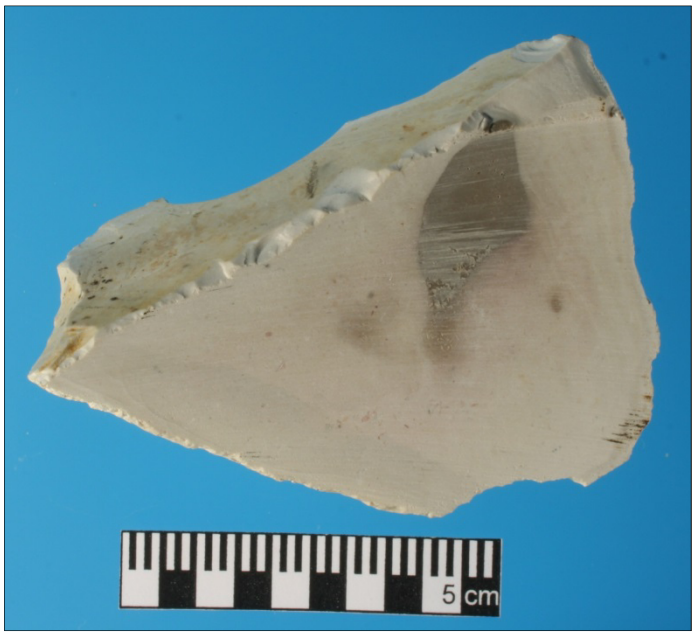


Abb. 3 Wipp. 4: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch mittig viele Komponenten, so auch fünf dunklere grau-braune Einschlüsse (7.5YR 5/2 brown), davon vier aus wenig gröberem Material mit 25 (Abb. 3) und 3-8 mm Durchmesser, wohl Peloide; unter der Lupe und im Dünnschliff eine mittlere Menge an Schwammnadeln (Abb. 4)

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)



Abb. 4 Wipp. 4: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop mit 2 Schwammnadeln (rechter und oberer Rand) (gesamter Maßstab 1 mm).

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 2): ockerfarbene Verfärbungen (10YR 7/6 yellow) und Ausblühungen (7.5YR 7/8 bis 5/8 reddish yellow bis strong brown) auf etwa der Hälfte des sichtbaren Inneren; Aggregate von braunen Punkten und dunkelgraue Punkte

Glanz: auf der größten Bruchfläche (Abb. 2 rechts) ein erhöhter Bereich mit vielen Glanzpunkten von ≤ 22 mm Größe, ein zweiter Bereich aus drei Glanzstreifen von insgesamt 7 mm Länge.

Wipp. 5 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 206
Schnitt: 2
Fläche: 4
Fundnr.: 45

Größter Durchmesser: 110 mm
Gewicht: 551 g

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher scheibenförmiger Trümmer (NSH) einer nur im Randbereich gebänderten Knolle (ND) mit zwei Bruchflächen aus Jurahornstein (JC)



Abb. 1 Wipp. 5: Cortex und eine der Bruchflächen.

Cortex (Abb.1)**:** außen rau (FR); stark verwittert, an seiner Oberfläche teils wellig, teils porös; bedeckt etwa die halbe Oberfläche (2, ≥ 50 %); > 2-7 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ockerfarben (7.5YR 7/6 reddish yellow) bis rötliches Braun (7.5YR 5/4 brown); mit vielen grau-schwarzen Punkten (5YR 3/1 very dark gray), vermutlich Mangan; im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: Kern mit ovalem Querschnitt (≤ 53 mm), weißlich (10YR 8/1 white), umgeben von ca. vier hellgrauen (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray) und weißlichen (10YR 8/1 white) Bändern

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt mittelgrau (GR); am Rand gebändert (CB), mittig teilweise heller (Abb. 2), teilweise auch dunkler, nicht eindeutig md/od; einzelne Farben: im Hornsteininneren deutlich grauer als die Bruchflächen (10R 7/1 bis 6/1 light gray bis reddish gray), außerdem leicht rosa-violettfarben (10R 7/2 bis 6/2 pale red) im Zentrum, Richtung Cortex vier Bänder: abwechselnd hellgrau (7.5YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray) und weißlich (heller als 7.5YR 8/1 white); die äußersten beiden Bänder sind teilweise so stark verwittert, dass der Anschein eines besonders dicken Cortex entsteht (Abb. 1); kleine Inhomogenitäten (≤ 1 mm), u. a. pinkfarbener Punkt (10R 5/4 weak red), kleinere Poren (≤ 2 mm) (Abb. 2)



Abb. 2 Wipp. 5: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch mehr mittig viele Komponenten verschiedener Größe (≤ 10 mm & ≤ 1 mm) und Färbung im Sägeschnitt: weißlich (7.5YR 8/1 white), mittelgrau gerändert (7.5YR 6/1 gray) mit wenigen grauen und rostfarbenen Inhomogenitäten (≤ 2 mm); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 3 Wipp. 5: Aufsicht auf die zweite Bruchfläche.

Qualität des Rohmaterials: relativ feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 1 & 3)**:** ockerfarben bis orange (7.5YR 7/6 bis 7/8 reddish yellow), teilweise auch rostbraun (5YR 5/6 yellowish red), besonders am Scheibenrand und auf einer Bruchseite (Abb. 3), mit dunkelbraunen bis schwarzen Punkten und kleinen Flecken (5YR 3/3 bis 3/1 dark reddish brown bis very dark gray), wohl von Mangan; auf einer der Bruchflächen Einschluss von ≤ 44 mm, ocker (10YR 8/4 very pale brown) und grau (10YR 6/1 gray) gefleckt (Abb. 1 links unten).

Wipp. 6 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 206
Schnitt: 2
Fläche: 4
Fundnr.: 47

Größter Durchmesser: 115 mm
Gewicht: 309 g

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer nur schwach gebänderten Knolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit drei Bruchflächen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt ca. ein Drittel der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ockerfarben bis braun (7.5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis strong brown); dunkelgraue Flecken und Punkte (7.5YR 2.5/1 black); im Anschnitt ockerfarben



Abb. 1 Wipp. 6: Cortex und zwei der Bruchflächen.

Sichtbares Knolleninneres: insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: im Querschnitt (Abb. 1 unten) linke Hälfte mehr hellgrau (5Y 7/1 light gray), rechte mehr weißlich (5Y 8/1 white), am Rand (Abb. 2) von ca. sechs abwechselnd hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) und weißlichen (5Y 7/1 white) Bändern von 1-7 mm Breite umgeben

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH), deutlich heller als die Bruchseiten; Richtung Cortex konzentrisch gebändert (CB), Zentrum im Wesentlichen dunkler als der Randbereich (md); einzelne Farben: vor allem im Zentrum dunkleres hellgrau (GLEY1 7/N white) als außen (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray), dort unter dem Cortex sieben Bänder in verschiedenen Hellgrau und Weiß-Tönungen; im Schnitt fast lineare Trennung verschiedener Bereiche durch mittelgraue (GLEY1 6/N gray) und mehrere orangefarbene (7.5YR 7/6 reddish yellow) Linien ehemaliger Bruchflächen; sonst relativ homogen

Einschlüsse: eher mittig kleine Inhomogenitäten bis 2 mm Durchmesser; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 2 Wipp. 6: Aufsicht auf die dritte Bruchseite.



Abb. 3 Wipp. 6: Sägeschnitt.

Qualität des Rohmaterials: überwiegend feinkörnig glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 2): vor allem auf zwei der Seiten großflächig ockerfarbene (10YR 8/4 bis 8/6 very pale brown bis yellow) bis orangefarbene (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) Verfärbungen, wenige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte

Glanz: Glanzpunkt 3 mm auf der erhöhten Ecke der Bruchfläche (Abb. 1 rechts unten).

Wipp. 7 – Stark ocker- und blaugraufarbener, heterogener Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: 11.08.2005
Waypoint: 4
Fundnr.: 4-1

Größter Durchmesser: 116 mm
Gewicht: 467 g

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JB) mit drei patinierten Bruchflächen



Abb. 1 Wipp. 7: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt ca. $^{1}/_{6}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-2 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: beige (10YR 8/3 bis 8/4 very pale brown) und ocker-orangefarben (7.5YR 7/4 bis 7/6 pink bis reddish yellow) bis braun (10YR 6/6 bis 5/6 brownish yellow bis yellowish brown); orangefarbene Flecken (7.5YR 7/6 reddish yellow) und dunkelgraue Flecken und Punkte (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3): insgesamt fleckig (SM) beige-grau (YG) erscheinend

Sägeschnitt (Abb. 2)**:** insgesamt ocker bis braun (YB) und blaugrau (GR); fleckig marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: unter dem Cortex teils weißliches (10YR 8/1

white), vor allem beigefarbenes Band (10YR 8/2 very pale brown), sonst stark ockerfarben (7.5YR 6/4 bis 6/6 light brown bis reddish yellow), dort teilweise schwach gebändert, mit blau-grau (GLEY1 6/N bis 5/N gray) marmoriert

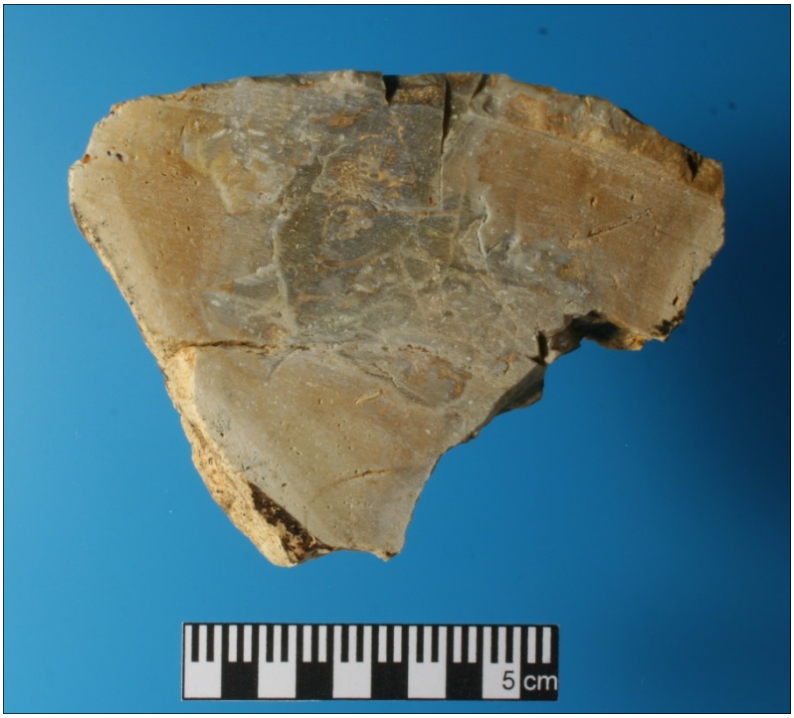


Abb. 2 Wipp 7: Sägeschnitt.

Einschlüsse (Abb. 3)**:** makroskopisch verstreut viele verschiedene Komponenten, viele gröbere Partikel; **Fossilien** (FOS): Wurmröhre (Polychaeta), Seeigelstachel (Echinoidea); aufgeschlagene Druse ($\leq$ 12 mm) mit hellgrauer, kristalliner Füllung; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln; kleinere Drusen $\leq$ 5 mm und $\leq$ 2 mm, teils mit beigefarbenen, teils farblosen Kristallen

Qualität des Rohmaterials: grobkörnig, Bruchfläche rau, grobporig (QU 4)

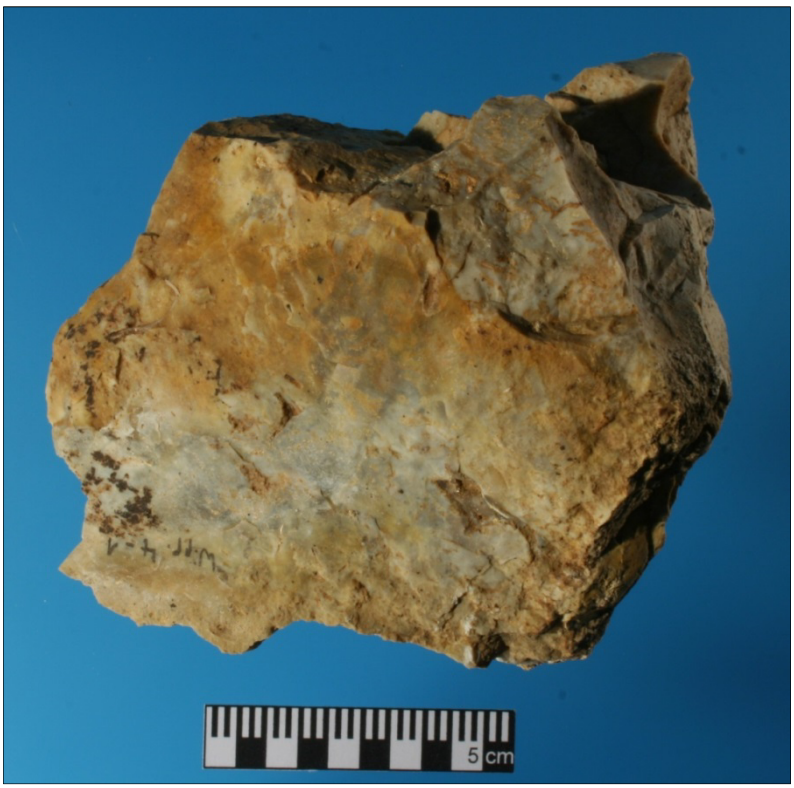


Abb. 3 Wipp. 7: Knolleninneres.

Patinierung (Abb. 3): großflächig ocker- bis orangefarbene (10YR 7/6 bis 6/6 yellow bis brownish yellow) und beigefarbene (10YR 7/3 yellowish brown) Verfärbungen, auf einer der Bruchseiten besonders stark; einige dunkelgraue (10YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan.

Wipp. 8 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: 11.08.2005
Waypoint: 5
Fundnr.: 5-1

Größter Durchmesser: 108 mm
Gewicht: 108 g

Grundform (Abb. 1)**:** segmentförmiger Trümmer (SH) einer Hornsteinknolle (ND) unbekannter Form mit mindestens drei patinierten Bruchflächen; Kantenbeschädigungen nicht intentional



Abb. 1 Wipp. 8: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ockerfarben (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); braune Flecken (7.5YR 4/4 brown) und dunkelgraue Punkte (7.5YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich bis beigefarben



Abb. 2 Wipp. 8: Knolleninnneres.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH), wohl gebändert (CB); einzelne Farben: sehr hellgrau (2.5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), die Mitte dunkler (md); einzelne Farben: unter der Rinde hellgrau (GLEY1 7/N light gray), darunter ein bis 10 mm breites weißliches Band (5Y 8/1 white), zur Mitte hin hellgrau (7.5YR bis 7/1 light gray)



Abb. 3 Wipp. 8: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch mittig viele Komponenten, darunter auch zwei linsenförmige Inhomogenitäten von ≤ 5 mm Durchmesser, bräunlich-grau (7.5YR 6/2 bis 6/3 pinkish gray bis light brown); eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 2): großflächig ockerfarbene (10YR 8/3 very pale brown) Verfärbungen; dunkelrostfarbene überwiegend strichförmige Verfärbungen (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red) auf zwei Bruchseiten, wohl vom Pflug; einige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan.

Wipp. 9 – Ockerfarbener, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: 11.08.2005
Waypoint: 5
Fundnr.: 5-2

Größter Durchmesser: 85 mm
Gewicht: 262 g



Abb. 1 Wipp. 9: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1): Getesteter Trümmer (TSH) einer flachen Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (BC) mit zwei patinierten Bruchflächen; ein Abschlagsnegativ (Abb. 3)

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; lineare Eintiefungen, teilweise parallel gebogen; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ocker-braun (10YR 6/4 bis 5/4 light yellowish brown bis yellowish brown); braune Flecken (10YR 5/3 bis 5/4 brown bis yellowish brown) und dunkelgraue Punkte und Flecken (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (7.5YR 8/1 white)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3)**:** soweit erkennbar ocker bis braun (YB); konzentrisch gebändert (CB)

Sägeschnitt (Abb. 2)**:** insgesamt ocker bis braun (YB); konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: linsenförmiges Zentrum (≥ 27 mm) ocker (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow), zur Bruchseite hin heller werdend (bis 7.5YR 8/1 white), umgeben von einem ockerfarbenen (7.5YR 7/4 bis 6/4 pink bis light brown), dunkler abgegrenzten (7.5YR 5/2 brown) Band, zum Cortex hin weiter ockerfarben (7.5YR 7/4 bis 6/4 pink bis light brown)

Einschlüsse: makroskopisch nur kleine, verstreute Inhomogenitäten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)



Abb. 2 Wipp. 9: Sägeschnitt.

Patinierung (PA) (Abb. 3): großflächig ocker- bis orangefarbene (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) und graubraune (10YR 6/2 light brownish gray) Verfärbungen; dunkelrostfarbene (5YR 3/3 bis 3/4 dark reddish brown), überwiegend strichförmige Verfärbungen auf beiden Bruchseiten, wohl vom Pflug; einige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan.



Abb. 3 Wipp. 9: Bruchfläche mit Patinierung.

Wipp. 10 – Beige-grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: 11.08.2005
Waypoint: 5
Fundnr.: 5-10

Größter Durchmesser: 98 mm
Gewicht: 338 g



Abb. 1 Wipp. 10: Cortexseite.



Abb. 2 Wipp. 10: Sägeschnitt.

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer fladenförmigen Knolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit zwei patinierten Bruchflächen und Kantenbeschädigungen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt ca. ¾ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 2 mm dick; insgesamt beige bis braun (YB); teilweise stark verwittert, dort heller, verschiedene Verwitterungsmuster; einzelne Farben: rötliches ocker (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) und beige (10YR 8/2 bis 8/3 very pale brown); braune Flecken 7.5YR 5/4 brown) und dunkelgraue Punkte und Flecken (10YR 3/1very dark gray), wohl von Mangan; im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3)**:** vermutlich hellgrau (WH); Bänderung nicht erkennbar

Sägeschnitt (Abb. 2)**:** insgesamt beigegrau (YG), dunkler als vermutet; schlierig marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: vor allem im linsenförmigen Zentrum weißlich (10YR 8/1 white) und grau (10YR 7/1 light gray, 6/1 und

wenig 5/1 gray) marmoriert, zum Cortex hin überwiegend etwas heller werdend (10YR 8/1 bis 7/1 white light gray)

Einschlüsse: makroskopisch viele Komponenten verschiedener Größe und Färbung, vor allem zwischen 2 und 6 mm, verstreut, aber stärker mittig; unter der Lupe viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: eher feinkörnig, glatt (QU 2)



Abb. 3 Wipp.10: Knolleninneres, patinierte Bruchseite.

Patinierung (PA) (Abb. 3): großflächig ockerfarbene (10YR 8/3 very pale brown) bis graue (2.5Y 6/1 bis 5/1 gray) Verfärbungen; dunkelrostfarbene (7.5YR 5/6 bis 4/6 strong brown), überwiegend strichförmige Verfärbungen auf beiden Bruchseiten, wohl vom Pflug; runder ≤ 7 mm großer, kreisförmiger, rostfarbener (7.5YR 6/6 reddish yellow) Fleck, einige dunkelgraue (10YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan

Glanz: Glanzstreifen 11 mm lang, ≤ 1 mm breit und Glanzpunkt ≤ 4 mm auf einer Bruchfläche, aber nicht auf der höchsten Stelle (Abb. 3 rechts oben und Mitte).

Wipp. 11 – Beige-grauer, grobkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: Lynn Fisher, Elfriede Samo, 25.08.2006
Fundnr.: Wipp. 06-24

Größter Durchmesser: 143 mm
Gewicht: 689 g

Grundform (Abb. 1)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer wohl eher flachen Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (BC) mit zwei patinierten Bruchflächen



Abb. 1 Wipp. 11: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-7 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ocker-braun (7.5YR 6/4 bis 6/6 light brown bis reddish yellow); größere braune Flecken und Punkte (7.5YR 4/3 bis 3/2 brown bis dark brown), wenige schwarze Punkte, auch linear angeordnet (7.5YR 2.5/1 black); im Anschnitt weißlich (7.5YR 8/1); keine erkennbaren Fossilien

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt beige-grau (YG); Bänderung unklar, Mitte dunkler (md); einzelne Farben: beige-grau (10YR 7/2 bis 7/3 light gray bis very pale brown), Richtung Mitte leicht rosa-violett (5YR 7/3 pink), am Rand ein schmales weißliches Band (10YR 8/1 white); rostige Pflugspuren



Abb. 2 Wipp. 11: Wenig patinierte Bruchfläche mit rostfarbenen Spuren des Pfluges.



Abb. 3 Wipp. 11: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt beige-grau (YG); konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: Zentrum beige-grau (10YR 6/1 bis 6/2 gray bis light brownish gray), Bänder dunkler abgegrenzt (7.5YR 5/1 bis 5/2 gray bis brown) gegenüber dem kaum helleren inneren Randbereich, zum Cortex hin mindestens zwei weißliche Schichten (7.5 YR 8/1 white), je-

weils hell beige-grau abgegrenzt, auch Richtung patinierter Bruchkante (links) etwas heller orangefarbenes schmales Band (7.5YR 6/6 reddish yellow)

Einschlüsse: makroskopisch viele Komponenten und Inhomogenitäten; **Fossilien** (FOS): Schalenreste (Abb. 3 rechts unten); unter der Lupe viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: hart; grobkörnig, Bruchfläche rau (QU 4)

Patinierung (PA) (Abb. 2): großflächig orangefarbene (7.5YR 7/6 bis 7/8 reddish yellow) Verfärbungen; dunkelrostfarbene (5YR 3/3 bis 3/4 dark reddish brown), überwiegend strichförmige Verfärbungen auf einer der patinierten beiden Bruchseiten, wohl vom Pflug; einige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte auf der anderen patinierten Bruchfläche, wohl von Mangan.

Wipp. 12 – Weißlicher, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: Lynn Fisher, Elfriede Samo, 25.08.2006
Fundnr.: Wipp. 06-4

Größter Durchmesser: 99 mm
Gewicht: 308 g



Abb. 1 Wipp. 12: Patinierte Grundform mit seitlichem Cortex.

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** ungefähr scheibenförmiger Kern (CO) einer Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit zwei patinierten Bruchflächen und ein patinierter Bruch; vier Abschlagsnegative, ferner Absplitterungen

Cortex (Abb. 1)**:** rau (FR); bedeckt knapp $^{1}/_{10}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ocker-braun (7.5YR 7/4 bis 6/4 pink bis light brown); dunkelbraune Flecken (10YR 4/2 dark grayish brown) und dunkelgraue Punkte und Flecken (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1 und 3)**:** insgesamt weißlich (WH); unklare Musterung (IN); einzelne Farben: weißlich (10YR 8/1 white) und hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray), unter dem Cortex ein wohl schmaleres weißliches Band

Sägeschnitt (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); unregelmäßig konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: Mitte hellgrau (10YR 7/1 light gray), wird durch weißliches Band (10YR 8/1 white) im Querschnitt, < 4 mm breit, nach außen abgegrenzt und rahmt den wohl ehemaligen Tiergang ein, zum Cortex hin ein weiteres hellgraues Band (10YR 7/1 light gray), das fließend in das weißliche Band (10YR 8/1 white) unterhalb des Cortex übergeht; im weiteren Sägeschnitt teilweise Störung durch ein weiteres wenig dunkleres hellgraues Band (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) und patinierten Querbruch



Abb. 2 Wipp. 12: Sägeschnitt.

Einschlüsse (Abb. 2): makroskopisch dunkler gefärbte (10YR 6/2 bis 5/2 light brownish gray bis grayish brown) eiförmige Inhomogenität aus gröberem Material, wohl ein ehemaliger verfüllter Tiergang, ≤ 25 mm (auch Abb. 3 Mitte), darüber drei kleinere (≤ 6 mm) weitere Inhomogenitäten aus demselben Material und eine weitere bräunlich graue (10YR 6/2 light brownish gray) Inhomogenität aus feinerem Material, ≤ 13 mm; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln



Abb. 3 Wipp. 12: Patinierte Bruchfläche mit Abschlagsnegativen.

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 3): großflächig ocker- bis orangefarbene (10YR 7/6 bis 7/8 yellow) Verfärbungen; dunkelrostfarbene (5YR 3/3 bis 3/4 dark reddish brown), überwiegend strichförmige Verfärbungen auf beiden Bruchseiten, wohl vom Pflug; einige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan.

Wipp. 13 – Grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: Lynn Fisher, Elfriede Samo, 25.08.2006
Fundnr.: Wipp. 06-5

Größter Durchmesser: 104 mm
Gewicht: 254 g



Abb. 1 Wipp. 13: Cortexseite mit Kantenbeschädigungen.



Abb. 2 Wipp. 13: Patinierte Bruchfläche.

Grundform (Abb. 1)**:** Trümmer (SH) einer flachen Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit einer patinierten Bruchfläche; ein Abschlagsnegativ (Abb. 1 rechts oben); reichlich Kantenbeschädigungen, wahrscheinlich vom Pflug

Cortex (Abb. 1)**:** rau (FR); bedeckt gut ½ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: beigefarben bis hellocker (10YR 7/4 very pale brown); braune Flecken (7.5YR 4/3 bis 3/3 brown) und dunkelgraue Punkte und Flecken (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (7.5YR 8/1 white)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); wohl schwach konzentrisch gebändert (CB), mittig dunkler als am Rand (md); einzelne Farben: am Rand weißliches Band (10YR 8/1 white), in der Mitte hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray); dunkelrostfarbene (5YR 4/3 bis 3/3 reddish brown

bis dark reddish brown), hellrostfarben verlaufende (5YR 5/6 über 6/6 bis 7/6 yellowish red bis reddish yellow), überwiegend strichförmige Verfärbungen auf beiden Bruchseiten, wohl vom Pflug

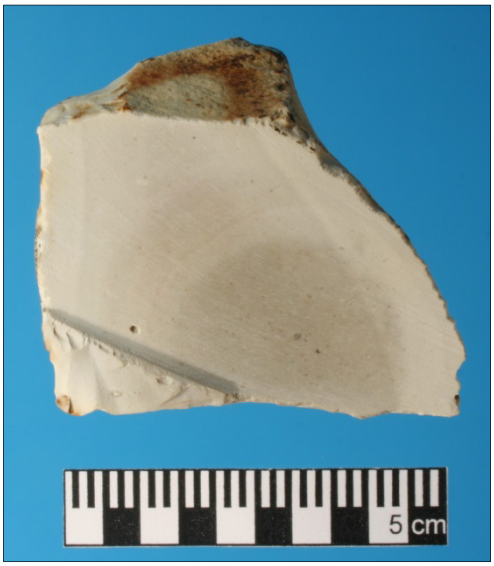


Abb. 3 Wipp. 13: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt grau (GR); konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: unter dem Cortex weißes Band (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar), ≤ 7 mm breit, dieses nach innen durch ein dünnes hellgraues Band abgegrenzt (2.5YR 8/1 bis 7/1 white bis light reddish gray), graues Zentrum (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), liegt in schwach rosa-violettfarbenem sehr hellem Grau (2.5YR 8/1 white)

Einschlüsse: makroskopisch nur kleine, verstreute Inhomogenitäten, < 4 mm, vor allem im dunkleren Bereich; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 2): flächig beigefarben patiniert (10YR 8/1 bis 8/2 white bis very pale brown), am Rand ocker- bis rostfarbene (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) Verfärbungen; dunkelrostfarbene (5YR 3/3 bis 3/4 dark reddish brown), überwiegend strichförmige Verfärbungen auf der patinierten Bruchseite wie auf den übrigen, wohl vom Pflug; einige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan

Glanz: < 5 mm auf dem Cortex.

Wipp. 14 – Weißlicher, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Lesefund: 25.08.2006
Fundnr.: UN 122

Größter Durchmesser: 118 mm
Gewicht: 305 g



Abb. 1 Wipp. 14: Cortex und patinierte Bruchfläche.

Grundform (Abb. 1)**:** Trümmer (SH) einer Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit zwei patinierten Bruchflächen; ein mögliches Abschlagsnegativ

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farbe: ocker (10YR 7/4 very pale brown); rostbraune Flecken (5YR 5/6 bis 4/6 und 3/4 yellowish red und dark reddish brown) und übersät mit dunkelgrauen Punkten und Flecken (10YR 4/1 bis 3/1 dark gray bis very dark gray); im Anschnitt weißlich (7.5YR 8/1 white)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); Bänderung unklar (IN), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: weißlich (10YR 8/1 white) und hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) im Hornsteininneren unregelmäßig angeordnet, in Verlängerung eines vermutlichen ehemaligen Tiergangs feine Bänderung in weißlich und rosa-violett (10R 7/2 bis 7/3 pale red) (Abb. 2 links unten)



Abb. 2 Wipp. 14: Bruchfläche mit Rosa-Violettfärbung und Einschluss, vermutlich Tiergang.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH), zum Cortex hin weiß; sonst inhomogene Farbverteilung (IN); einzelne Farben: ein wohl ursprünglicher Tiergang, mit gröberem, grauen Material gefüllt (GLEY1 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), < 16 mm Durchmesser, umgeben von hellgrauem Hornstein (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray) mit rosa-violettfarbenen Flecken (10R 7/2 bis 6/2 pale red) unterschiedlicher Farbintensität und Größe, unterhalb des Cortex weiße Schicht (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar), ≤ 6 mm dick



Abb. 3 Wipp. 14: Sägeschnitt.

Einschlüsse (Abb. 2 und 3): makroskopisch eine große (≤ 44 mm) Inhomogenität von dunklerer Farbe (10YR 5/3 brown) und gröberer Struktur mit kleinen schwarzen Einsprengseln (10YR 2/1 black), abgegrenzt durch ein noch dunkler graubraunes Band (10YR 4/2 dark grayish brown) von ≤ 4 mm Breite, vermutlich ehemaliger Tiergang (Abb. 2 unten; Abb. 3 rechts unten); verstreut weitere kleinere Inhomogenitäten (≤ 4 mm); unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: überwiegend sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA) (Abb. 3): ocker- bis orangefarbene Bänder (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow), rostrote bis braune Flecken (2.5YR 5/8 bis 4/8 red); kleine dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan

Glanz: zwei < 2 mm schmale und ≤ 4 mm kurze Streifen auf je einer patinierten und jüngeren Bruchfläche leicht erhaben angeordnet.

Wipp. 15 – Hellgrauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Wippingen „Höfermahd, Hinter der Esch“, Gemeinde Blaustein, Alb-Donau-Kreis
Sediment: 205
Schnitt: 2
Fläche: 4
Fundnr.: 46

Größter Durchmesser: 128 mm
Gewicht: 373 g

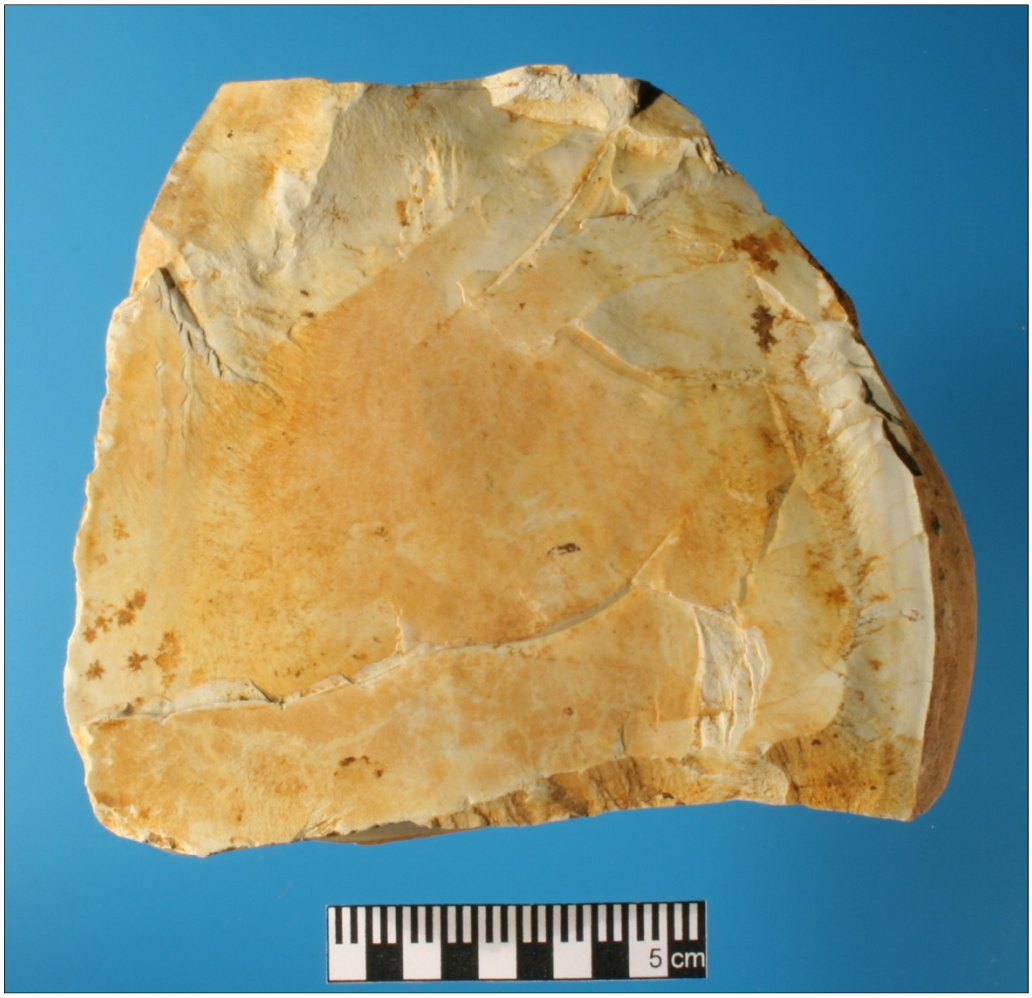


Abb. 1 Wipp. 15: Patinierte Bruchfläche mit Cortex rechts.

Grundform (Abb. 1)**:** Scheibenförmiger natürlicher Trümmer (NSH) mit etwa birnenförmiger Grundfläche einer Knolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit vier patinierten Bruchflächen; Kantenbeschädigungen

Cortex (Abb. 1 und 2)**:** außen rau (FR) mit erhabenen Strukturen, teilweise abgearbeitet und dann glatter; bedeckt ca. $^{1}/_{6}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: ocker-braun (7.5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow und 7.5YR 4/6 strong brown); dunkelgraue Punkte und Flecken (10YR 4/1 bis 3/1 dark gray bis very dark gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Wipp. 15: Zweite patinierte Bruchfläche mit seitlichem Cortex.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); am Rand leicht konzentrisch gebändert (CB), Mitte etwas dunkler (md); einzelne Farben: Mitte hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray), außen weißlich (10YR 8/1 white) mit sehr hellgrauen dünnen Abgrenzungslinien



Abb. 3 Wipp. 15: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); schwach konzentrisch gebändert (CB), innen dunkler (md); einzelne Farben: Mitte hellgrau (10YR 7/1 light gray), teilwei-

se leicht rosa-violett eingetönt (2,5YR 6/2 pale red) um ≤ 5 mm langen dunkler rosa-violetten Strich (10R 5/2 weak red), außen heller hellgrau (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray) in etwa sechs unscharfen Bändern unterschiedlicher Farbintensität

Einschlüsse: makroskopisch nur kleine, verstreute Inhomogenitäten; unter der Lupe eine mittlere Menge an Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb.1 und 2): großflächig auf einer Bruchfläche mehr ockerfarbene (10YR 8/4 bis 7/4 very pale brown), auf den übrigen Bruchflächen mehr orangefarbene (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) Verfärbungen; rostfarbene Verfärbungen und Ausblühungen (7.5YR 5/6 bis 4/6 strong brown) auf allen Bruchseiten; einige dunkelgraue (7.5YR 3/1 very dark gray) Punkte, wohl von Mangan

Glanz: neun kleine Glanzstellen (< 1-5 mm) auf einer der patinierten Seiten, auf erhöhten und nicht erhöhten Stellen, aber nicht in Vertiefungen.

V Fundort Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen

Witt. 1 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, C. Knipper, H. Mollenkopf am 02.08.2003
Fundnr.: nicht bekannt

Größter Durchmesser: 71 mm
Gewicht: 130 g



Abb. 1 Witt. 1: Vier größere Teile mit Cortex.

Grundform: Ursprünglich: natürlicher Trümmer (NSH) einer wohl seeigelförmigen Hornsteinknolle (ND) (stark abgeplattete Kugel) aus Jurahornstein (JC); jetzt: in vier größere Teile mit einem maximalen Durchmesser von 36 bis 51 mm und sieben kleinere Teile von ≤ 5 bis ≤ 22 mm zersägt

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt ca. ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-4 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: im angeschlagenen Bereich weißlich (5Y 8/1) bis beige-braun (10YR 7/3 bis 7/4 very pale brown); wenige braune Flecken ≤ 3 mm (7.5YR 5/4 bis 4/4 brown) und ebenso große dunkelgraue Flecken (10YR 4/1 dark gray); **Fossilien** (FOS): Wurmröhre (Polychaeta) (Abb. 1 Mitte rechts; Abb. 2); im Anschnitt weißlich zum Teil mit braunschwarzen Stellen



Abb. 2 Witt. 1: Fossile Wurmröhre (Polychaeta) auf dem Cortex (Vergrößerung ca. 11x).



Abb. 3 Witt. 1. Knolleninneres.

Sichtbares Knolleninneres und Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt mittelgrau (GR); nicht gebändert (IN), Zentrum heller als der Rand (od); einzelne Farben: im Zentrum helles Mittelgrau (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), am Rand nach außen zunehmend dunkler werdend (GLEY1 6/N bis 5/N gray)

Einschlüsse (Abb. 3): makroskopisch ca. winkelförmig, ≤ 18 mm lang, dunkelbraun (7.5YR 3/1 bis 3/3 very dark gray bis very dark brown); weitere kleinere Inhomogenitäten mittig; unter der Lupe winzige Fossilien und sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: Rand: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1), Kern: mittelkörnig, matt (QU 3); insgesamt QU 3

Patinierung: fast keine.

Witt. 2 – Grauer, fein- bis grobkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, C. Knipper, H. Mollenkopf am 08.04.2003
Fundnr.: nicht bekannt

Größter Durchmesser: 68 mm
Gewicht: 204 g



Abb. 1 Witt. 2: Cortexseite.



Abb. 2 Witt. 2: Bruchfläche mit Einschluss in der Mitte.

Grundform: Trümmer (SH) einer wohl länglichen Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit zwei größeren Bruchflächen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt ca. ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: überwiegend grau-braun (7.5YR 5/2 bis 5/3 braun) mit helleren Stellen (10YR 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray), im Anschnitt weißlich mit braun-grauen Stellen

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt grau-beige (YG); keine Bänderung feststellbar (IN), farbliche Unterschiede zwischen Kern- und Randbereich nicht erkennbar; einzelne Farben: unterschiedlich gefärbte Bereiche: in Abb. 2 oben und rechter Randbereich hellgrau (GLEY1 8/N bis 8/10Y white bis light greenish gray), in der Mitte und links beige (10YR 8/2 bis 7/2 very pale brown bis light gray), am unteren, rechten Rand ≤ 10 mm breites, hellbraunes Band (7.5YR 6/4 light brown) aus gröberem Material, ca. fünf graue Flecken ≤ 7 mm (2.5Y 6/1 bis 5/1 reddish gray); sechs orangerote (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) bis rostbraune (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red) Flecken von 6 bis 13 mm maximalem Durchmesser (wohl Rostspuren vom Pflug)

Sägeschnitt (Abb. 3) insgesamt grau (GR); schlierig marmoriert (SM), Kern dunkler (md); einzelne Farben: Kern hell- bis mittelgrau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray), fleckig, umgeben von marmoriert wirkendem Band in grau bis beige (7.5YR 7/1 light gray); brauner Einschluss (vermutlich

Tiergang) (10YR 6/4 light yellowish brown), grau umrandet in der Farbe kleinerer Flecken (GLEY1 5/N bis 4/N gray bis dark gray)



Abb. 3 Witt. 2: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch, außer dem Tiergang im Sägeschnitt (Abb. 3), in der Mitte einer der Bruchflächen spitz dreieckig, 8 mm lang, rostfarben (5YR 4/6 yellowish red), grobkörnig (Abb. 2); verschiedene Komponenten im Sägeschnitt verstreut, aber stärker mittig; unter der der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: mittig eher feinkörnig, glatt (QU 2), ≤ 10 mm breites Band am unteren Rand von Abb. 2 grobkörnig, rau (QU 4); insgesamt QU 3

Patinierung (PA): sehr wenig, leicht rostfarben.

Witt. 3 – Beige-grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, C. Knipper, H. Mollenkopf am 08.04.2003
Fundnr. : nicht bekannt

Größter Durchmesser: 120 mm
Gewicht: 120 g

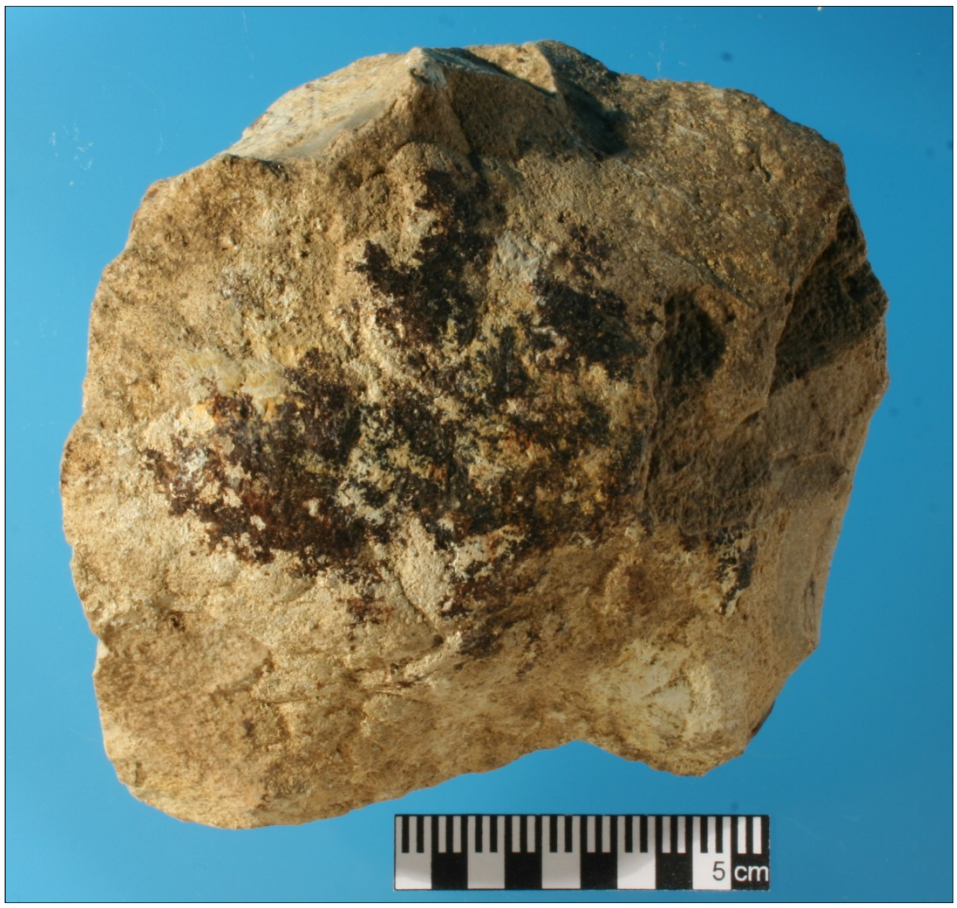


Abb. 1 Witt. 3: Cortexseite.

Grundform: Getesteter Trümmer (TSH) einer größeren Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit vier Bruchflächen; zwei Abschlagsnegative bis 19 mm Länge an der Bruchflächenkante (Abb. 2 Mitte)

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt > ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); 1-28 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige-bräunlich (10YR 7/3, 6/3 und 5/3 very pale brown, pale brown und brown) mit wenigen weißlichen Stellen (2.5Y 8/1 white); größere braun-schwarze Ablagerungen (5YR 3/1 bis 3/2 very dark gray bis dark reddish gray), wohl von Mangan; im Anschnitt hellbeige (10YR 8/1 white) mit wenigen braun-schwarzen Stellen

Sichtbares Knolleninneres: insgesamt heterogen beige-grau erscheinend (YG); keine Bänderung feststellbar, nicht deutlich md/od; einzelne Farben: im Bereich der Bruchkante (Abb. 2 Mitte bis unten), ≤ 9 mm breit, helles grünlich-grau (GLEY1 7/N bis 7/10Y light gray bis light greenish gray), im unteren Teil der mittleren Bruchfläche (Abb. 2 rechts unten) bis zum Cortex grünlich-grau (5Y 7/1 bis 7/2 light gray), Bruchfläche links davon weit überwiegend

beigefarben (10YR 7/3 bis 6/3 very pale brown bis brown), zum oberen Cortex hin grauer (5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray); braune Flecken und Punkte (5YR 3/4 dark reddish brown)



Abb. 2 Witt. 3: Drei der Bruchflächen.



Abb. 3 Witt. 3. Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt beige-grau (YG), etwas weniger beige als die Bruchfläche; schlierig marmoriert (SM); einzelne Farben: gräulich (10YR 7/1 bis 7/2 light gray) mit dunkler grauen Flecken und Schlieren (GLEY1 6/N gray), ockerfarbene Flecken (10YR 7/4 bis 7/6 very pale brown bis yellow), teilweise graue Abgrenzung zum Cortex (GLEY1 6/N gray und 2.5Y 6/1 bis 6.2 gray bis light brownish gray)

Einschlüsse: makroskopisch verschiedene Komponenten, z. B. auf der Bruchseite ein brauner (5YR 3/2 bis 3/3 dark reddish brown) Einschluss, 11 mm lang, mit gröberer Struktur, begleitet von einer vermutlichen Wurmröhre oder ehemaligem Tiergang von 30 mm Länge (Abb. 2 oben links); im Sägeschnitt zwei linsenförmige beige-graue Einschlüsse ≤ 10 mm in feinerem Material (dieselbe Wurmröhre oder Tiergang) und in gröberem Material (Abb. 3 oben); wenige kleine, überwiegend verstreute graue Inhomogenitäten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: mittelkörnig, matt bis leicht körnig, porig (QU 3)

Patinierung (PA)**:** weißlich (2.5Y 8/1 white) im oberen Teil der mittleren Bruchfläche, rötlich beige (7.5YR 7/3 pink) im Bereich der linken und bräunlicher (7.5YR 6/4 light brown) im Bereich der rechten Bruchfläche (Abb. 2).

Witt. 4 – Beigefarbener, grobkörniger, sehr poriger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 002-2

Größter Durchmesser: 111 mm
Gewicht: 459 g

Grundform (Abb. 1)**:** natürlicher Trümmer (NSH) einer gebänderten Hornsteinknolle (ND) mit fünf Bruchflächen aus Jurahornstein (BC)



Abb. 1 Witt. 4: Cortex und eine der Bruchflächen .

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), höckrig wirkend; bedeckt > ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige-grau (10YR 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray) bis grau (5Y 6/1 bis 5/1 gray); graubraune Flecken (10YR 4/2 dark grayish brown), dunkelgraue Punkte (10YR 3/1 very dark gray); einige rostfarbene Strukturen, braune Flecken und Punkte (5YR 5/4 reddish brown), wohl vom Pflug; im Anschnitt beigefarben (10YR 8/2 very pale brown) mit dunkelbraunen Stellen

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1 und 4)**:** insgesamt beigefarben (YB); konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: soweit sichtbar hellbeige (10YR 8/1 bis 8/2 white bis very pale brown), ca. 16 zum Teil sehr schmale Bänder, deren Farbe nicht bestimmt werden kann, umgeben das Zentrum mit Ø < 33 mm

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt beigefarben (YB); konzentrisch gebändert (CB), zu den Rändern hin dunkler (od); einzelne Farben: beinahe einfarbig beige (10YR 8/2 very pale brown) wirkend, aber halbkreisförmig ca. 16 hell beige-grau abgegrenzte, besonders zum Rand hin enge Bänder (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray); entlang des Cortex unregelmäßig breite (< 1–8 mm) breite hell beige-graue Verfärbungen (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray), zum Teil Schlieren vom Cortex und von Bruchflächen ins Innere bildend; viele winzige Poren (< 1 mm); wenige kleine, überwiegend hellgraue Inhomogenitäten; der Sägeschnitt



Abb. 2 Witt. 4: Sägeschnitt.

weist auf die Wanderung (blau-) grauer Ionen vom Cortex und von der sehr frühen Bruchfläche aus nach innen hin

Einschlüsse: makroskopisch weißlicher Einschluss (Abb. 3): **Fossil** (FOS) Austernschale (Lamellibranchiata) (17 mm lang und ≤ 2 mm breit) im Sägeschnitt; außerdem sehr porig von ehemaliger Schwammfacies; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: relativ weich; grobkörnig, Bruchfläche rau (QU 4)



Abb. 3 Witt. 4: Fossile Austernschale (Lamellibranchiata) im Knolleninneren (Vergrößerung ca. 5x).

Patinierung (PA) (Abb. 4)**:** auf fünf Seiten beige- bis ockerfarben (10YR 8/3 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown) und beige bis grau (10YR 6/2 bis 5/2 light brownish gray bis grayish brown); wenig grau-braune Flecken (10YR 5/2 bis 4/2 grayish brown bis dark grayish brown), viele kleine zum Teil sehr dichte schwarze Punkte; einige rostfarbene Strukturen, wohl vom Pflug.



Abb. 4 Witt. 4: Drei der Bruchflächen mit Patinierung.

Witt. 5 – Beige-grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 004-1

Größter Durchmesser: 86 mm
Gewicht: 233 g



Abb. 1 Witt. 5: Bruchseite mit Cortex rechts und links.

Grundform (Abb. 1)**:** Trümmer (SH) einer nicht gebänderten Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC)

Cortex (Abb. 1 und 2)**:** außen rau (FR), stark strukturiert; bedeckt ca. ein Fünftel der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-10 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: Abb. 1 rechte Seite beigefarben (10YR 6/3 bis 5/3 pale brown bis brown), linke Seite grauer (10YR 6/2 bis 5/2 light brownish gray bis grayish brown); viele zum Teil sehr dichte dunkelgraue Punkte (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt (Abb. 2) beigefarben (10YR 8/3 very pale brown)



Abb. 2 Witt. 5: Sägeschnitt.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1)**:** insgesamt beige-grau (YG); fleckig, unklare Musterung (IN), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: hellgraue Bereiche (2.5Y 7/1 light gray), fleckig beigefarbene (10YR 7/2 bis 7/3 light gray bis very pale brown); einige rostfarbene Stellen (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red), wohl vom Pflug

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt beige-grau (YG), heller und grauer als die Bruchflächen; fleckig, schlierig (SM); einzelne Farben: im Zentrum weißlich und fleckig hellgrau

(5Y 8/1 und 7/1 white und light gray), Richtung linkem Cortex (in Abb. 2) ein 7-18 mm breites dunkler graues, fleckiges Band (GLEY1 7/N bis 5/N light gray bis gray), zum Cortex hin unregelmäßig weiß abgegrenzt (GLEY1 8/1 white), zum rechten Cortex hin schmaler und weniger fleckig



Abb. 3 Witt. 5: Bruchseite mit starker Patinierung.

Einschlüsse: makroskopisch stärker am Rand verschiedene Komponenten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: grau: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1), beige: fein- bis mittelkörnig, eher matt (QU 2-3); insgesamt QU 2

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 3): zum Teil grau (10YR 4/1 dark gray) mit dunkelgrau-schwarzen Punkten (10YR 3/1 very dark gray) und rostfarben (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red).

Witt. 6 – Beige-grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper
Fundnr.: 005

Größter Durchmesser: 86 mm
Gewicht: 191 g



Abb. 1 Witt. 6: Kern mit vier sichtbaren Abschlagsnegativen.

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Kern (CO) einer nicht gebänderten Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit fünf Abschlagsnegativen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig mit Rippen; bedeckt ca. ¼ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: grau-beige (10YR 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray); dunkelbraune Flecken (10YR 3/4 dark yellowish brown) und grauschwarze Punkte (10YR 3/1 very dark gray); **Fossilien** (FOS): Schalenfragment von Muschel (Lamellibranchiata) oder Armfüßer (Brachiopoda) (Abb. 2); im Anschnitt weißlich

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1)**:** insgesamt beige-grau (YG); fleckig (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: unter dem Cortex weißlich (5Y 8/1 white), im Übrigen fleckig beigefarben (10YR 8/2 bis 7/2 very pale brown bis light gray) und bläulich-grau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray)



Abb. 2 Witt. 6: Fossile Muschel (Lamellibranchiata) oder Armfüßer (Brachiopoda) im Cortex (Vergrößerung ca. 6,3x).



Abb. 3 Witt. 6: Sägeschnitt.



Abb. 4 Witt 6: Kern mit einem Abschlagsnegativ auf der abgebildeten Seite.

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt beige-grau (YG); fleckig marmoriert (SM); einzelne Farben: fleckig in Grautönen (GLEY1 8/N bis 7/N und 7/N bis 6/N white bis light gray und light gray bis gray) und Beigetönen (10YR 8/2 bis 7/2 very pale brown bis light gray, wenig 10YR 6/2 bis 6/3 light brownish gray bis pale brown), ähnlich der Bruchseite

Einschlüsse (Abb. 3): makroskopisch Flecken von Mikrobenkrusten verstreut; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 4)**:** ockerfarbene (10YR 7/4 very pale brown), rostfarbene (5Y 5/6 olive) und graue Punkte (10YR 5/1 gray)

Glanz: Glanzpunkt auf Abschlagsnegativ ≤ 3 mm, erhöhte, aber nicht höchste Stelle (Abb. 1 rechts oben).

Witt. 7 – Beige-grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 002-1

Größter Durchmesser: 97 mm
Gewicht: 253 g



Abb. 1 Witt. 7: Cortexseite.



Abb. 2 Witt. 7: Patinierte Bruchseite (Knolleninneres) mit Abschlag.

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Getesteter Trümmer (TSH) einer nicht gebänderten Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit zwei Bruchkanten und drei Abschlagsnegativen; Kantenbeschädigungen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig mit einigen rippenartigen Strukturen; bedeckt gut ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-4 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige bis ocker (10YR 7/2, 7/3 bis 7/4 light gray und very pale brown); hellbraune bis braune Flecken (7.5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis strong brown) und grau-schwarze Flecken und Punkte (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt grau-beige

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt beige-grau (YG); fleckig (SM); einzelne Farben: unter dem Cortex teilweise ein weißliches Band von 1-3 mm Breite (10YR 8/1 white), im Übrigen fleckig beigefarben (10YR 8/2 very pale brown) und hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray)

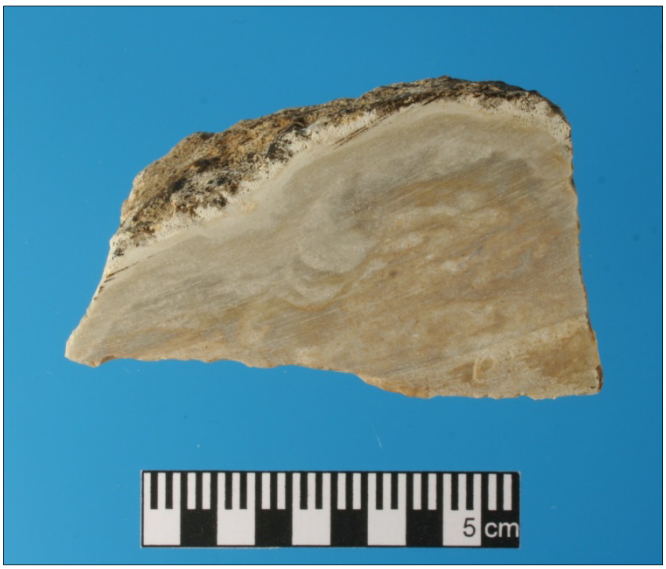


Abb. 3 Witt. 7: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt beige-grau (YG), grauer als die Bruchfläche; wolkig, schlierig marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: unter dem Cortex weißliches Band (5Y 8/1 white) von < 1-4 mm Breite, darunter ein zweites Band von ≤ 5 mm Breite, hellgrau (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray), im übrigen stark marmoriert: weißlich (GLEY 1 8/N white), beige bis braun (7.5YR 7/3 bis 6/3 pink bis light brown) und graublau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray)

Einschlüsse: makroskopisch im Sägeschnitt verstreut, eher mittig, Flecken von Mikrobenkrusten; **Fossilien** (FOS): Schalentrümmer im Sägeschnitt oben rechts (Abb. 3); unter der Lupe und im Dünnschliff sehr viele Schwammnadeln (Abb. 4)

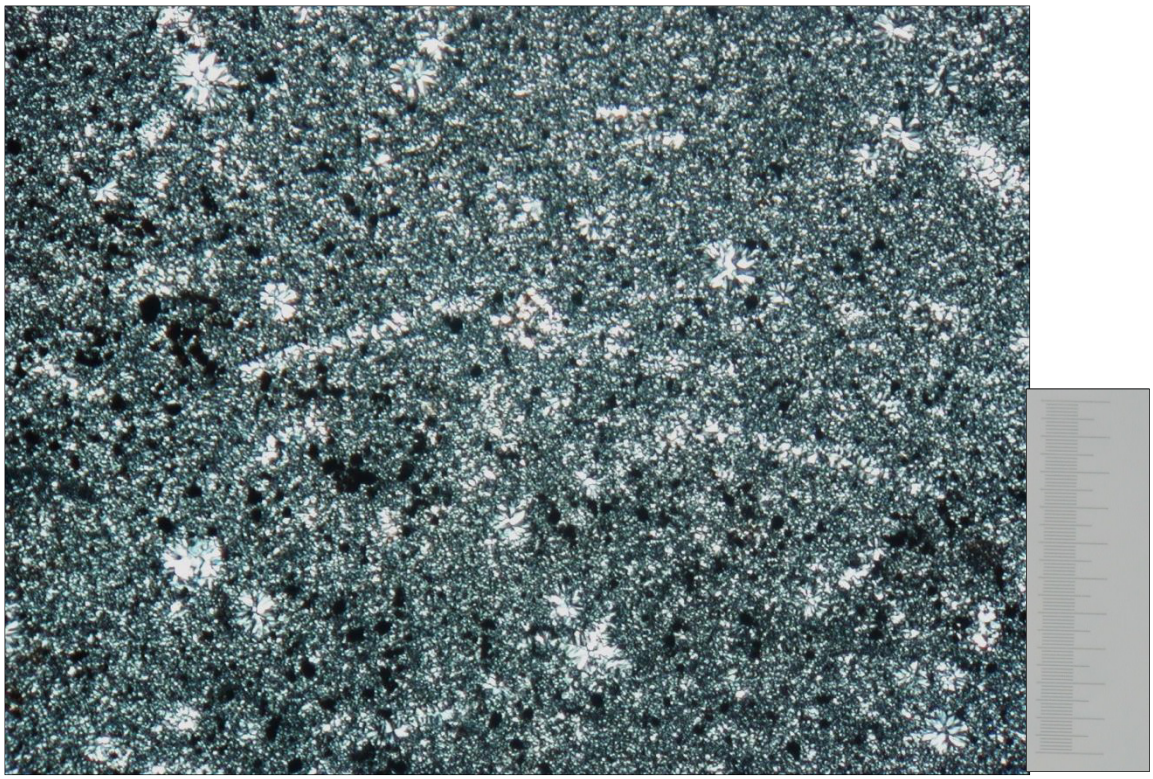


Abb. 4 Witt. 7: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop mit 24 Schwammnadeln (gesamter Maßstab 1 mm).

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 2)**:** auf einer Seite mehr ocker (10YR 8/3 bis 7/3 very pale brown), auf der anderen eher hellorange (10YR 7/6 yellow); rostfarbene (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red), überwiegend strichförmige Strukturen, wohl vom Pflug, und graue Punkte (10YR 5/1 gray), fleckig angeordnet.

Witt. 8 – Grauer, fein- bis grobkörniger, heterogener Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 003-2

Größter Durchmesser: 97 mm
Gewicht: 245 g

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Getesteter Trümmer (TSH) einer nicht gebänderten Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit vier patinierten Bruchflächen und einem Abschlagsnegativ; Kantenbeschädigung



Abb. 1 Witt. 8: Cortexseite.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig mit Rippen; bedeckt knapp ¼ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige (10YR 8/3 bis 7/3 very pale brown); dunkelbraune Flecken (10YR 4/2 dark grayish brown) und grau-schwarze Punkte (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (5Y 8/1 white)



Abb. 2 Witt. 8: Sägeschnitt.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3): soweit erkennbar weißlich (WH) (10YR 8/1 white); wohl nicht gebändert

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt grauer als erwartet (GR); fleckig marmoriert (SM), nicht eindeutig md/od; einzelne Farben: weißlich (5Y 8/1 white) und hellgrau (7.5YR 7/1 light gray) gefleckt

Einschlüsse: makroskopisch aus drei verschiedenen, verstreuten Komponenten, davon vermutlich ein Tiergang (Sägeschnitt) und Mikrobenkrusten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: das hellgraue Material ist feinkörnig, glatt (QU 2), das weißliche grobkörnig, Bruchfläche rau (QU 4); insgesamt heterogen, Qualität zerfällt in zwei Gruppen (QU 5)



Abb. 3 Witt. 8: Knolleninneres, patinierte Bruchfläche vorne.

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 3)**:** auf ca. ⅔ der jeweiligen Bruchfläche gröberes, beigefarbenes Material (10YR 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray) aufgelagert; rostfarbene (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red), überwiegend strichförmige Strukturen, wohl vom Pflug; graue punktförmige Strukturen (10YR 5/1 gray) zu Flecken angeordnet, einige schwarze Punkte (10YR 2/1 black).

Witt. 9 – Beige-grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 009

Größter Durchmesser: 104 mm
Gewicht: 374 g

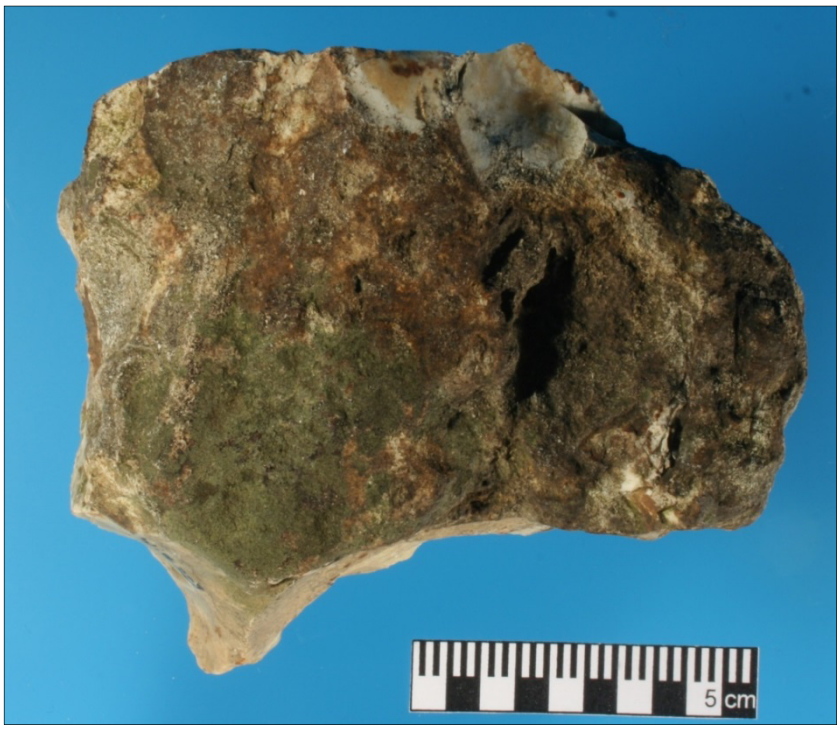


Abb. 1 Witt. 9: Cortexseite.



Abb. 2 Witt. 9: Sägeschnitt.

Grundform (Abb. 1 und 2)**:** Getesteter Trümmer (TSH) einer Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit mindestens vier patinierten Bruchseiten, drei kleineren Abschlagsnegativen; Kantenbeschädigungen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig; bedeckt knapp ½ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-5 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige (10YR 7/3 bis 6/3 very pale brown bis pale brown), grau (10YR 5/1 bis 4/1 gray bis dark gray); zudem fleckig dunkelbraun (7.5YR 3/2 dark brown) und fleckig grün-braun (5Y 4/2 olive gray); im Anschnitt beige (10YR 7/3 very pale brown) mit braunen Stellen (10YR 4/2 bis 3/2 dark grayish bis very dark grayish brown)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 4)**:** soweit erkennbar weißlich bis hellgrau (WH) (7.5YR 8/1 white); fleckig (SM), wohl nicht gebändert

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt beige-grau (YG); fleckig, schlierig marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: unter dem Cortex fast durchgehend weißliches Band (5Y 8/1 white und weißer), < 1-9 mm breit, darunter weißlich bis hellgraues

Band (10YR 8/1 bis 7/1 white bis light gray) teilweise auch weißlich bis bläulich grau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray), < 1-14 mm breit, das aber auch teilweise an den patinierten Bruchflächen entlang zieht; dazwischen inhomogenes Material, mit Mengen zerscherbter Fossilreste durchsetzt, beigefarben (10YR 8/2 bis 7/2 very pale brown bis light gray); der Sägeschnitt bringt den Beweis, dass farbgebende Substanzen aus der Umwelt über den Cortex und alte Bruchflächen ins Hornsteininnere gewandert sind



Abb. 3 Witt. 9: Schnitt durch eine oder mehrere fossile Serporöhren (Polychaeta) im Sägeschnitt (Vergrößerung ca. 6x).



Abb. 4 Witt. 9: Zwei Bruchseiten mit unterschiedlicher Patinierung, rechts cortexartig; unten Kantenbeschädigung.

Einschlüsse: makroskopisch im Sägeschnitt (Abb. 2 Mitte links; Abb. 3) **Fossilien** (FOS): mehrere Schnitte durch eine oder mehrere Serporöhren (Wurmröhren) (Polychaeta); im mehr mittigen Fleckigen mehr Gesteinskomponenten; unter der Lupe im Randbereich sehr viele Schwammnadeln, mehr als im Fleckigen

Qualität des Rohmaterials: der größte Teil des Materials mittelkörnig, matt (QU 3)

Patinierung (Abb. 1 und 3)**:** vor allem auf zwei der Bruchseiten raue, dünne, cortex-ähnliche Patinierung beige (10YR 7/3 bis 6/3 very pale brown bis pale brown), vorwiegend ockerfarben (7.5YR 8/4 bis 7/4 pink) auf zwei weiteren Bruchseiten; graue Punkte (10YR 5/1 gray), die Flecken bilden; wenige grau-schwarze Punkte (10YR 3/1 very dark gray); rostfarbene, linienförmige Strukturen (7.5YR 4/4 brown), wohl vom Pflug

Glanz: drei Glanzpunkte (≤ 5 mm) auf einer Bruchseite auf erhöhten Stellen angeordnet, bilden Ecken eines fast gleichseitigen Dreiecks (Abb. 2 rechts um die Ecke).

Witt. 10 – Beige-grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: nicht bekannt

Größter Durchmesser: 74 mm
Gewicht: 151 g



Abb. 1 Witt.10: Cortexseite mit Abschlag.

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Getesteter Trümmer (SH) einer nicht gebänderten Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit einer Bruchseite und einem Abschlagsnegativ

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig mit Rippen; bedeckt gut ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-6 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: grau-beige (10YR 7/2, 7/4 bis 6/4 light gray, very pale brown bis light yellowish brown); mittelbraune Flecken (5YR 5/6 bis 4/6 yellowish red) und grau-schwarze Flecken (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (5Y 8/1 white)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1)**:** insgesamt blau-grau (GR); Bänderung unklar; einzelne Farben: bläuliches Grau (GLEY1 7/N bis 7/10Y light gray bis light greenish gray), unter dem Cortex weißliches Band (5Y 8/1 white)



Abb. 2 Witt. 10: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt beige-grau (GR), grauer als erwartet; schlierig, fleckig (SM), nicht eindeutig md/od; einzelne Farben: unter dem Cortex beigefarbenes Band (10YR 8/2 very pale brown), ≤ 9 mm breit, Zentrum bläulich-grau (GLEY1 7/N light gray) mit hellbraunen Flecken (7.5YR 6/4 light brown)

Einschlüsse: makroskopisch auf der Bruchseite etwa linsenförmig, ≤ 8 mm, mittelbraun (7.5 YR 5/4 brown) (Abb. 3 Mitte links); im Sägeschnitt verstreut verschiedene Komponenten und Inhomogenitäten; **Fossilien** (FOS): evtl. mehrere Schnitte durch eine Serporöhre (Polychaeta) im Sägeschnitt (Abb. 2); unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: grauer Bereich mittelkörnig matt bis leicht körnig (QU 3), kleinerer beigefarbener Bereich grobkörnig, Bruchfläche rau (QU 4); insgesamt QU 3

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 3)**:** ockerfarben (10YR 6/4 light yellowish brown) bis grau (10YR 6/1 bis 5/1 gray); einige grau-schwarze Punkte (10YR 3/1 very dark gray); dunkelrostfarbene (5YR 4/4 reddish brown), linienförmige Strukturen, wohl vom Pflug.



Abb. 3 Witt. 10: Patinierte Bruchseite (Knolleninneres).

Witt. 11 – Beige-grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 006

Größter Durchmesser: 86 mm
Gewicht: 282 g

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Kern (CO) einer Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (BC) mit mindestens vier Abschlagnegativen, einer Bruchfläche und einer bearbeiteten Kante, evtl. ein Grobgerät



Abb. 1 Witt. 11: Bearbeitete Kante und Cortex.

Cortex (Abb. 1)**:** rau (FR), plastisch hügelig mit Rippen; bedeckt gut $^{4}/_{5}$ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-7 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige (10YR 7/3 bis 6/3 very pale brown bis light brownish gray), größere graue Stellen (10YR 7/1 light gray); braune (7.5YR 4/4 brown), dunkelbraune bis schwarze Flecken (10YR 3/1 bis 3/2 very dark gray bis very dark grayish brown); rostrote Flecken (5YR 6/6 bis 4/6 yellowish red) mehr linear angeordnet, wohl vom Pflug; im Anschnitt beigefarben (10YR 8/2 bis 8/3 very pale brown) mit braunen bis dunkelbraunen Stellen (7.5YR 4/3 bis 3/3 brown bis dark brown); **Fossilien** (FOS)**:** Muschel



Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1 und 3)**:** insgesamt beige-grau (YG); keine Bänderung, marmoriert (SM)**;** einzelne Farben: unter dem Cortex weißliches Band (5Y 8/1 white), im Inneren weißlich (10YR 8/1 white), ocker (10YR 6/4 bis 6/6 light yellowish brown bis brownish yellow) und hellgrau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray) marmoriert

Abb. 2 Witt. 11: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt beige-grau (YG) und grau (GR); schlierig, fleckig marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: beige-bräunlich und grau (7.5YR 7/1 light gray, 7/2 bis 6/2 pinkish gray und 7/3 pink) und bläulich grau (GLEY1 8/1 white, 7/1 light gray und 6/1 gray) marmorierter Stein, unterhalb des Cortex und im Bereich einer Bruchkante weißlich (7.5YR 8/1 white); deutliche Abgrenzung der verschiedenen Farbbereiche



Abb. 3 Witt. 11: Sichtbares Knolleninneres mit Abschlagsnegativen.

Einschlüsse: makroskopisch verstreut verschiedene Komponenten und Inhomogenitäten, Pore und kleinere Spalten mit Kristallen (Abb. 3 Mitte); **Fossilien** (FOS): im Sägeschnitt Serporöhre (Polychaeta) (Abb. 2 rechts oben); unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)

Patinierung (PA) (Abb. 3)**:** wenig ockerfarben (10YR 7/4 very pale brown); dunkelrostfarbene (5YR 4/4 reddish brown), linienförmige Strukturen, wohl vom Pflug.

Witt. 12 – Beige-grauer, sehr heterogener Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 004-2

Größter Durchmesser: 93 mm
Gewicht: 305 g



Abb. 1 Witt.12: Cortex und Knolleninneres.

Grundform (Abb. 1)**:** Getestete (TSH) Knolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit vier patinierten Bruchflächen und einem eindeutigen Abschlagsnegativ

Cortex (Abb. 1)**:** rau (FR), teils plastisch hügelig mit Rippen und Vertiefungen, teils deutlich abgearbeitet; bedeckt knapp ¼ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-3 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: gräulich-beige (10YR 7/3 bis 6/3 very pale brown bis pale brown und 10YR 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray) und weißlich (10YR 8/1 white); mittelbraune (7.5YR 7/3 pink) und grau-schwarze Flecken (10YR 4/1 bis 3/1 dark gray bis very dark gray); im Anschnitt beige (7.5YR 7/3 bis 6/3 pink bis light brown) mit ockerfarbenen bis braunen Stellen (7.5YR 6/4 bis 4/4 light brown bis brown)



Abb. 2 Witt. 12: Knolleninneres mit Patinierung.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1 und 2)**:** insgesamt weißlich (WH); keine Bänderung sichtbar, aber fleckig (SM); einzelne Farben: hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray), unter dem Cortex weißliches Band (5Y 8/1 white), ferner hellocker (10YR 7/4 very pale brown) in größeren Flecken

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt teils beige-grau (YG), teils grau (GR), grauer als erwartet; Musterung unklar (IN), sicher teilweise gebändert und marmoriert, Richtung Cortex dunkler (od); einzelne Farben: unter dem Cortex grau (7.5YR 7/1 light

gray mit wenig 6/1 gray) und beigefarben (7.5YR 7/3 bis 7/4 pink) marmoriert, wohl Richtung Zentrum weißlich (7.5YR 8/1 white)



Abb. 3 Witt. 12: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch auf einer Bruchseite dunkel gerandete Pore (≤ 2 mm); im Sägeschnitt verstreut verschiedene Komponenten und Inhomogenitäten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln im graubeigefarbenen Bereich, im hellen kaum

Qualität des Rohmaterials: sehr heterogen: grauer Bereich mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3), weißlicher Bereich grobkörnig, Bruchfläche rau (QU 4); insgesamt QU 5

Patinierung (Abb. 1 und 2)**:** grau (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray) und hellocker (10YR 8/4 very pale brown); einige grauschwarze Punkte (10YR 3/1 very dark gray); dunkelrostfarbene (5YR 4/6 yellowish red), mehr linienförmige Strukturen, wohl vom Pflug und deren hellere Auswaschungen (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow)

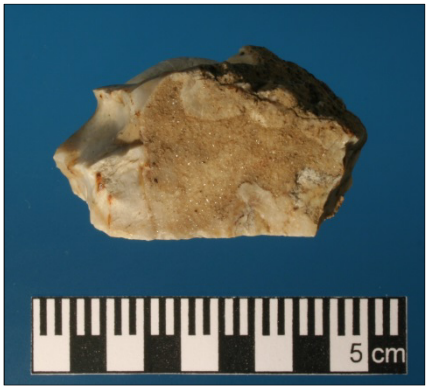


Abb. 4 Witt. 12: Kristalliner Glanz.

Glanz (Abb. 4)**:** auf einer Abschlagseite ockerfarbene stark glänzende Kristalle (10YR 7/4 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown) (Abb. 4); auf einer anderen Abschlagseite Glanzstreifen von < 4 mm an erhöhter Stelle.

Witt. 13 – Beige-grauer, feinkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, S. K. Harris, C. Knipper am 02.08.2009
Fundnr.: 009

Größter Durchmesser: 86 mm
Gewicht: 412 g



Abb. 1 Witt. 13: Getestete Knolle mit zwei sichtbaren Abschlagsnegativen und Cortex.

Grundform (Abb. 1)**:** Getestete Knolle (TSH) aus Hornstein unbekannter Form (ND) aus Jurahornstein (BC) mit drei Bruchflächen und drei Abschlagsnegativen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig; bedeckt knapp ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-3 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) über beige-grau (10YR 7/3 bis 6/3 very pale brown bis pale brown) bis dunkelgrau (10YR 4/2 dark grayish brown); mittelbraune Flecken (5YR 5/4 reddish brown), wohl vom Pflug; im Anschnitt ocker (7.5YR 8/4 bis 7/4 pink) mit dunkelgrauen Flecken (7.5YR 3/1 very dark gray)



Sichtbares Knolleninneres (Abb. 1 und 4)**:** insgesamt hellbraun (YB); unbestimmbare Musterung (IN); einzelne Farben: hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) und hellocker (7.5YR 7/3 pink)

Abb. 2 Witt. 13: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 2): insgesamt beige-grau (YG); stark marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: unter dem Cortex weißliches Band (7.5YR 8/1 white), unscharf abgegrenzt, < 6 mm breit, sonst beige-braun (7.5YR 6/3 bis 5/3 light brown bis brown), ocker (10YR 7/4 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown) und bläulich-grau (GLEY1 7/N light gray) marmoriert; Pore < 5 mm (Abb. 2 Mitte links; Abb. 3)



Abb. 3 Witt. 13: Armfüßer im Sägeschnitt.

Einschlüsse: kleinere Inhomogenitäten (≤ 2 mm) auf den Bruchflächen und eine hellbraune Struktur (5YR 6/3 light reddish brown) von 6 mm Länge (Abb. 1); **Fossilien** (FOS): im Sägeschnitt Armfüßer (Brachyopode) (Abb. 2 Mitte links; Abb. 3); im Sägeschnitt verstreut verschiedene Komponenten und Inhomogenitäten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)



Abb. 4 Witt. 13: Patinierung einer der drei Bruchflächen.

Patinierung (PA)**:** eine Bruchfläche fast flächig gelblich (10 YR 7/6 yellow) bis ocker (10YR 6/4 light yellowish brown und 10YR 5/4 bis 5/6 yellowish brown), eine weitere Bruchfläche in drei Streifen geteilt (Abb. 4): orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow), nur unwesentlich gelblich (2.5Y 8/2 pale yellow) und rötlich ockerfarben (7.5YR 7/3 bis 7/4 pink), die dritte Bruchfläche flächig hell ocker (10YR 7/4 very pale brown) und grau (10YR 5/1 bis 4/1 gray bis dark gray) patiniert; auch auf den anderen Bruchflächen finden sich teilweise größere dunkelgrau patinierte Bereiche (10YR 5/1, 4/1 und 3/1 gray, dark gray und very dark gray); rostfarbene (5YR 6/8 und 4/6 reddish yellow und yellowish red), linienförmige Strukturen, wohl vom Pflug.

Witt. 14 – Beige-grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, C. Knipper, H. Mollenkopf am 08.04.2003
Fundnr.: nicht bekannt

Größter Durchmesser: 73 mm
Gewicht: 180 g



Abb. 1 Witt. 14: Cortex und Bruchfläche mit Frostsprüngen.

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer Hornsteinknolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit fünf Bruchflächen und mindestens fünf Frostabsprüngen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig; bedeckt gut ¼ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-2 mm dick; insgesamt beige bis braun (B); einzelne Farben: beige (10YR 7/4 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown), an abgearbeiteten Stellen weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); braune Flecken (7.5YR 4/3 bis 3/3 und 3/2 brown bis dark brown), mindestens teilweise vom Pflug, wenige dunkelgraue Punkte und Flecken (7.5YR 4 /1 dark gray); im Anschnitt weißlich (5Y 8/1 white)

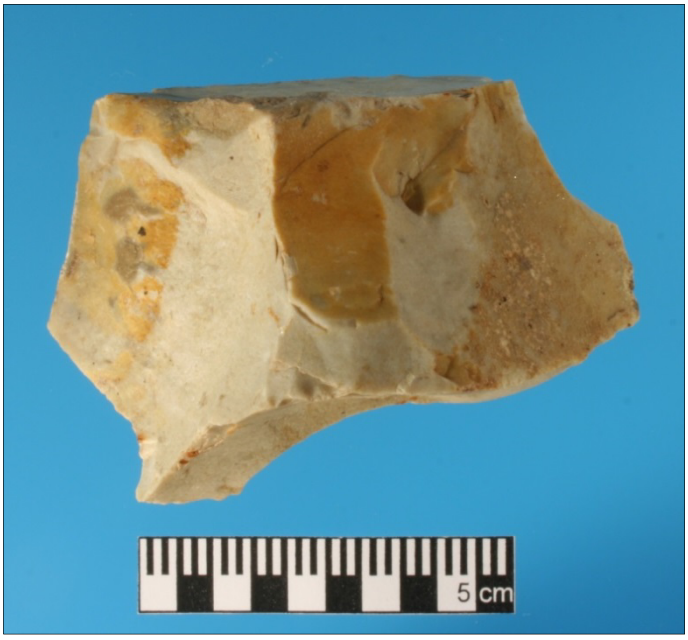


Abb. 2 Witt. 14: Knolleninneres und Patinierung.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich (WH); Musterung unklar; einzelne Farben: hellgrau (5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray) mit wenig dunkleren Linien auf der Bruchfläche (10YR 7/1 light gray) abgegrenzt

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt beigegrau (YG), grauer als erwartet; schlierig (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: fleckig hellgrau (10YR 7/1 light gray) bis beigefarben (10YR 7/4 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown), hellgraue Bänderung unter dem Cortex kaum abgegrenzt, weißlicher Fleck (7.5YR 8/1 white) aus gröberem Material



Abb. 3 Witt. 14: Sägeschnitt.

Einschlüsse (Abb. 2)**:** makroskopisch mehrere Einschlüsse auf Bruchflächen: eine krallenförmig, < 24 mm lang, aus gröberem Material, beige-braun (10YR 6/3 pale brown), zwei weitere undefinierter Form, < 8 mm und < 10 mm aus feinerem Material, braun (7.5 YR 5/2 bis 5/3 brown), evtl. verfüllte Reste von ehemaligen Tiergängen; im Sägeschnitt verstreut verschiedene Komponenten, u. a. weißliche (Abb. 3) und Inhomogenitäten; unter der Lupe sehr viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 2)**:** auf zwei Bruchflächen eher in Form eines breiten Bandes, auf der dritten als schmalerer abgewinkelter Streifen, orange (7.5YR 7/6 bis 7/8 reddish yellow), außerdem eine bräunliche Fläche (10YR 6/3 pale brown); einige rostfarbene Flecken (5YR 6/8 light red), wenige dunkel graubraune (10YR 4/2 dark grayish brown) und schwarze Punkte (10YR 2/1 black).

Witt. 15 – Beige-grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundort: Wittlingen „Stuttgarter Teil“, Stadt Bad Urach, Kreis Reutlingen
Lesefund: L. Fisher, C. Knipper, H. Mollenkopf am 08.04.2003
Fundnr.: nicht bekannt

Größter Durchmesser: 78 mm
Gewicht: 164 g

Grundform (Abb. 1 und 3)**:** Natürlicher Trümmer (NSH) einer flachen Hornsteinknolle (ND) aus Jurahornstein (JC) mit einer Bruchfläche und Kantenbeschädigungen



Abb. 1 Witt. 15: Cortex und Kantenbeschädigungen.

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR), plastisch hügelig; bedeckt gut ⅔ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1-5 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: beige (10YR 6/4 light yellowish brown) und gräulich (2.5Y 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), an abgearbeiteten Stellen hellbeige (10YR 8/1 bis 8/2 white bis very pale brown); verstreut viele rostfarbene Flecken (überwiegend 5YR 5/6 yellowish red), wohl vom Pflug; dunkelgraue Punkte (10YR 3/1 very dark gray); im Anschnitt weißlich (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar)



Abb. 2 Witt. 15: Knolleninneres mit Patina.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); Bänderung unklar; einzelne Farben: hellblau-grau (GLEY1 8/N bis 7/N white bis light gray)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt beige-grau (YG), grauer als erwartet; marmoriert (SM), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: grau (10YR 7/1 light gray), beigefarben (10YR 7/4 bis 6/4 very pale brown bis light yellowish brown) und bläulich-grau marmoriert mit einem größeren (< 18 mm) bläulichgrauen Kern (GLEY1 7/N light gray), unter dem Cortex ein bis zwei hellgraue Bänder (10YR 7/1 light gray), ≤ 9 mm breit, verschwommen dunkler abgegrenzt



Abb. 3 Witt. 15: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch auf der Bruchfläche etwa kreisförmig, ≤ 3 mm, gräulich (10YR 6/1 bis 5/1 gray) (Abb. 2 links) und weitere kleinere Inhomogenitäten; im Sägeschnitt ein peloidales Gefüge (Abb. 3 Mitte unten), verstreut verschiedene Komponenten und Inhomogenitäten; **Fossilien** (FOS): im Sägeschnitt Brachyopode; unter der Lupe viele Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: relativ hart**;** mittelkörnig, matt bis leicht körnig (QU 3)

Patinierung (PA) (Abb. 1 und 2)**:** ockerfarben (10YR 6/3 bis 6/4 pale brown bis light yellowish brown) mit hell orangefarbenen Stellen (7.5 YR 7/6 reddish yellow); rostfarbene Flecken (5YR 6/6 bis 5/6 reddish yellow bis yellowish red), dunkelrostfarbene (5YR 4/4 reddish brown), linienförmige Strukturen, wohl vom Pflug.

VI Fundstelle Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis

Grund 1 – Grauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Oberflächenfund
Fundnr.: 2026

Größter Durchmesser: 73 mm
Gewicht: 125 g



Abb. 1 Grund 1: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1 und 2)**:** Kernfragment (CO) einer Hornsteinknolle (ND) unbekannter Form aus Jurahornstein (JC) mit drei Bruchflächen; auf der Cortexseite sieben Abschlagsnegative oder Reste davon mit bis zu 49 mm Länge (intentional)

Cortex (Abb. 1 und 2 links): außen rau (FR); bedeckt etwa $^{1}/_{5}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: rötlich-gelb (7.5YR 7/4 bis 7/6 pink bis reddish yellow); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); graue bis braun-schwarze Pünktchen und Flecken, wohl von Mangan



Abb. 2 Grund 1: Ansicht mit Abschlägen.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 3): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: hellgrau (2.5Y 7/1 light gray); etwa linsenförmiger, hell beigefarbener Einschluss (Abb. 3 unten links) durch bis zu drei sehr schmale Bänder (≤ 1 mm) abgegrenzt, Einschluss hellbeige (10YR 8/2 very pale brown), abgrenzende Bänder jeweils etwas heller, dunkler und wieder heller; Einschluss mit teilweise gröberer Struktur

Sägeschnitt (Abb. 4): insgesamt mittelgrau (GR); porig; Musterung unklar (IN), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: mittelgrau (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), umgeben von hellgrauem Band (7.5YR 7/1 light gray), Rand weißlich (7.5YR 8/1 white)



Abb. 3 Grund 1: Knolleninneres mit Einschluss links unten.

Einschlüsse: makroskopisch kleinere Inhomogenitäten (< 1 mm)

Qualität des Rohmaterials: in geringerem Umfang und eher außen feinkörnig, glatt (QU 2), weit überwiegend mittel- bis grobkörnig, matt und rau, porig (QU 3-4); insgesamt QU 3

Patinierung (PA) (Abb. 2 und 3): an alten Bruchflächen beige (10YR 8/4 bis 7/4 very pale brown); sehr viele, meist sehr kleine dunkelbraun-graue Punkte, vermutlich Mangan; mehrere rostfarbene strichförmige Strukturen, wohl vom Pflug (5YR 6/6 bis 4/6 reddish yellow bis yellowish red).

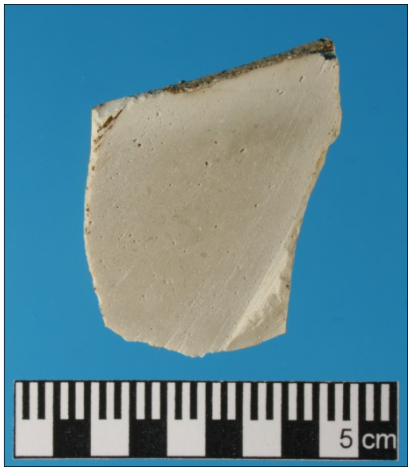


Abb. 4 Grund 1: Sägeschnitt.

Grund 2 – Hellgrauer, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Oberflächenfund
Fundnr.: 2104

Größter Durchmesser: 81 mm
Gewicht: 168 g



Abb. 1 Grund 2: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1 und 4)**:** etwa quaderförmige getestete Knolle (TSH) aus Jurahornstein (JC) mit sechs Bruchflächen; mit wohl ursprünglich drei Abschlagsnegativen, bis 16 mm Länge, an einer Schmalseite (intentional)

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt etwa 1 % der Oberfläche (1, < 50 %); < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: rötlich-gelb (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); braun-graue Pünktchen, wohl von Mangan; ein fast runder mittelgrauer Fleck (10YR 6/2 light brownish gray) von ca. 2 mm Durchmesser



Abb. 2 Grund 2: Knolleninneres.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), Mitte dunkler (md); einzelne Farben: Rest des wohl etwa linsenförmigen, hellgrauen Zentrums (10YR 7/2 light gray) von Resten dreier Bänder umgeben, davon das innerste bis 29 mm breit und weißlich (10YR 8/1 white), das folgende Band hellgrau (7.5YR 7/1 light gray) ≤ 8 mm breit, das äußerste Band wieder weißlich (7.5YR 8/1 white) und bis 14 mm breit; Randbereiche der Bänder mit feinerer Struktur

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); konzentrisch gebändert (CB), zur Mitte hin dunkler (md); einzelne Farben: Mitte hellgrau (10YR 7/1 light gray) ebenso wie das

Richtung Cortex liegende 8-9 mm breite Band, weitere Bänder und Rand weißlich (7.5Y 8/1 white) und heller



Abb. 3 Grund 2: Sägeschnitt.

Einschlüsse (Abb. 3)**:** makroskopisch kleinere Inhomogenitäten und Poren (< 3 mm)

Qualität des Rohmaterials: teilweise feinkörnig, matt (QU 2), überwiegend porig**,** mittelkörnig, matt (QU 3-4), insgesamt QU 3

Patinierung (PA) (Abb. 2 und 4): orange (7.5YR 6/8 reddish yellow) und braun (7.5YR 5/4 brown) an alten Bruchflächen (in Abb. 2 rechts und links oben, rechts unten); sehr viele, überwiegend sehr kleine dunkelbraun-graue Punkte, vermutlich Mangan; mehrere rostfarbene strichförmige Strukturen, wohl vom Pflug (5YR 5/4 bis 5/6 reddish brown bis yellowish red).



Abb. 4 Grund 2: Ansicht mit Abschlägen.

Grund 3 – Beige-grauer, sehr feinkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Oberflächenfund
Fundnr.: 3735

Größter Durchmesser: 60 mm
Gewicht: 137 g



Abb. 1 Grund 3: Cortexseite mit Kantenbearbeitung.

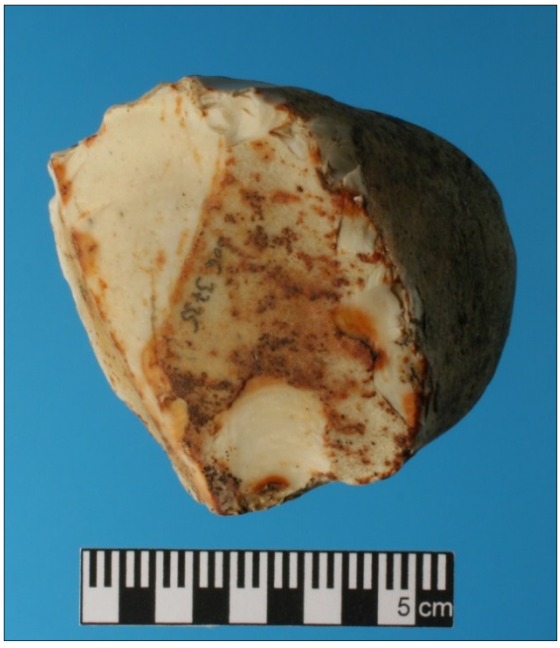


Abb. 2 Grund 3: Bruchflächen und Knolleninneres mit einem Abschlag (wohl nicht intentional).

Grundform (Abb. 1 und 2)**:** Handlicher Trümmer (SH) mit zwei Bruchflächen einer Knolle (ND) aus Jurahornsteins (JC) mit Kantenbearbeitung (intentional), evtl. Grobgerät

Cortex (Abb. 1): außen rau (FR); bedeckt etwa $^{2}/_{3}$ der Oberfläche (2, ≥ 50 %); < 1 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: fleckig beige- bis orangefarben (7.5YR 7/4 bis 7/6 pink bis reddish yellow), mittelgrau (7.5YR 6/1 bis 5/1 gray) und dunkelgrau (7.5YR 4/1 bis 3/1 dark gray bis very dark gray); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); dunkelgraue Punkte (10YR 3/1 very dark gray), wohl von Mangan; rostfarbene punktierte Linien und Flecken (5YR 4/6 yellowish red und 5YR 6/8 reddish yellow), wohl vom Pflug

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); Bänderung unklar (IN), innen dunkler (md), keine klare Abgrenzung; einzelne Farben: weißlich (10YR 8/1 white) und grau (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt grau-beige (YG); am Rand konzentrisch gebändert (CB), Richtung Zentrum dunkler (md); einzelne Farben: fleckiges grau-beiges Zentrum (10YR 7/2 bis 7/3 light gray bis very pale brown), Richtung Cortex etwas grauer (10YR 7/1 light gray), mit einem schmalen, ca. 1 mm breiten, weißlichen (10YR 8/1 white) und einem grau-beigefarbenen (10YR 7/2 bis 7/3 light gray bis very pale brown), ≤ 4 mm breiten Band gegenüber dem < 1 mm breiten, weißlichen Randstreifen (10YR 8/1 white) unter dem Cortex abgegrenzt

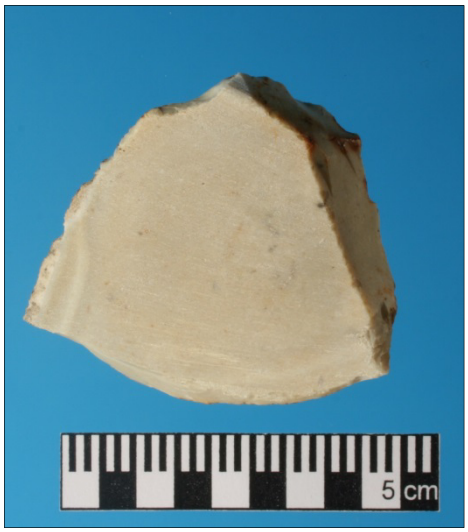


Abb. 3 Grund 3: Sägeschnitt.

Einschlüsse (Abb. 3)**:** hellerer Einschluss < 1 mm breit, 5 mm lang mit Knick, evtl. Fossilrest; kleine Flecken ≤ 1 mm Durchmesser in verschiedenen Grautönen (10YR 6/1 bis 4/1 gray bis dark gray)

Qualität des Rohmaterials: besonders am Rand sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA) (Abb. 2 und 3): beige bis orange (7.5YR 7/6 bis 6/6 reddish yellow) und rötlich-braun (5YR 6/6 reddish yellow) an alten Bruchflächen; sehr kleine dunkelgrau-schwarze Punkte, überwiegend in drei Gruppen von ≤ 5 mm Durchmesser, vermutlich Mangan; sehr viele rostfarbene, Strukturen, zumindest teilweise wohl vom Pflug (5YR 6/6 reddish yellow und 3/4 bis 4/4 reddish brown).

Grund 4 – Weißlicher, mittelkörniger Jurahornstein

Fundstelle: Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Oberflächenfund
Fundnr.: 2458

Größter Durchmesser: 68 mm
Gewicht: 158 g



Abb. 1 Grund 4: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** Kern (CO) unregelmäßiger Form aus Jurahornstein (JC) mit sechs Bruchflächen; mit fünf Abschlagsnegativen, bis 29 mm Länge an verschiedenen Seiten (intentional)

Cortex: fehlt (AB)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); Bänderung unklar (IN), vermutlich grau mit weißlichem Rand, also innen dunkler (md); einzelne Farben: Farbe weißlich (10YR 8/1 white) und hellgrau (10YR 7/1 bis 7/2 light gray), Abgrenzung mit 1-2 mm breitem grauem Band (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray)



Abb. 2 Grund 4: Knolleninneres mit Abschlagsnegativen.



Abb. 3 Grund 4: Sägeschnitt.

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt weißlich (WH); durchgehend weißlich (10YR 8/1 white), vermutlich Richtung fehlendem Cortex deutlich abgegrenzt noch etwas heller mit einem grauen Fleck (≤ 5 mm); einzelne Farben: (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray)

Einschlüsse (Abb. 3): makroskopisch kleinere Inhomogenitäten (< 2 mm)

Qualität des Rohmaterials: teils feinkörnig, matt (QU 2), teils etwas porig, mittelkörnig matt (QU 3), insgesamt QU 3

Patinierung (PA) (Abb. 2 und 3): hellbeige (10YR 8/3 bis 7/3 very pale brown); viele, überwiegend sehr kleine dunkelbraun-graue Punkte, vermutlich Mangan; viele etwas größere dunkelbraun bis olive (2.5Y 3/3 bis 2/3 dark olive brown bis very dark grayish brown) von anderer Struktur, vermutlich Flechten; zwei rostfarbene Strukturen, wohl von Pflug und Nagel oder Eisenspan (5YR 5/8 yellowish red).

Grund 5 – Grauer, sehr heterogener Jurahornstein

Fundstelle: Sonderbuch „Grund“, Stadt Blaubeuren, Alb-Donau-Kreis
Oberflächenfund
Fundnr.: 3970

Größter Durchmesser: 75 mm
Gewicht: 124 g



Abb. 1 Grund 5: Cortexseite.

Grundform (Abb. 1)**:** getestete Knolle (TSH) aus Jurahornstein (JC) mit vier Bruchflächen; mit drei Abschlagsnegativen bis 45 mm Länge in Cortexnähe (intentional)

Cortex (Abb. 1 und 2): außen rau (FR); bedeckt etwa $^{1}/_{4}$ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-8 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: leicht rötliches beige (7.5YR 8/4 bis 7/4 pink), an abgenutzten Stellen weißliches beige (10YR 8/2 very pale brown); im Anschnitt weiß (mit Munsell Color Charts nicht bestimmbar); dunkelgrau-braune Flecken (10YR 3/2 very dark grayish brown) verschiedener Größe, wohl von Mangan; teilweise wohl auch Flechten; ca. 20 rostfarbene punktierte Striche (5YR 6/8 reddish yellow, 5YR 4/6 yellowish red, 5YR 3/4 dark reddish brown), wohl vom Pflug



Abb. 2 Grund 5: Ansicht mit Abschlägen.

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2): insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); zumindest am Rand sehr fein konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: unklarer Farbwechsel, keine klare Abgrenzung zur hellgrauen Mitte (10YR 7/1 light gray), 3 bis 5 nicht überall durchgehende Bänder von innen nach außen: ca. 4-6 mm breit weißlich (10YR 8/1 white), < 1 mm grau (10YR 6/1 bis 5/1 gray), darüber ≤ 4 mm hellgrau (10YR 7/1 light gray), teilweise dunkler abgegrenzt, dann folgen ein weißliches und hellgraues Band in den oben genannten Farben

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittelgrau (GR); konzentrisch gebändert (CB), außen dunkler (od); einzelne Farben: Mitte mittelgrau (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray), zum Cortex hin etwas dunkler abgegrenzt (7.5YR 6/1 gray), darauf folgt ein hellgraues Band (7.5YR 7/1 light gray) aus grobem porigem Material, wohl mit reichlich zerscherbten Fossilien oder deren Negativen (wohl auf einen Wurm- oder Krebsgang zurückzuführen), dann



Abb. 3 Grund 5: Sägeschnitt mit grobkörnigem Band.



Abb. 4 Grund 5: Knolleninneres.

kommt ein dichteres weißliches Band (5Y 8/1 white) zum Cortex hin, darauf folgen drei unterschiedlich breite Bänder in Grautönen und weißlich (7.5YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray und 7.5YR 8/1 white), jeweils wenig dunkler abgegrenzt, das innerste breiteste Band (≤ 8 mm) mit weiteren hellgrauen Einschlüssen in der Form einer halben Linse

Einschlüsse (Abb. 3)**:** makroskopisch viele kleinere Inhomogenitäten (< 3 mm)

Qualität des Rohmaterials (Abb. 3)**:** im Randbereich sehr feinkörnig, glänzend (QU 1), in der Mitte feinkörnig, glatt (QU 2), das breite Band dazwischen grobkörnig, Bruchfläche rau (QU 4); insgesamt heterogen (QU 5)

Patinierung (PA) (Abb. 1, 2 und 4): wenig, beige (10YR 8/2 very pale brown) an alten Bruchflächen; einige, überwiegend sehr kleine dunkelbraun-graue Punkte, vermutlich Mangan; ca. 22 rostfarbene, angenähert strichförmige Strukturen (5YR 6/8 reddish yellow bis 4/6 yellowish red), wohl vom Pflug.

VII Fundorte in Ungarn

Hung. 1 – Ockerfarbenes bis braunes, sehr feinkörniges Chert aus der Trias

Fundort: Balatongyövök
Lithotheca des Hungarian National Museum

Größter Durchmesser: 62 mm
Gewicht: 121 g



Abb. 1 Hung. 1: Cortex.



Abb. 2 Hung. 1: Knolleninneres.

Grundform: Natürlicher Trümmer (NSH) einer Chertknolle (ND) aus der Trias mit mehreren Bruchflächen

Cortex (Abb. 1)**:** außen rau (FR); bedeckt knapp ½ der Oberfläche (1, < 50 %); ≤ 1-2 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker-orange (Y); einzelne Farben: außen fleckig blassgelb (2.5Y 8/3 pale yellow), orange (7.5YR 7/8 bis 6/8 reddish yellow) und ocker (10YR 7/4 bis 7/6 very pale brown bis yellow), hellbraun (10YR 6/4 bis 5/4 light yellowish brown bis yellowish brown) bis braun (10YR 5/3 brown); ferner gräuliche (2.5Y 6/2 light brownish gray) rauere Strukturen vor allem auf einer Seite; schwarze (2.5Y 2.5/1 black) Punkte, wohl von Mangan; Sägekante weißlich (10YR 8/1 white)

Sichtbares Knolleninneres (Abb. 2, rechts unten): insgesamt beige-grau (YG), wegen starker Patinierung nur unklar erkennbar; teilweise konzentrisch gebändert (CB); einzelne Farben: gräulich (2.5Y 6/1 bis 6/2 light gray bis light brownish gray), weitere Farben nicht sicher erkennbar

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt ocker bis braun (YB); konzentrisch gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: außen bräunlich-grau (5YR 6/1 bis 6/2 gray bis pinkish gray) (Abb. 3 unten), zur Knollenmitte hin stärker beigefarben (7.5YR 7/2 bis 7/3 pinkish gray bis pink) (Abb. 3 oben)



Abb. 3 Hung. 1: Sägeschnitt.

Einschlüsse: makroskopisch im Sägeschnitt Inhomogenitäten (1-4 mm), zum Teil als Schalenreste größere Einheiten bildend (> 9 mm) (Abb. 3 Mitte unten); unter der Lupe zwei kleine angesägte Drusen (< 1 mm) mit durchscheinenden Kristallen; keine Schwammnadeln im Dünnschliff (Abb. 4)

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glänzend (QU 1)

Patinierung (PA) (Abb. 2): ockerfarben bis bräunlich (10YR 6/4 bis 6/6 light yellowish brown bis yellowish brown).

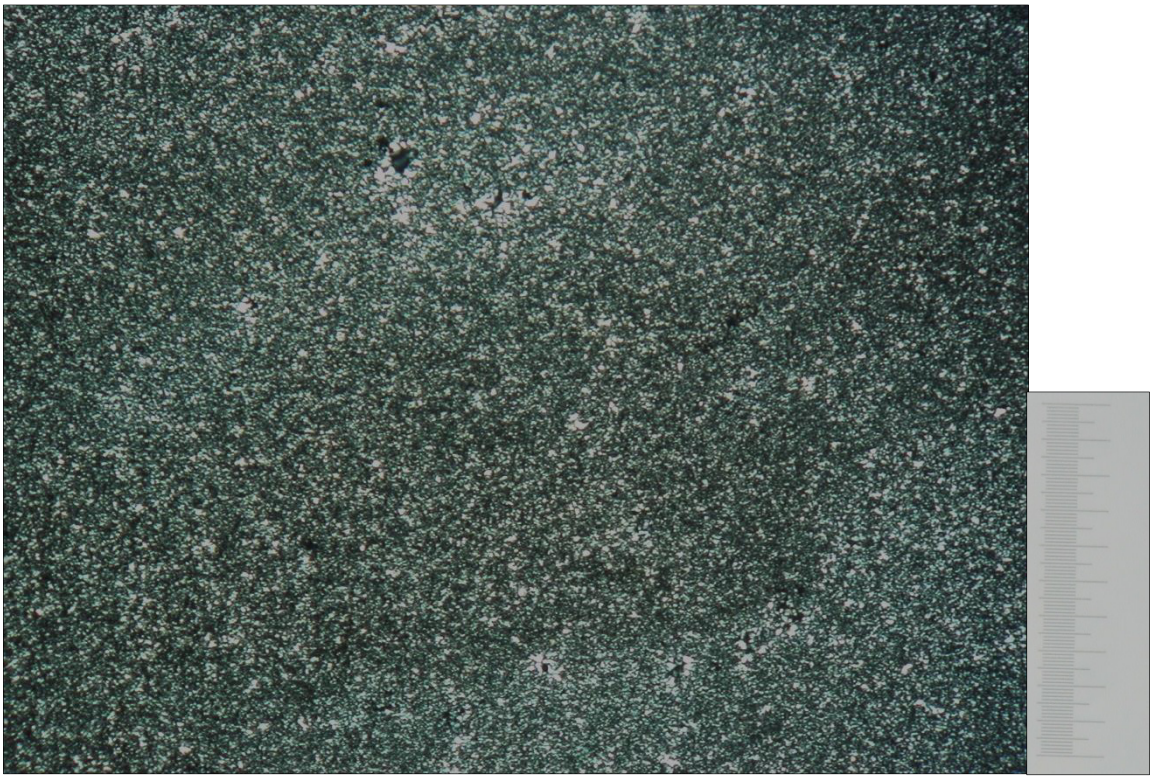


Abb. 4 Hung. 1: Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop (ohne Schwammnadeln) (gesamter Maßstab 1 mm).

Hung. 2 - Dunkelgraues, sehr feinkörniges Chert aus der Trias

Fundort: Budapest –Ördögorom, Buda-Berge
Lithotheca des Hungarian National Museum

Größter Durchmesser: 53 mm
Gewicht: 33 g









Grundform (Abb. 1, 2, 3): Natürlicher Cherttrümmer (NSH) einer nicht bestimmbaren relativ flachen Grundform (IN)

Cortex (Abb. 1)**:** Oberfläche nicht erhalten; bedeckt ca. ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 11 mm dick, fast überall angeschlagen; insgesamt weißlich bis sehr hellgrau (W); Farbe: weißlich (2.5Y 8/1 white)

Sichtbares Chertinneres (Abb. 2 und 3): insgesamt mittel- bis dunkelgrau (GR), ungebändert (IN), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: blaugrau (GLEY2 6/10B bis 4/10B bluish gray bis dark bluish gray), an mehreren Stellen oberflächenparallele Einlagerung von cortexähnlichem Material von ≤ 6 mm Höhe und ≤ 14 mm Breite (Abb. 2 und 3); auf einer Seite (Abb. 3) etwa mittig hellere ovale Struktur (≤ 10 mm), grau (10YR 7/1 bis 6/1 light gray bis gray)

Sägeschnitt (Abb. 4)**:** insgesamt mittel- bis dunkelgrau (GR); keine Musterung feststellbar (IN); einzelne Farben: weißlich (5Y 8/1 white), fleckiges helleres grau, zum Teil mit bläulicher Beimengung (GLEY2 6/10B bis 6/5PB bluish gray) und dunkleres Grau (GLEY1 4/N dark gray)

Einschlüsse: keine**,** auch keine Schwammnadeln

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, aber Bruchfläche eher rau, kaum muscheliger Bruch (QU 9)

Patinierung: kaum.

oben:
Abb. 1 Hung 2: Cortex.

Mitte, oben:
Abb. 2 Hung. 2: Chertinneres.

Mitte, unten:
Abb. 3 Hung. 2: Chertinneres.

unten:
Abb. 4 Hung. 2: Sägeschnitt.

Hung. 3 - Mittelgraues, feinkörniges Chert aus der Trias

Fundort: Rezi-Csokakö, Keszthely-Berge (Balaton-Hochland)
Lithotheca des Hungarian National Museum

Größter Durchmesser: Bruchstück a) 76 mm, Bruchstück b) 63 mm
Gewicht: a) 57 g, b) 44 g



Abb. 1 Hung. 3: Cortex von Bruchstück a).



Abb. 2 Hung. 3: Bruchfläche von a).

Sägeschnitt (Abb. 4)**:** insgesamt mittel- bis dunkelgrau (GR); gebändert (CB), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: entsprechen farblich im Wesentlichen dem der Bruchflächen, sind aber etwas heller und nuancenreicher: weißlich (10YR 8/1), grau (GLEY1 7/N bis 6/N light gray bis gray), dazwischen beige-grau (7.5YR 7/1 light gray)

Einschlüsse: keine, auch keine Schwammnadeln

Grundform: Cherttrümmer (SH) einer nicht bestimmbaren unregelmäßigen Grundform (IN)

Cortex (Abb. 1)**:** rau (FR); bedeckt knapp ½ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-15 mm dick; insgesamt beige-grau (G); einzelne Farben: überwiegend bräunlich (10YR 6/3 bis 5/3 pale brown bis brown), an angekratzten Stellen weißlich (2.5Y 8/1 white); im Anschnitt weißlich (5YR 8/1 white)

Sichtbares Chertinneres (Abb. 2 und 3): insgesamt mittel- bis dunkelgrau (GR); stark gebändert (CB), im Randbereich sehr schmale Bänder in verschiedenen Grautönen, wobei die Richtung der mehr oder weniger parallelen Bänder wechselt; einzelne Farben: weißlich, hell- bis mittelgrau (GLEY1 8/N, 7/N, 6/N und 5/N white, light gray, gray); ca. 20 Bänder im Randbereich < 1-2 mm breit, weiter innen breiter gebändert (bis 5 mm breit)



Abb. 3 Hung. 3: Bruchfläche von b).



Abb. 4 Hung. 3: Sägeschnitt von a).

Qualität des Rohmaterials: feinkörnig, glatt (QU 2)

Patinierung: je eine Bruchseite von a) und b) dunkelgrau (GLEY1 3/N very dark gray) und wenig orange (5YR 5/6 yellowish red)

Hung. 4 – Weißliches bis hellgraues, sehr feinkörniges Chert aus der Trias

Fundort: Budapest – Denever utca, Buda-Berge
Steinbruch
Lithotheca des Hungarian National Museum

Größter Durchmesser: fünf Bruchstücke: a) 30 mm, b) 24 mm, c) 26 mm, d) 23 mm, e) 22 mm
Gewicht: a) 5 g, b) 4 g, c) 4 g, d) 2 g, e) 1 g, insgesamt 16 g



Abb. 1 Hung. 4: Bruchstücke und Abschläge im Bogen von rechts nach links a) bis d), in der Mitte e).

Grundform (Abb. 1): Bruchstücke und Abschläge einer nicht bestimmbaren Grundform (IN) eines Triascherts (TRC): natürlicher Trümmer (NSH) b) (Abb. 1, zweiter von rechts), und Abschläge (FL) a), c), d) (Abb. 1, erster, dritter und vierter im Bogen von rechts) einer nicht bestimmbaren Grundform (IN); e) (Abb. 1, Mitte unten) Teil einer Klinge (BL) mit Kantenbeschädigung (Abb. 2)



Abb. 2 Hung. 4: Rückseite von Artefakt e) in stärkerer Vergrößerung mit Patina (Vergrößerung ca. 3,2x).

Cortex (vor allem Abb. 1a; 1b)**:** außen rau (FR); bedeckt jeweils nur wenig bis höchstens ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); < 1-2 mm dick; insgesamt weißlich bis hellgrau (W); einzelne Farben: weißlich bis beige-grau (2.5Y 8/1 bis 7/1 white bis light gray); kleine rostfarbene Stelle (< 3 mm)

Sichtbares Chertinneres (Abb.1)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); Musterung unklar (IN); einzelne Farben: im Randbereich bläulich-weiß (GLEY2 8/10B light bluish gray), Richtung Zentrum verschiedene Blaugrautöne (GLEY2 7/10B bis 4/10B light bluish gray bis dark bluish gray)

Sägeschnitt (Abb. 3)**:** insgesamt weißlich bis hellgrau (WH); einzelne Farben wenig heller: weißlich (GLEY2 8/10B light bluish gray), bläulich (GLEY2 7/10B bis 6/10B)

Einschlüsse: keine, auch keine Schwammnadeln



Abb. 3 Hung. 4: Sägeschnitt b.

Qualität des Rohmaterials (Abb. 2): teilweise durchscheinend; sehr feinkörnig, glatt und glänzend (QU 1)

Patinierung: kaum.

Hung. 5 – Mittelgraues, sehr feinkörniges Chert aus der Trias

Fundort: Solymar-Kaposztas kert, Buda-Berge
Lithotheca des Hungarian National Museum

Größter Durchmesser: 56 mm
Gewicht: 33 g







Grundform: natürlicher Trümmer (NSH) einer nicht bestimmbaren Grundform (IN)

Cortex (Abb. 1 Mitte und unten)**:** außen rau (FR), faltig wirkend; bedeckt knapp ⅓ der Oberfläche (1, < 50 %); deutlich < 1 mm dick; insgesamt gelblich bis ocker (Y); einzelne Farben: gelblich-weiß (2.5Y 8/4 bis 7/4 pale yellow); punktförmige braune Auflagerungen (4YR 4/3 reddish brown); im Anschnitt weißlich (GLEY1 8/N)

Sichtbares Knolleninneres: grau-beigefarben (YG); Bänderung nicht erkennbar (IN); einzelne Farben: grau-beige (2.5Y 7/2 bis 6/2 light gray bis light brownish gray) und (5Y 6/1 bis 6/2 gray bis light olive gray)

Sägeschnitt (Abb. 3): insgesamt mittel- bis dunkelgrau (GR), heller und bläulicher als erwartet; Musterung unklar (IN), nicht deutlich md/od; einzelne Farben: überwiegend leicht bläuliches grau (GLEY1 6/N gray), dunklere, vor allem punktförmige Strukturen (GLEY1 5/N gray); wenige Poren ≤ 1 mm

Einschlüsse: makroskopisch verschiedene Komponenten und Organismenreste, ca. 3-8 mm lang

Qualität des Rohmaterials: sehr feinkörnig, glatt, glänzend (QU 1)

Patinierung: gelblich (2.5Y 7/3 pale yellow).

oben:
Abb. 1 Hung. 5: Cortexseite.

Mitte:
Abb. 2 Hung. 5: Bruchseite.

unten:
Abb. 3 Hung. 5: Sägeschnitt.