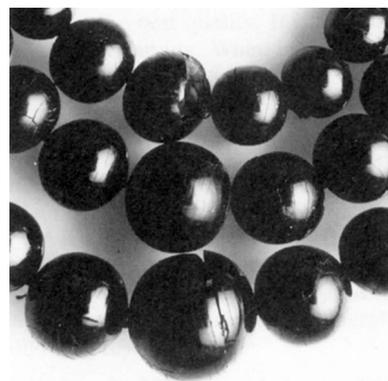




Haute école d'art appliqués Arc
Filière conservation-restauration
Orientation archéologie, ethnographie

**Untersuchung verschiedener
Konservierungsmethoden auf
erdfeuchtem bis nassem
archäologischen Gagat und
anderen Kaustobiolithen**

Sabine Brechbühl
30. September 2005



Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre ohne die Unterstützung und Mithilfe einer grossen Anzahl Personen nie in dieser Form zustande gekommen. Das Entgegenkommen und Interesse, das ich bei meinen zahlreichen Anfragen und Erkundungen von so vielen Seiten her erleben durfte, war äusserst ermutigend und stellt eines der besten Erlebnisse meiner Diplomarbeit dar.

An erster Stelle möchte ich mich beim kantonalen Archäologiemuseum Neuenburg LATENIUM bedanken. Im LATENIUM ist der grösste Teil meiner Arbeit entstanden. Ich freue mich, dass die Museumsleitung, repräsentiert durch den Direktor Michel Egloff und dem Konservator Denis Ramseyer, mir die Möglichkeit und das Vertrauen gegeben hat, meine Diplomarbeit im LATENIUM zu verwirklichen. Ganz besonderen Dank gilt aber dem Leiter des Labors für Konservierung und Restaurierung Beat Hug, der mich als mein Praktikumsverantwortlicher während meiner Arbeit mit Rat und Tat unterstützt hat. Durch seine grosse Erfahrung und durch seine kritische Haltung konnte er mir wohl bei sämtlichen Fragen weiterhelfen, mich beraten und Verbesserungen bewirken. Dank ihm stand mir auch sehr gut geeignetes Probenmaterial zur Verfügung. Nebst Beat Hug und der Museumsleitung möchte ich auch den anderen Mitarbeitern des LATENIUM danken, da ich auch von ihnen Beratung und Unterstützung erhalten habe.

Als Betreuerin und Mentorin hat mich Madeleine Betschard, Direktorin des Musée Schwab in Biel begleitet. Ich möchte ihr für die anregenden Diskussionen herzlich danken.

Mein ganz spezieller Dank gilt Dr. Bertrand Ligouis, Kohlepetrografe vom Laboratory for applied organic petrology LAOP in Tübingen, bei dem ich meine Probestücke und archäologischen Objekte analysieren lassen konnte. Durch ihn kam ich nicht nur zu sehr qualitätvollen Materialanalysen, sondern ich konnte auch viel über Kohlenpetrografie lernen. Obschon Bertrand Ligouis in keiner Weise eine Verantwortung für meine Arbeit trug, hat er sich mit grossem Engagement und grosser Begeisterung für mein Projekt eingesetzt und mir in vielfältiger Weise geholfen.

Für die praktische Arbeit wurde mir geologisches und archäologisches Material zur Verfügung gestellt. Ich möchte mich bei Prof. Martin Burkhard vom geologischen Institut der Universität Neuenburg, bei Beda Hofmann, Naturhistorisches Museum Bern, bei Ulrike Rothenhäusler vom Landesmuseum Zürich und bei Mathias Seifert, Archäologischer Dienst Graubünden bedanken, dafür, dass sie mir freundlicherweise schweizerische und ausländische Kaustobiolithproben ausgehändigt haben. Frau Ihrig, Konservatorin-Restauratorin vom Historischen Museum Basel und die Archäologische Bodenforschung Basel haben es möglich gemacht, dass ich die Resultate meiner Untersuchung auf archäologischen Objekten anwenden konnte.

Die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop durfte ich im geowissenschaftlichen Departement der Universität Freiburg, unterstützt von Prof. Bernard Grobety und Christoph Neururer, durchführen, wofür ich mich herzlich bedanken möchte. Stéphane Maître, Röntgentechniker im Spital Les Cadolles in Neuenburg hat die Untersuchungen mit dem Computertomographen vorgenommen.

Herr Werner Schoch hat mein Probematerial Holzanatomisch untersucht. Auch ihnen gilt mein herzlicher Dank.

Bei Jacques Reinhard möchte ich mich bedanken für die Einführung in die archäologische Experimentation.

Mein herzlicher Dank gilt auch allen Personen, die mir Auskünfte verschiedenster Art gegeben, sich Zeit für Diskussionen genommen, und mir Publikationen zugeschickt haben oder mir in anderer Weise beigestanden sind. Dies sind Astrid Preuschoff-Güttler, Tübingen; Ulrike Rothenhäusler, Landesmuseum Zürich; Stephan Bucher, Naturhistorisches Museum Neuenburg; Denise Leesch, Archäologischer Dienst Kanton Neuenburg; Françoise Tschudin, Schweizerischer Gemmologischer Verband; Cyntia Dunning, Archäologischer Dienst Kanton Bern; Martine Rochat, Archäologie und Paläonthologie Kanton Jura; Mary Davis, National Museums and Galleries of Wales GB; Per Hoffmann, Schiffahrtsmuseum Bremerhafen D; Paulette Pauc, centre de recherche et developpement culturel en Corbière F; Hubert Engelbrecht, München D; Herbert Müller, Neunkirchen D; François-Xavier Chauvière, Universität Neuenburg; Judith Fuchs, Kantonsarchäologie Aargau und viele mehr. Meinen Dank möchte ich auch den Institutionen aussprechen, die an meiner Umfrage teilgenommen, und den Firmen, die mir Gratismuster ihrer Produkte zugeschickt haben.

Letztlich bin ich auch meinem Freund, meiner Familie und meinen Freunden dankbar, die mich während der Entstehung dieser Arbeit durch Hochs und Tiefs begleitet und mich immer wieder angehört und ermutigt haben.

Résumé

Les objets archéologiques en jais et autres caustobiolithes sont sujets à des problèmes de conservation. Lorsqu'un objet réalisé dans ce type de matière est trouvé dans un sol archéologique, il se présente souvent dans un très bon état. Mais dès que l'objet sèche, il se fissure, se tord et se rétracte d'une manière irréversible. Le présent travail a pour but de trouver des causes à ce processus et des méthodes susceptibles de remédier à ce problème de conservation. Les travaux pratiques entrepris sont une série de tests de séchage et de consolidation sur des échantillons géologiques ainsi que l'application des résultats obtenus sur des objets archéologiques. Les essais sont vérifiés par des méthodes scientifiques adaptées.

La littérature spécialisée de conservation-restauration recueille très peu de publications concernant la conservation d'objets en caustobiolithes. Les traitements essayés jusqu'à présent reprennent ceux utilisés dans la conservation du bois gorgé d'eau et des fossiles. Il n'existe pas d'étude comparative des méthodes. On peut constater que la composition structurelle et chimique des caustobiolithes est peu décrite, et encore moins les processus de dégradation. Les publications montrent que la préoccupation actuelle est avant tout la recherche de méthodes non-destructives pour déterminer le type de caustobiolithes utilisé. La connaissance des matériaux, nécessaire au travail du conservateur-restaureur, est acquise pour le cas des caustobiolithes par l'étude de la pétrographie organique.

C'est une sous branche de la géologie, qui étudie les sédiments formés à partir de matière organique fossile comme les lignites et les charbons.

Les caustobiolithes ont été utilisés depuis le Magdalénien pour fabriquer des bijoux et des objets divers. Si cette première utilisation se concentre en Allemagne du sud et en Suisse, on voit une grande popularité de ces matériaux en Angleterre durant l'Age de bronze, où l'on fabrique des colliers de grande qualité artistique. Pendant l'Age de Hallstatt et de Latène on trouve déjà une véritable industrie de fabrication de bijoux en caustobiolithes. Les trouvailles se répandent en Europe, mais ne franchissent pas les Alpes. Les Romains multiplient encore le commerce d'objets en jais. Au Moyen Age c'est l'utilisation du jais pour des objets ecclésiastiques qui domine. A St. Jacques de Compostelle, on fabrique des insignes de pèlerinage en jais, et les artisans s'organisent dans des corps de métier. Le zénith pour le jais est son utilisation comme joaillerie de deuil dans l'Angleterre du 19^{ième} siècle. L'industrie se concentrait à Whitby et occupait plus que 1000 personnes. Un rapide déclin de popularité du jais fait qu'aujourd'hui ce matériel est relativement peu connu.

Les caustobiolithes se définissent comme étant des sédiments combustibles, issus de matière organique. Ils se forment par la transformation de matière organique morte en tourbe, lignite, charbon, anthracite et graphite. Ce processus s'appelle carbonisation, parce qu'il entraîne un enrichissement relatif de carbone par l'échappement d'autres éléments. C'est la carbonisation qui mène à la formation de macéraux, les constituants des caustobiolithes observables sous microscope. Ils correspondent aux minéraux, qui sont les constituants d'une roche. L'étude des macéraux permet de déterminer les différents types de caustobiolithes ainsi que leur degré de maturité. Il y a une grande diversité de matières qui peuvent se former lors de la carbonisation de matière organique, mais seuls les types particulièrement dense, tenace et homogène pouvaient être utilisés pour fabriquer des bijoux et des objets. La matière la plus recherchée était le jais, qui est issu de bois flotté, carbonisé et imprégné par du bitume. Les charbons sapropéliques, issus de boue organique riche en pollen et algues, présentent également de bonnes propriétés pour être travaillés. Par contre le lignite, qui est souvent cité dans la littérature, est généralement trop friable pour être utilisé. Les formations du jais sont géologiquement liées aux couches du Toarcien. Les principaux sites d'exploitations sont à Whitby, dans le Yorkshire, en Angleterre et dans le Jura Souabe près de Stuttgart en Allemagne. Là où le jais n'était pas disponible, on utilisait des caustobiolithes locaux pour le remplacer.

Il est difficile de donner une description chimique des caustobiolithes, car la composition dépend de la maturité et elle est différente pour tous les macéraux. En somme, les molécules organiques complexes des débris végétaux comme les celluloses, les cires et les résines sont décomposées et se transforment en molécules aromatiques et aliphatiques. Les propriétés physiques des types de caustobiolithes utilisés pour la fabrication d'objets sont une faible densité, une faible dureté, une forte brillance et une couleur noire profonde.

La dégradation des caustobiolithes est peu étudiée. On peut décrire les dégâts visibles, qui se qualifient de fissuration et d'éclatement de la matière. Même si on connaît certains processus de dégradation auxquels les caustobiolithes sont soumis, on ne peut quand même pas expliquer pourquoi ils éclatent lors du séchage. C'est surtout la dégradation de certains constituants des caustobiolithes qui est bien étudié, notamment la corrosion du pyrite, un minéral, qui se forme souvent

dans les matières fossiles. La pyrite se décompose en présence de l'humidité et de l'oxygène, c'est pourquoi il faut maintenir l'humidité relative inférieure à 50% pour assurer la conservation à long terme des caustobiolithes. À côté des pyrites ce sont les minéraux argileux qui posent problème à cause de leur propriété hygroscopique. Ces minéraux peuvent gonfler et se rétracter en présence d'une humidité changeante et provoquer des fissures dans les matériaux. Certains constituants organiques comme les vitrinites et les bitumes sont sujet à des processus d'oxydation. Certains constituants, comme les pyrites et les minéraux ne sont donc pas favorables à la conservation de l'objet, mais ils ne sont pas responsables des problèmes de séchage. Il est probable que des transformations chimiques jusqu'alors méconnues se produisent dans le sol archéologique rendant l'objet vulnérable au séchage. On observe aussi que certains matériaux sont plus résistants à ce processus.

L'étude théorique des caustobiolithes, de leur composition, de leur propriété et de leur vulnérabilité envers ce processus de dégradation était indispensable à la réalisation de tests pratiques de conservation. En tout onze méthodes de conservation ont été testées et évaluées. Elles englobaient des méthodes de séchage ainsi que des méthodes de consolidation avec des polyéthylenglycols, des résines vinyliques et acryliques, des résines naturelles et des consolidants inorganiques. On exige de ces méthodes de pouvoir éviter la fissuration, qui se produit normalement lors du séchage des caustobiolithes archéologique, ainsi que de les protéger contre l'oxydation des constituants. Les méthodes citées ont été testées sur un morceau de vitrain géologique. Le vitrain est du bois flotté carbonisé sans imprégnation de bitume, et ressemble donc à un jais dégradé. La particularité du morceau à disposition est qu'il a été trouvé dans un fleuve et non pas dans la couche géologique où il a été formé. Par ce fait, il a subi des dégradations comparables à un objet archéologique. Le vitrain a été scié en échantillons de 2cm de longueur et de 1cm de largeur et de hauteur. Ceux-ci ont été dessinés, mesurés au dixième de millimètre, photographiés et pesés avant d'être traités par les 11 méthodes citées. Après la conservation, chaque échantillon était de nouveau documenté, afin de constater l'importance de la fissuration, la fidélité des dimensions, la stabilité des formes, la fragilité et les propriétés optiques. Les imprégnations au PEG 1000 et 4000, en augmentant la concentration des bains sur 4 semaines, ont été les plus efficaces pour la plupart des critères. La vérification et explication de ces résultats avec le microscope électronique à balayage n'a malheureusement pas fourni de réponses.

Ces résultats ont été appliqués sur deux fragments de bracelets conservés humides depuis leur trouvaille. L'analyse pétrographique des matériaux montrait qu'il s'agissait de sapropélite et de cannelcoal. Ces matériaux se distinguent du vitrain utilisé pour les séries de tests car ils ne sont pas formés à partir de bois et le sapropélite a une proportion de constituants minéraux plus importante. C'est pour cela que la conservation des fragments de bracelets n'est pas une véritable application des tests préalables, mais plutôt une suite des recherches. Le sapropélite était conservé avec le PEG 4000, le cannelcoal avec le PEG 1000. Les traitements ont mené à des résultats satisfaisants. La pénétration des produits a pu être attesté par l'augmentation de la densité des pièces, constatée par tomographie.

Cette recherche comparative de méthodes de conservation pour les objets archéologiques en caustobiolithes n'est qu'un humble début. Il est nécessaire de multiplier les efforts pour trouver les

causes de la dégradation au séchage de ces matières et trouver des méthodes de conservation pour chaque type de matière qu'on peut rencontrer.

Abstract

Archaeological objects made of jet or other caustobiolithes are difficult to conserve. When such types of objects are found in an archaeological soil, they often seem to be in good condition. But as soon as they are allowed to dry, they crack, warp and shrink in an irreversible manner. This present work has the aims to find reasons for this destroying process and methods susceptible to avoid it. The practical work done are tests on drying and consolidation treatments on geological material and the application of the results on archaeological objects. The experiments are all testified by means of adapted scientific methods.

The technical literature in conservation-restauration contains few publications about conservation of archaeological caustobiolithes. The treatments tried up to now are oriented on conservation of waterlogged wood and fossils. There is no comparative study about these methods. It can be stated also that there are no descriptions about the chemical and structural composition and about degradation of caustobiolithes. The publications show that the current interest is to find non-destructive determination methods, for identifying the exact raw material type. The knowledge about material is important for conservators-restaurators. For caustobiolithes it is therefore necessary to learn organic petrography. This is a subordinate field of geology and studies sediments formed from fossilised organic material as lignites and coals.

Certain types of caustobiolithes, all above jet, were worked to jewellery and objects as early as in Magdalenian. This first use concentrates to south of Germany and Switzerland. During Bronze Age, popularity of such materials is stated in Great Britain, where necklaces of great artistic quality are produced. Hallstatt and Latène periods show already a fabrication of caustobiolithic objects with industrial proportions. Finds are spread all above Europe, but did not pass over the Alps. Romans did even multiply the commerce with jet objects. In medieval times jet was almost exclusively used for ecclesial purposes. At Santiago de Compostella pilgrim insignes were produced, and the workers were organised in guilds. The zenith of popularity of jet is its utilisation for mourning jewellery in the 19th century in Great Britain. The industry is concentrated in Whitby, Yorkshire and occupied about 1000 workers. The rapid fall of popularity is responsible that today jet is widely unknown.

Caustobiolithes are defined as combustible sediment, originated from organic matter. They result from the transformation of dead organic material into peat, lignite, coal, anthracite and graphite. This process is named carbonisation, because it involves a relative enrichment of carbon content whilst other elements decrease. Carbonisation also leads to the formation of macerals, the constituents of coals, observable under microscope. Macerals correspond to minerals, which are the constituents of rocks. It is the study of macerals that allows the identification of material type and its maturity. There is a great diversity of materials resulting from this process, but only especially hard, compact and

homogenous types could be worked and fashioned in objects. The noblest material therefore is jet. It originates from floated wood that was carbonised and impregnated with bitumen. Sapropelic coals originate from carbonisation of organic mud, rich in pollen and algae and are adapted to be worked as well. Lignite, often cited in literature, is too brittle to be used. Jet formations are geologically associated with Toarcien strata. The principal sites of exploitation are in Whitby, Yorkshire in England and Swabian Alps near Stuttgart in Germany. Where jet was not available, local caustobioliths were used to replace it.

It is difficult to give a chemical description of caustobiolithes, because it depends on maturity and each maceral has a different composition. In general, complicated organic molecules such as cellulose, waxes and fats are decomposed and transformed into aromatic and aliphatic compounds. Physical properties of caustobiolith types chosen to be worked are a low density, a low hardness, a strong lustre and a deep black colour.

The deterioration of caustobiolithes is not well studied. Visible damage as cracking and bursting can be described, but it is not possible today to explain the reasons for it. But certain processes of decaying, which concern isolated constituents of caustobiolithes, are well known, such as the oxidation of pyrites, a mineral often found in fossils. Pyrite decomposes in presence of oxygen and humidity, which explains why relative humidity must be kept below 50% for conservation on long term. Besides pyrites also clay minerals are problematic, because of their swelling properties with humidity. So variations in relative humidity can result in cracking of the material. Certain organic constituents as vitrinites and bitumen are prone to oxidation processes. To sum up, this means that certain compounds as pyrites and clays are not favourable to the conservation of caustobiolithes, but are not responsible for cracking and warping when it is dried. It is believed, that not known chemical transformations take place in the archaeological soil and makes the organic compounds of caustobiolithes sensitive to drying. It is observed that some material is more resistant to this process.

The study of composition, properties and decay of caustobiolithes was important, so that practical conservation tests could be realized. Eleven methods were tested and evaluated. They contain drying methods and consolidation methods with products as polyethylenglycol PEG, acrylic resins, vinyl resins, natural resins and inorganic consolidants. The claim for these methods was to prevent cracking, which normally occurs when drying, and to protect the constituents from future oxidation. The cited methods were tried on a geological piece of vitrain. Vitrain is floated wood, carbonised but not impregnated with bitumen as jet. This explains why it is very similar to degraded jet. The particularity of the chosen piece is, that it was not found in its geological strata where it formed, but in a river, living therefore a decaying process, much like an archaeological object. The vitrain has been sawed in pieces of 2 cm long and 1 cm broad and high. These samples were drawn, photographed, measured and weighted and then conserved with the 11 methods. After treatment the samples were documented anew, so that cracking, dimension changes, warping, fragility and optical properties could be evaluated. Impregnations with PEG 1000 and PEG 4000, when rising concentration during 4 week immersion, showed best results for most criteria. Verification of these results with scanning electron microscope did unfortunately not supply any answers.

The results of the experiment were applied to archaeological bracelet fragments, stored humid since their discovery. The petrographic analysis of rawmaterial showed it to be sapropelite and cannelcoal. These materials distinguish from vitrain, because they don't have a wood predecessor and for sapropelite there is a higher proportion of mineral constituents. Conservation treatment of these bracelets is therefore not a real application of the preliminary results, but the continuation of research. The sapropelite fragment was conserved with PEG 4000 and the cannelcoal with PEG 1000. The treatments showed satisfactory results. Penetration of the products could be attested with computer tomography, because density of the pieces increased.

This comparative research is only a modest begin. Much more research has to be done for finding reasons why caustobiolithes decay when dried and specific methods for each type of material should be found.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problematik	1
1.2	Fragestellung	2
1.3	Vorgehensweise	3
2	Forschungsstand	4
2.1	Analyse der Fachliteratur	4
2.2	Umfrage	8
2.2.1	Ziel der Umfrage	8
2.2.2	Konzeption	8
2.2.3	Auswertung	8
3	Kaustobiolithe in der Geschichte	11
3.1	Archäologie	11
3.1.1	Steinzeit	11
3.1.2	Bronzezeit	12
3.1.3	Eisenzeit	13
3.1.4	Antike	15
3.2	Kunstgeschichte	16
3.2.1	Mittelalter bis 19. Jahrhundert	16
3.2.2	19. Jahrhundert	18
3.2.3	20. Jahrhundert bis heute	19
3.3	Ethnologie	20
3.4	Herstellungstechnik	21
3.5	Magische Eigenschaften von Kaustobiolithen	23
4	Bildung und Vorkommen von Kaustobiolithen	25
4.1	Bildung von Kaustobiolithen	25
4.1.1	Ablagerung von Pflanzenmaterial als Kohlebildner	25
4.1.2	Inkohlung	27
4.1.3	Mazerale	31
4.1.4	Mikrolithotypen und Lithotypen	33
4.1.5	Mineralische Bestandteile	34
4.2	Als Schmuckstein verwendete Kaustobiolithe	35
4.2.1	Humuskohle	35
4.2.2	Sapropelkohle und Sapropelit	36
4.2.3	Ölschiefer	36

4.2.4	Gagat	37
4.2.5	Lignit	37
4.2.6	Kännelkohle	38
4.2.7	Bogheadkohle	38
4.2.8	Pechkohle oder Vitrain	38
4.2.9	Xylit	39
4.2.10	Bitumen	39
4.2.11	Ersatzmaterial und Fälschungen	39
4.3	Vorkommen von Kaustobiolithen	40
4.3.1	Erdgeschichtliche Einordnung der Kohlevorkommen	40
4.3.2	Kohlevorkommen der Schweiz	41
4.3.3	Vorkommen von Gagat	42
4.3.4	Vorkommen von Kännelkohle, Bogheadkohle und Sapropelit	45
5	Zusammensetzung der kaustobiolithischen Rohmaterialien	46
5.1	Chemische Eigenschaften und Zusammensetzung	46
5.1.1	Allgemeines	46
5.1.2	Elementare Zusammensetzung	46
5.1.3	Organische Verbindungen	47
5.1.4	Chemische Zusammensetzung der Mazerale	49
5.2	Physikalische und technische Eigenschaften	49
5.2.1	Härte, Dichte, Zähigkeit und Bruch	49
5.2.2	Farbe, Glanz und Brechungsindex	50
5.2.3	Elektrostatische Aufladung und Wärmeleitung	51
5.2.4	Porosität	51
5.2.5	Differenzierte Verwendung der Werkstoffe	51
5.3	Biologische Strukturen	51
6	Abbauprozesse bei Kaustobiolithen	53
6.1	Feststellbare Veränderungen	53
6.1.1	Zustandsbeschreibung von archäologischen Objekten	53
6.1.2	Während der Bearbeitung entstehende Schäden	54
6.1.3	Durch Klebstoffe und Lösungsmittel verursachte Schäden	54
6.2	Erläuterung verschiedener Zerfallsvorgänge	55
6.2.1	Spaltenbildung	55
6.2.2	Oxidation	55
6.2.3	Pyrit	56
6.2.4	Bitumen	57
6.2.5	Wasseraufnahmefähigkeit	57
6.2.6	Tonminerale	58
6.2.7	Konservierungsmaterialien	58

6.2.8	Mechanische Degradierung	58
6.2.9	Prozesse im Boden	59
6.3	Interpretation und Folgerung	59
6.3.1	Bezug auf die Fragestellung	59
6.3.2	Folgerung für die Konservierung	60
7	Versuche zur Trocknung und Konsolidierung	61
7.1	Auswahl der Methoden und Produkte	61
7.1.1	Bisher eingesetzte Methoden und Produkte	61
7.1.2	Bei verwandten Materialien eingesetzte Methoden und Produkte	61
7.1.3	Anforderungskatalog an Methoden und Produkte	61
7.1.4	Auswahl	62
7.2	Auswahl des Probematerials	68
7.2.1	Schwierigkeiten	68
7.2.2	Beschrieb und Einschätzung des gewählten Stückes	68
7.2.3	Geologische Herkunft	69
7.2.4	Kohlenpetrografische Analyse	69
7.2.5	Holzanatomische Analyse	70
7.3	Aufbau und Durchführung der Versuchsreihe	70
7.3.1	Vorbereitung der Probestücke	70
7.3.2	Dokumentation vorher	71
7.3.3	Trocknung ohne Konservierung als Vergleichsbasis	72
7.3.4	Behandlungen	73
7.3.5	Dokumentation nachher	74
7.4	Resultate und Auswertung	74
7.4.1	Kriterien	74
7.4.2	Vergleich der Masse	75
7.4.3	Vergleich sichtbarer Unterschiede	77
7.4.4	Nachweis der Resultate mit dem Rasterelektronenmikroskop	78
8	Anwendung auf archäologischem Material	80
8.1	Die Objekte	80
8.1.1	Identifikation und Beschrieb	80
8.1.2	Archäologischer Kontext	81
8.1.3	Kohlenpetrografische Analyse	82
8.1.4	Voruntersuchung mit Computertomografie	85
8.1.5	Erhaltungszustand	86
8.2	Auswahl der Methoden und Produkte	87
8.2.1	Übertragbarkeit der Versuchsreihe	87
8.2.2	Auswahl in Bezug auf Rohmaterial und Erhaltungszustand	87
8.3	Die Behandlung	88

8.3.1	Dokumentation vorher	88
8.3.2	Anfertigung einer Kopie	88
8.3.3	Behandlung	88
8.3.4	Dokumentation nachher	88
8.4	Resultate und Auswertung	89
8.4.1	Kriterien	89
8.4.2	Vergleich der Masse	89
8.4.3	Vergleich sichtbarer Unterschiede	90
8.4.4	Auswertung mit Computertomografie	91
9	Schlussfolgerung	92
10	Verzeichnisse	94
10.1	Literaturverzeichnis	94
10.2	Bilderverzeichnis	101
10.3	Tabellenverzeichnis	103
11	Anhang	104

1 Einleitung

1.1 Problematik

Archäologische Gegenstände aus Gagat, oder ähnlichem schwarzen kohligen Gestein wie Sapropelit, Kännelkohle, Bogheadkohle, Ölschiefer, festes Bitumen, Lignit, Xylith, Pechkohle usw. sind oft in einem schlechten Erhaltungszustand. Sie weisen Spalten und Risse auf und halten manchmal kaum mehr zusammen. Die Auswertung und Ausstellung dieser Objekte ist deshalb erschwert, und die Aussagekraft eines solchen Gegenstandes als ästhetisches Schmuckstück und als wissenschaftlich auswertbarer Zeuge früherer Kulturen, ist vermindert.

In der Literatur wird wiederholt auf die schlechte Erhaltung von Gagatfunden hingewiesen. Es wird auch erwähnt, dass im Moment der Ausgrabungen solche Objekte noch intakt sind. Erst nachher, wenn die im Boden aufgenommene Erdfeuchte verdunstet, oder anders gesagt, wenn die Objekte trocknen, entstehen Spalten und Risse, die das Objekt entstellen. Die ursprüngliche Form geht bei der Trocknung unwiderruflich verloren, und kann auch durch Wiederbefeuchtung nicht zurückerlangt werden. Durch Kleben und Tränken schon getrockneter Objekte verbessert sich deren Zustand nur unbedeutend. Spalten können nicht verschlossen werden und auseinander gefallene Teile passen nicht mehr aufeinander (vgl. Bild 1 und Bild 2). Erstaunlicherweise gibt es aber auch Gagatfunde, die bei der Trocknung gar nicht beschädigt werden. (CRONYN, 1990, S. 294) (CHAVIGNIER, 1990, S. 71)



Bild 1: Kautobiolithperle, durch die Trocknung auseinandergesprengt.



Bild 2: Perle nach der Restaurierung. Die Einzelteile passen nicht aufeinander, es bleiben Spalten sichtbar.

Konservatoren- Restauratoren ist dieses Phänomen allgemein bekannt. Es gibt aber bisher nur wenige publizierte Versuche, solche Objekte noch im erdfeuchten Zustand zu behandeln. Die Stücke müssen dafür feucht geborgen und feucht bis zur Konservierung zwischengelagert werden. Es wurden sehr unterschiedliche Methoden und Produkte auf Gagat und ähnlichen Materialien ausprobiert.

Die Schwierigkeit für Konservatoren- Restauratoren besteht unter anderem darin, dass bei solchen Objekten vorerst nicht klar ist, um welches Material es sich genau handelt. Mit Gagat angesprochene

Objekte stellen sich oft bei entsprechenden Analysen als ein anderes kohliges Material heraus. Deshalb empfiehlt es sich, beim Umgang mit solchen Materialien den Oberbegriff Kaustobiolith, was soviel heisst wie brennbares organisches Sedimentgestein, zu verwenden, solange keine Materialbestimmung vorgenommen wurde. Kaustobiolithe sind fossile, oder genauer gesagt, durch Inkohlung fossilisierte, organische Reste. Gewisse Arten wurden vom Magdalénien bis heute für die Anfertigung von Schmuck und Gebrauchsgegenständen verwendet, wobei dem Material oft magische Eigenschaften zugeschrieben wurden. Die strukturelle und chemische Zusammensetzung der Rohstoffe ist sehr komplex und heute noch nicht vollständig erforscht. Noch schlechter sind die Abbauprozesse von Kaustobiolithen bekannt.

Es besteht also Unsicherheit, wie archäologische Kaustobiolithe konservatorisch zu behandeln sind. Hingegen besteht ein Handlungsdrang, da die Objekte, wenn keine Behandlung erfolgt, durch die Trocknung unwiderruflich beschädigt werden. Das fehlende Wissen um die Zusammensetzung und die Degradierungsvorgänge führte zu verschiedenen Konservierungsversuchen, die bisher nicht grundlegend verglichen worden sind.

1.2 Fragestellung

Aus der vorher beschriebenen Problematik ergeben sich zwei Leitfragen, auf die in dieser Arbeit eingegangen wird.

Weshalb spalten, verformen und verziehen sich archäologische Objekte aus Kaustobiolithen durch ihre Trocknung?

- *Rohstoff:* Zeigen nur gewisse Rohmaterialien dieses Verhalten bei der Trocknung oder sind alle Kaustobiolitharten betroffen? Lösen bestimmte Bestandteile, Materialstrukturen, chemische oder physikalische Eigenschaften in Kaustobiolithen solche Trocknungsschäden aus?
- *Bearbeitung:* Wurden beim Drehen, Schnitzen und Polieren der kaustobiolithischen Rohmaterialien Techniken oder Produkte verwendet, die solche Schäden auslösen könnten?
- *Archäologisches Alter:* Zeigen besonders archäologisch ältere Objekte solche Zerfallserscheinungen?
- *Bodenlagerung:* Wurden archäologische kaustobiolithische Objekte, die bei der Trocknung spalten, in bestimmten Bodentypen gefunden?
- *Messung des Zerfallgrades:* Gibt es Möglichkeiten, eine Voraussage zu treffen, ob ein Objekt beim Trocknen spalten wird oder nicht?

Mit welchen konservatorischen Massnahmen können solche Schäden verhindert werden?

- *Trocknungsmethoden:* Gibt es Möglichkeiten, ein archäologisches Objekt aus kaustobiolithischem Material schonend zu trocknen, so dass die Form des Gegenstands nicht beschädigt wird?

- *Konsolidierungsmethoden:* Kann ein Produkt eingeführt werden, das das Wasser mit seiner Stützfunktion im Objekt ersetzen kann?

Aus den Fragestellungen lassen sich eine ganze Reihe an möglichen theoretischen wie praktischen Recherchen ableiten. Daraus wurde eine angemessene Auswahl getroffen, die einen möglichst realistischen Arbeitsumfang für die zur Verfügung stehende Zeit von einem Jahr darstellt.

Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Untersuchung von Konservierungsmethoden und Produkten. Die Gründe, weshalb Kaustobiolithe bei der Trocknung spalten, werden nur in theoretischer Form und im Gespräch mit Fachpersonen erarbeitet. Die Autorin hat in dieser Arbeit dem Vergleich von Konservierungsmethoden den Vorzug gegeben, weil sie sich denkt, dass für die Praxis wohl in erster Linie wichtig ist, wie Kaustobiolithe nach aktuellen Kenntnissen bestmöglich zu konservieren sind.

1.3 Vorgehensweise

Die Wirkung von bisher eingesetzten Konservierungsmethoden auf Kaustobiolithen soll durch Testreihen auf degradiertem, geologischem Material verglichen werden, was in Kapitel 7 dargestellt wird. Es geht darum zu erfassen, welche Mittel geeignet sind, die Zerstörung, die durch die Trocknung entsteht, zu verhindern oder wenigstens zu mindern. Für die Auswertung und Interpretation der erzielten Resultate werden naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden beigezogen. Die Ergebnisse sollen anschliessend auf archäologischen, feucht zwischengelagerten Armingringfragmenten angewendet werden, was in Kapitel 8 beschrieben wird. Mit einer Literaturrecherche und einer Umfrage sollen die verschiedenen, bisher angewandten Methoden vorerst erfasst werden. Die Entwicklung eines Anforderungskatalogs soll helfen, die verschiedenen Methoden auf theoretischer Basis zu bewerten, bevor sie anschliessend auf dem Probematerial getestet werden.

Die praktischen Arbeiten werden von einer umfassenden theoretischen Vorarbeit gestützt, die es erlauben soll, die erzielten Resultate besser interpretieren zu können. Die Sichtung der Fachliteratur erlaubt es, einen Eindruck des heutigen Kenntnisstandes zu diesen Materialien zu erhalten, was in Kapitel 2 dargestellt wird. Ein geschichtlicher Überblick zum Gebrauch von Gagat und anderen Kaustobiolithen wird in Kapitel 3 gegeben. Es werden auch Bearbeitungstechniken erläutert, damit ihr möglicher Einfluss auf die Erhaltung der Objekte ausgemacht werden kann. In Kapitel 4 folgt eine Zusammenfassung zur geologischen Entstehung von Kaustobiolithen, deren Kenntnis zum Verständnis des strukturellen Aufbaus dieser Materialien unerlässlich ist. Durch welche chemischen und physikalischen Eigenschaften gewisse Kaustobiolitharten zum Gebrauch als Schmuckstein geeignet sind, wird im Kapitel 5 aufgezeigt. Wie bereits in der Problemstellung angedeutet, ist zu Abbauprozessen erst wenig bekannt. Vorgänge, die gewisse Bestandteile von Kaustobiolithen betreffen, werden in Kapitel 6 aufgelistet. Dort wird auch abschliessend Bezug zur ersten Leitfrage (vgl. 1.2) genommen.

2 Forschungsstand

Um einen Eindruck des heutigen Kenntnisstandes zu archäologischen Objekten aus Kaustobiolithen zu erhalten, wird in diesem Kapitel einen Überblick über die Fachliteratur gegeben. Dabei werden neben den Konservierungsmethoden auch die Materialkenntnis und das Wissen zu Degradierungsvorgängen eingeschätzt. Da es für den praktischen Teil dieser Arbeit besonders wichtig ist, möglichst die ganze Bandbreite der bis heute versuchten Konservierungsmethoden zu erfassen, also auch solche, die nicht publiziert sind, wurde eine Umfrage durchgeführt.

2.1 Analyse der Fachliteratur

In der aktuellen Fachliteratur befassen sich nur wenige Autoren mit der Konservierung und Restaurierung von Kaustobiolithen (vgl. Tabelle 1). Zu den neuesten Beiträgen gehören die Konservierungsberichte von zwei fossilen Baumstämmen, die je im Jahr 2003 (TIETZ) in *The Preparator* und im Jahr 1997 (HOFFMANN/ BLANCHETTE) in *Studies in Conservation* erschienen sind. Beide Baumstämme wurden in Deutschland in Braunkohleminen gefunden, im feuchten Zustand zwischengelagert und mit niedrigmolekularem Polyethylenglykol getränkt, in Anlehnung an Methoden der Nassholzkonservierung. Ein weiterer Beitrag in *The Preparator* von 2002 (BERNER/ TIETZ) berichtet über die Konservierung von bergfrischer Weichbraunkohle. Es sollte zur Veranschaulichung der Erdgeschichte ein Kohleschauprofil des Kohletagebaus Berzdorf hergestellt werden. Vor Ort wurde von einem Sedimentblock eine 20cm dicke Scheibe abgetrennt, diese in Teilstücke zersägt, welche ebenfalls mit den Methoden der Nassholzkonservierung behandelt wurden. Hier kam jedoch mittelmolekulares Polyethylenglykol zum Einsatz.

Bei den drei genannten Beiträgen handelt es sich um Berichte, wo Ausgangslage, Methoden und Ziele der Konservierung, im Sinne einer Arbeitsdokumentation, genau beschrieben sind. Die Resultate der Behandlungen werden in den drei Beispielen als gut eingeschätzt. Der Erfolg der beschriebenen Eingriffe liegt sicher unter anderem daran, dass in diesen geologischen und paläontologischen Beispielen zuerst Testreihen auf Materialproben, die dem Gegenstand entnommen wurden, durchgeführt werden konnten. Die Ergebnisse der Versuche waren also direkt auf das Objekt übertragbar, ein Privileg, das man bei archäologischen Schmuckstücken aus Kaustobiolithen nicht hat. Hilfreich schien auch die Voruntersuchung der Materialien mit naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden zu sein, lieferte sie doch Entscheidungsgrundlagen, um die wirksamsten Produkte mit objektiven Kriterien auszuwählen.

Die letzte erschienene Publikation zur Konservierung und Restaurierung von archäologischen, nicht geologischen, Kaustobiolithen ist bereits 10 Jahre alt. Es handelt sich um einen Bericht von 1995 (DAVIS/ HUNTER/ LIVINGSTONE) in *Studies in Conservation*, der die Bergung, Untersuchung, Konservierung und Ausstellung einer bronzezeitlichen Halskette aus Sapropelit- und Bleiperlen

beschreibt. Hier wurde für die Festigung der Sapropelitperlen Butvar B-98 verwendet, ein Polyvinylbutyralharz, das oft für die Konservierung von Fossilien gebraucht wird (HORIE, 1998, S. 101f). Leider wird nicht beschrieben, ob die Behandlung zu einem befriedigenden Resultat geführt hat. Ein früherer Beitrag von ODDY und LANE (1976) erläutert die Konservierung von Ölschiefer, einem Material, das im Gegensatz zu anderen Kaustobiolithen nur noch geringe Anteile an umgewandelter organischer Materie enthält und hauptsächlich mineralisch ist. Das Problem der Trocknung besteht aber auch hier, denn Ölschiefer spaltet in Lamellen, sobald man ihn ohne Behandlung trocknen lässt. ODDY und LANE probierten Festigungsmethoden auf nassen, archäologischen Ölschieferabfällen aus. Sie verwendeten hochmolekulare Polyethylenglykol, dessen Konzentration sie unter Wärmezufuhr bis auf 100% ansteigen liessen. Die Methode wurde erfolgreich auf römischen Kimmeridge (vgl. 4.2.3) Ölschieferobjekten angewendet. Auch auf mehrere Jahre hinaus blieben die behandelten Gegenstände stabil, ausser wenn die Entfeuchtung nicht vollständig verlaufen war. In diesem Fall konnte es nachträglich zu Verzug kommen. Um frühere Publikationen als ODDY und LANE zur Konservierung von Kaustobiolithobjekten zu finden, müssen Quellen berücksichtigt werden, die heute bereits als historisch gelten. Solche Quellen geben nur sehr ungenaue Hinweise für die Behandlung von Kaustobiolithen. RATHGEN (1924, S. 149) empfiehlt die Imprägnierung von Ringen aus Pechkohle mit einer Leimlösung, PLENDERLEITH (1956, S. 156) verweist auf die Behandlung von Knochen und Elfenbein als vergleichbares Vorgehen für Gagat und Bernstein.

Standartwerke der Konservierung und Restaurierung archäologischer Objekte erwähnen Kaustobiolithe nur am Rande (CRONYN, 1990, S. 293-295) (CHAVIGNIER, 1990, S. 69-71), oder gar nicht¹. Als mögliche Behandlung nennt CRONYN (1990, S. 295) die Imprägnierung mit hochmolekularem Polyethylenglykol. Jedoch wird das Aufbewahren in Wasser oder bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit direkt ab Grabung bevorzugt. CHAVIGNIER (1990, S. 71) rät zu Zurückhaltung bei der Verwendung von Kunstharzen und Lösungsmitteln, da das Verhalten der Kaustobiolithe mit diesen Materialien schlecht bekannt ist. Beide Autorinnen geben keine Gründe an, weshalb Kaustobiolithe bei ihrer Trocknung zerfallen oder welche Faktoren zum Zerfall führen. Sie beschränken sich auf den Beschrieb des Phänomens. Aus den Texten geht auch hervor, wie viele Unklarheiten bezüglich der Begriffe und des Materialaufbaus von Kaustobiolithen bestehen.

Zur Degradierung von Kaustobiolithen findet man gewisse Angaben in Publikationen zur Konservierung und Restaurierung von Fossilien. HOWIE (1995, S. 47-52; 1978, 13-19) und RIXON (1976) weisen auf das Problem der Oxydation von Pyrit und die daraus folgende Sprengung der Objekte hin, ein Phänomen, das aus Fossiliensammlungen gut bekannt ist. Tatsächlich enthalten Kaustobiolithe auf Grund ihrer Bildung unter anoxischen Bedingungen oft Pyrit, genau wie viele Fossilien. Tonminerale, ein weiterer Bestandteil von Kaustobiolithen, sind ebenfalls problematisch, denn diese sind sehr hygroskopisch und können bei erhöhter Luftfeuchtigkeit quellen. (HOWIE, 1978)

¹ Zum Beispiel Kühn, Hermann (1981): *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken und Antiquitäten*. München: Keyserische Verlagsbuchhandlung GmbH und Herold, Karl (1994): *Konservierung von archäologischen Bodenfunden*. Wien, Köln, Weimar: Böhlau Verlag GmbH

Zusammenfassend kann man aus der spärlichen aktuellen wie älteren Fachliteratur entnehmen, dass die Konservierung und Restaurierung von Kaustobiolithen ein ungelöstes Problem ist. Konservierungsmethoden wurden lediglich im Zusammenhang mit Fallbeispielen publiziert, und sind deshalb nur auf das jeweilige Objekt zu beziehen. Es scheint keine grundlegenden Studien zu geben, wie in der Konservierung mit archäologischen, aber auch geologischen Kaustobiolithen zu verfahren ist. Die verwendeten Konservierungsmethoden stammen aus den Erfahrungen mit der Nassholzkonservierung oder der Behandlung von Fossilien.

Der Zerfall von Kaustobiolithen im Zusammenhang mit dessen Trocknung ist zwar bekannt, jedoch werden in keinem Artikel oder Fachbuch klare Gründe für diesen Prozess angegeben. Zuweilen werden Vermutungen angestellt. CHAVIGNIER (1990) zum Beispiel glaubt, dass die Zerbrechlichkeit von Kaustobiolithen im Zusammenhang mit dem Hydratisierungsgrad und der Art der geologischen Entstehung des Materials steht. Faktoren wie Pyritzerfall und das Quellen von Tonmineralien sind mehreren Autoren bekannt, die Oxydation von Pyrit dürfte aber nicht für das Spalten durch die Trocknung verantwortlich sein, sondern spielt erst bei der Konservierung auf lange Zeit eine Rolle. (vgl. 6.2.3 und 6.3.1)

Beim Lesen der Fachliteratur stellt man ausserdem eine Reihe von Schwierigkeiten fest, die der Entwicklung von Konservierungsmethoden im Wege stehen. Einerseits können auf den wertvollen archäologischen Schmuckstücken keine zerstörerischen Festigungsversuche gemacht werden. Tests auf geologischem Material sind schlecht auf degradierte archäologische Kaustobiolithe übertragbar. Andererseits gibt es eine grosse Anzahl an Rohstoffen, die für die Schmuckherstellung verwendet wurden. Alle diese Rohstoffe haben eine eigene, sehr komplexe Entstehungsgeschichte und eine eigene Zusammensetzung, die auch noch innerhalb desselben Materialtyps variieren kann. Das Auseinanderhalten und korrekte Benennen dieser Rohstoffe scheint eine weitere grosse Schwierigkeit darzustellen (MULLER, 1987, S.3; DAVIS, 1990, S. 1), ist aber für die Konservierung sehr wichtig, da sich jeder Rohstoff möglicherweise bei der Trocknung unterschiedlich verhält und deshalb anders behandelt werden muss. Artikel und Dissertationen der letzten 15 Jahre über Kaustobiolithschmuck beschäftigen sich denn auch hauptsächlich mit dem, wenn möglich zerstörungsfreien, Bestimmen des Rohmaterials.

Kohlepetrografen als Materialspezialisten von Kaustobiolithen mussten hinzugezogen werden. Die Kohlepetrografie ist ein Spezialgebiet der Geologie und hat sich anfangs 20. Jh. entwickelt, weil Kaustobiolithe als Energieträger wirtschaftlich ausgebeutet werden konnten. Es entwickelte sich eine genormte Methodologie und Terminologie, um Kaustobiolithe systematisch beschreiben zu können. Gagat ist aus kohlepetrografischer Sicht aber noch wenig erforscht, da es sich um ein wirtschaftlich unwichtiges Material handelt. Eine differenziertere Nomenklatur zur systematischen Beschreibung müsste erst gefunden werden (LIGOUIS, Pers. Komm. 04.2005)

Aus der Kohlepetrografie gibt es eine riesige Anzahl an Publikationen, jedoch widmen sich nur einzelne Beiträge der Verwendung von Kaustobiolithen zur Schmuckherstellung. TEICHMÜLLER (1992) hat die Archäologie als neues Anwendungsgebiet für die Kohlepetrografie entdeckt, in der Folge auch LIGOUIS (2000; im Druck). Von der Seite der Archäologie kann ROCHNA (1961; 1962; 1984) genannt

werden, der sich speziell für materialtechnische Aspekte der Kaustobiolithe interessierte, wie neueren Datums auch PREUSCHOFT-GÜTTLER (1995).

Die Materialcharakterisierung ist für verschiedene Forschende von Nutzen. Aus archäologischer Sicht ist die genaue Bestimmung des Rohmaterials und dessen geografische Herkunft von Interesse. Daraus können zum Beispiel Rückschlüsse auf den ur- und frühgeschichtlichen Handel gemacht werden. (TEICHMÜLLER, 1992, S.1; SMITH, 2005, S.49; DAVIS, 1990, S. 1) Deshalb wurde man auch in der Archäometrie auf die Kaustobiolithe aufmerksam und versuchte mit verschiedenen Analysemethoden Rohmaterialien zu bestimmen und sie ihrem Herkunftsort zuzuweisen (WATTS/ POLLARD/ WOLFF, 1998; SALES et al., 1987; POLLARD/ BUSSEL/ BAIRD, 1881; HUNTER et al., 1993; DAVIS, 1990/ 1993a/ 1993b; LAMBERT/ FRYE/ JURKIEWICZ, 1992).

Alle Bemühungen zur Identifizierung und Charakterisierung von Kaustobiolithen sind eine wichtige Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Konservierungsmethoden. Nur leider stellt fast keine dieser Studien einen Zusammenhang zwischen dem Erhaltungszustand der Objekte mit den Analyseergebnissen her (DAVIS, 1993a, S.11). Der Zusammenhang zwischen Materialzusammensetzung und dem Zerfall wurde also noch nicht hergestellt.

Wie eben aufgezeigt, ist die Literatur zu Konservierung und Restaurierung, Materialaufbau und Degradierung von Kaustobiolithen spärlich. Damit als Ausgangslage für diese Arbeit doch noch mehr Informationen eingeholt werden konnten, wurde eine Umfrage an Museen, archäologische Dienste und Konservierungslaboratorien verschickt. Sie lehnt sich eng an die in 1.2 festgehaltenen Fragestellungen.

Autor und Jahr	Verfahren	Gegenstand und Material
Tietz 2003	Tränkung in PEG 200, 25%, Raumtemperatur	Fossiler Baumstamm (vermutlich Xylith)
Berner/ Tietz 2002	Tränkung in PEG 2000, 50%, 60°C, Vakuum	Kohleschauprofil aus Weichbraunkohle
Hoffmann/ Blanchette 1997	Tränkung in PEG 300, 25%, Raumtemperatur, Biozid	Fossiler Baumstamm (vermutlich Xylith)
Davis/ Hunter/ Livingstone 1995	Tränkung in Butvar B-98, 5%, in 80% Ethanol und 20% Xylol	Kette mit Scheibenperlen aus Kämmelkohle
Oddy/ Lane 1976	Tränkung mit PEG 4000 oder 6000, 10%, 60°C, Steigerung der Konzentration auf 100%	Schnitzabfälle aus Kimmeridge Ölschiefer

Tabelle 1: Artikel zur Konservierung von Kaustobiolithen

2.2 Umfrage

2.2.1 Ziel der Umfrage

Ergänzend zu den Publikationen in der Fachliteratur der Konservierung Restaurierung sollten weitere Informationen darüber erhalten werden, welche konservatorischen Behandlungen in der Schweiz und im Ausland auf archäologischen Gegenständen aus Kaustobiolithen angewendet wurden, und mit welchem Erfolg.

In der Fachliteratur wurde offenbar nur publiziert, falls ein aussergewöhnlicher Fund einen grösseren Aufwand bei der Behandlung und Dokumentation rechtfertigte. Hier sollen aber auch Erfahrungen, die auf weniger spektakulären Gegenständen wie zum Beispiel Objektfragmenten gesammelt wurden, erfasst werden.

Angeschrieben wurden Museen, archäologische Dienste und private Konservatoren und Restauratoren der Schweiz und Frankreich. Der Kontakt erfolgte über die entsprechenden Berufsverbände (vgl. Anhang) per E-mail.

2.2.2 Konzeption

Im Fragebogen (vgl. Anhang), der direkt auf dem Computer oder auch auf Papier ausgefüllt werden konnte, wurden im Kopfteil die Institutionen und die Personen erfasst, die an der Umfrage teilnahmen. Die erste Frage diente dazu, einen Überblick zu erhalten, wie viele Objekte aus Kaustobiolithen in den jeweiligen Sammlungen vorhanden sind, welches Alter sie haben und aus welchem Rohmaterial sie bestehen. In der Folge musste die Institution den Erhaltungszustand der Objekte einschätzen und konnte Vermutungen anstellen, ob der Zustand einen Zusammenhang mit dem Rohmaterial, der Bodenlagerung oder anderen Faktoren aufweist. Anschliessend standen die konservatorischen Massnahmen im Vordergrund. Es wurde gezielt nach verwendeten Methoden und Produkten gefragt und auch der Erfolg der Behandlung sollte von der Institution eingeschätzt werden.

2.2.3 Auswertung

Es sind 10 ausgefüllte Fragebogen zurückgeschickt worden. Weitere Institutionen haben geantwortet, dass sich keine solchen Objekte in ihrer Sammlung befinden.

Aus den Antworten (vgl. Anhang) des ersten Teils des Fragebogens geht hervor, dass Kaustobiolithe in den Sammlungen der Institutionen nur einen geringen Anteil ausmachen. Die Anzahl beträgt jeweils zwischen 10 und 100 Objekte. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Schmuckstücke, die jüngsten davon wurden in der Antike hergestellt. Keine der Institutionen besitzt also historische Schmuckstücke, sondern alle sind archäologisch. Grösstenteils sind die Objekte steinzeitlich, jedoch stammen einige auch aus der Eisenzeit, der Bronzezeit und, wie bereits erwähnt, aus der römischen Antike.

Das verwendete Rohmaterial der Gegenstände wurde vor allem als Lignit bezeichnet oder als nicht bestimmt angegeben. Es muss aber festgehalten werden, dass nur zwei Institutionen ihre Bestände an Kaustobiolithen haben analysieren lassen. Da es auch für ein geübtes Auge fast unmöglich ist, einen Kaustobiolithen rein visuell zu bestimmen (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005), muss dieses Resultat mit Vorsicht genossen werden. Es fällt auf, dass gerade französisch sprechende Institutionen ihre Objekte besonders oft als Lignit bezeichnen. Möglicherweise wird der Begriff Lignit in der französischen Sprache als allgemeiner Oberbegriff im Sinn wie Kaustobiolith verstanden. Wenn man nur die analysierten Objekte in Betracht zieht, sieht das Verhältnis der verwendeten Rohmaterialien entsprechend anders aus. Es überwiegt der Anteil an Objekten aus Gagat, der drei Viertel der Gesamtzahl ausmacht, darauf folgen Objekte aus Sapropelit. Lignit als Rohmaterial steht erst an dritter Stelle.

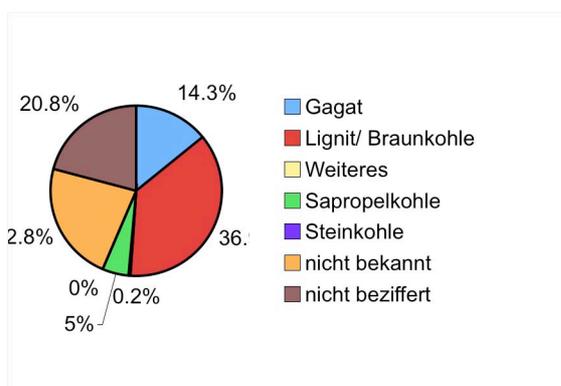


Bild 3: Verwendete Rohmaterialien, alle Angaben (100% entspricht 482 Objekten)

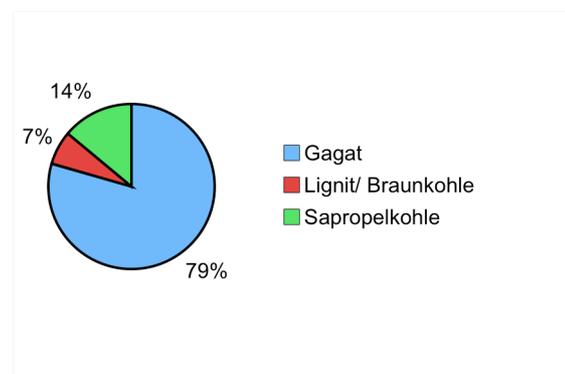


Bild 4: Verwendete Rohmaterialien, nur analysierte Objekte (100% entspricht 58 Objekten)

Der Zustand der Objekte wurde allgemein als fragil bis gut konserviert eingeschätzt. Es handelt sich in den meisten Fällen um Grabungsfunde, nicht um Nassfunde. Die Institutionen vermuteten, dass der Erhaltungszustand der Objekte vor allem mit deren Rohmaterial im Zusammenhang steht, jedoch auch mit den Bodeneigenschaften. Es wurden zwei konkrete Beobachtungen gemacht. Eine Institution hat festgestellt, dass im selben Bodenmilieu Objekte mit unterschiedlich guter Erhaltung entdeckt wurden. In einer anderen Sammlung waren die besonders stark zerbröckelten Objekte aus Sapropelit gefertigt.

Die Fragen zu den angewendeten Konservierungsmethoden wurden leider wenig beantwortet. Gründe dafür sind, dass es sich bei den Beständen in den Museen oft um Altfunde handelt und die Behandlungen deshalb nicht bekannt sind. Anscheinend wurde jedoch in den meisten Institutionen Rücksicht auf die Zerbrechlichkeit der Objekte genommen, denn sie werden grösstenteils in klimatisierten Räumen oder Vitrinen aufbewahrt. Es ist gut vorstellbar, dass in vielen Institutionen Schmuck aus Kaustobiolithen ausgestellt wird, da es sich um recht seltene Gegenstände handelt. Als angewendete Konservierungsmethoden, wurden Reinigung, Tränkung, Klebung und kontrollierte Trocknung genannt (vgl. Tabelle 2). Die kontrollierte Trocknung fand direkt ab Grabung in einem

verschlossenen Gefäss statt. Die Dauer dieser Behandlung konnte zwischen 4 Wochen und mehreren Monaten variieren. Tränkungen wurden auf grabungsfeuchten Objekten mit Polyethylenglykol oder der Acrylemulsion Primal vorgenommen, auf bereits trockenen Gegenständen mit dem Acrylharz Paraloid B72. Die Resultate der erwähnten Behandlungen wurden als befriedigend eingeschätzt, ebenfalls die Stabilität auf längere Zeit. Eine Institution erwähnte, dass Gegenstände, die über 2cm dick sind, sich eher spalten als dünnere, also schwieriger zu konservieren sind.

Autor und Jahr	Verfahren	Gegenstand und Material
Materia Viva, Atelier in Toulouse	Tränkung mit Primal AC 33 und WS 24	Schmuckstücke aus Gagat und Lignit (visuell bestimmt)
Barry Knight, Konservator-Restaurator	Tränkung in PEG 4000, 10%, bei 60°C	Römische Armingfragmente aus Kimmeridge Ölschiefer
Lucie Voracek, Musée de Normandie, Caen	Kontrollierte Trocknung, Festigung im trockenen Zustand mit Paraloid B 72 in Azeton	Schmuckstücke aus Lignit (visuell bestimmt)
Kantonsarchäologie Aargau	Wurde nach der Grabung nicht feucht verpackt. Festigung mit Kanadabalsam im fast trockenen Zustand.	Römischer Arming aus Gagat (visuell bestimmt)

Tabelle 2: In der Umfrage erwähnte Konservierungsverfahren

3 Kaustobiolithe in der Geschichte

Gewisse Kaustobiolithe wurden seit der Steinzeit bis heute zu Schmuck und Gebrauchsgegenständen verarbeitet. In dieser langen Nutzungsphase erlebte das Material grosse Schwankungen in der Beliebtheit, was in diesem Kapitel dargestellt wird. In Bezug auf die Fragestellung (vgl. 1.2) fällt das Augenmerk auch auf die Herstellungstechniken der verschiedenen Epochen. Da der Beliebtheitsgrad des Materials stark mit ihm zugeschriebenen magischen Eigenschaften in Zusammenhang steht, werden auch diese kurz erläutert. Nebst der Verarbeitung zu Schmuck spielen Kaustobiolithe in der Geschichte auch eine Rolle als Energieträger. Dies wird aber hier nicht beschrieben.

3.1 Archäologie

3.1.1 Steinzeit

Die älteste Nutzung von Kaustobiolithen als Rohstoff für Schmuckstücke und Gegenstände scheint mit Funden des Jungpaläolithikums aus der Schweiz und aus dem Süden Deutschlands belegt zu sein. Es sind insgesamt 21 Fundstellen bekannt, 6 davon liegen in der Schweiz. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 1, 7) Die Funde sind hauptsächlich magdalénienzeitlich (15000 bis 11500), ältere jung- oder spätpaläolithische Gegenstände treten höchstens vereinzelt auf. Es handelt sich um wenige Zentimeter grosse plastische Gegenstände oder um gravierte Plättchen, sowie Halbfabrikate, Abfall- und Rohstoffe. Zu den plastischen Objekten gehören stilisierte Frauenfiguren, wie sie von Petersfels, Schweizersbild und Neuchâtel-Monruz bekannt sind (HÖNEISEN/ PEYER, 1994, S.119ff) (EGLOFF, 1995), Darstellungen von Insekten, verschiedene Perlen, Rondellen und Anhänger (vgl. Bild 5 und Bild 6) (BULLINGER, im Druck, S. 158ff). Die Gravuren zeigen Darstellungen von Tieren oder ornamentale Zeichen.

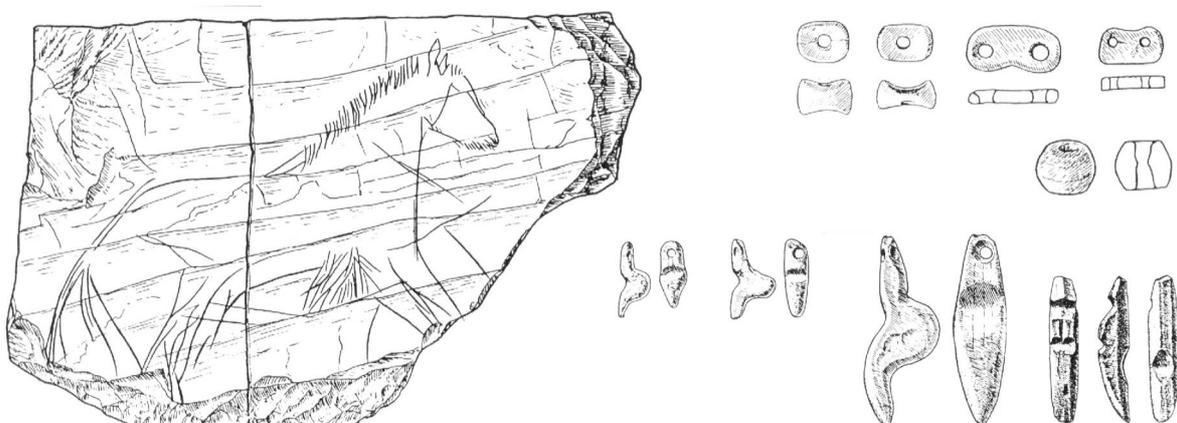


Bild 5: Wildpferdgravierung, Gynäkomorphe Anhänger, Perlen und doppelt durchbohrte Anhänger vom Petersfels (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 3f)



Bild 6: Steinzeitliches Amulett in der Form der Larve der Dasselfliege aus Gagat, gefunden in Deutschland (MULLER, 1987, S. 94)

Die Gravuren zeigen Darstellungen von Tieren oder ornamentale Zeichen. Es fällt auf, dass die Fundstätten in der Nähe heute bekannter Gagatvorkommen liegen. (ERIKSEN, 1991, S.182) Möglicherweise gab es zur Zeit des Magdalénien sogar noch mehr zugängliche Gagatvorkommen als heute, da der Bewuchs damals sehr gering war. Auch in Frankreich, Spanien und England existieren Gagatvorkommen, dennoch sind aus diesen Gebieten nur sehr wenige vergleichbare archäologische Funde bekannt. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 1, 7ff)

Im Mesolithikum und Neolithikum sind Gagatfunde insgesamt selten. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 22) In Couriac, Departement de l'Aveyron, Frankreich wurde eine Halskette mit Gagat- und Kalksteinperlen in einer neolithischen Bestattung gefunden. (MULLER, 1987, S. 112)

3.1.2 Bronzezeit

Ab der Bronzezeit sind vor allem in England Gegenstände aus Kaustobiolithen weit verbreitet. Die grösste Anzahl solcher Funde sind Grabbeigaben aus den Hügelgräbern der *beaker* und der *food vessel* Kulturen von Schottland, Yorkshire and Derbyshire. Es handelt sich vor allem um Schmuckstücke wie Ohringe, Anhänger, Gurtspangen, Knöpfe, einzelne Perlen und kunstvoll gearbeitete Halsketten. Eine typische solche Halskette der *food vessel* Kultur wurde in Poltalloch in Schottland gefunden. Die pointillierten Abstandshalterplatten² dienen dazu, die Anzahl der Perlenstränge zu erhöhen, zum Beispiel von 4 auf 8. Sie sind sehr typisch für diese Zeit und wurden auch in Materialien wie Bernstein ausgeführt (vgl. Bild 7). Die Verzierungen orientieren sich an der zeitgenössischen Keramik. Knöpfe waren zu dieser Zeit in der Regel konisch. Die Löcher sind von der Unterseite her gebohrt und treffen sich in einer V-Form. Als Rohmaterial wurde Gagat aus Whitby, in Yorkshire, der wohl wichtigsten Quelle Europas, verwendet, und jeweils lokale Sapropelitvorkommen genutzt. (MULLER, 1987, S. 17ff; ALLASON-JONES, im Druck, S. 11; DAVIS/ SHERIDAN, 1996, S. 18f) In der Schweiz sind erst in der Spätbronzezeit wieder Kaustobiolithfunde bekannt, jedoch in geringer Anzahl. (HOCHULI/ NIFFELER/ RYCHNER, 1999)

² Im Originaltext: spacer plates



Bild 7: Bronzezeitliche Halskette aus Gagat mit Abstandhalterplatten, gefunden in Mount Stuart, Isle of Bute (DAVIS/ SHERIDAN, 1996, S. 18)

3.1.3 Eisenzeit

Kaustobiolithschmuck kommt in der Hallstatt- und Latènezeit in England und dem Festland recht häufig vor, fehlt aber südlich der Alpen gänzlich. (MÜLLER/ KAENEL/ LÜSCHER, 1999, S. 200) Die Objekte sind verschiedenartiger. Man findet Armringe und Armbänder, die voll, abgeflacht oder gerippt sind, und im Durchmesser eine dreieckige oder hexagonale Form zeigen. Perlen sind in grosser Anzahl vorhanden, manchmal wurden bis zu 200 Stück für eine Halskette verwendet. Ketten wurden auch als Gurte, Armbänder oder Fussbänder getragen. Oft findet man Kaustobiolithe kombiniert mit Bronzespiralen, Bernstein, Glas- oder Keramikperlen, ja sogar Menschenzähnen. (MULLER, 1987, S. 95) Breite Armbänder waren besonders während der Hallstattzeit³ sehr beliebt, während der Latènezeit werden diese schmaler (vgl. Bild 8) (DUNNING-THERSTEIN, 2005). Sie scheinen vor allem aus Sapropelit hergestellt zu sein. (MÜLLER/ KAENEL/ LÜSCHER, 1999, S. 200) Das Zentrum des hallstattlichen Kaustobiolithschmucks liegt auf dem Festland zwischen Stuttgart und dem Bodensee, während der Latènezeit situiert es sich eher bei Prag. (vgl. Bild 9 und Bild 10)(ROCHNA, 1962, S.67; 1961, S.330) In England wird in der Eisenzeit kaum mehr Gagat verarbeitet. Anstelle davon wird Ölschiefer von Kimmeridge verwendet oder lokale Kännelkohlevorkommen. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 12)

³ Ende Ha C bis Ende Ha D1



Bild 8: Armringe der Hallstattzeit (links) und Latènezeit (rechts) (MÜLLER/ KAENEL/ LÜSCHER, 1999, S. 201)

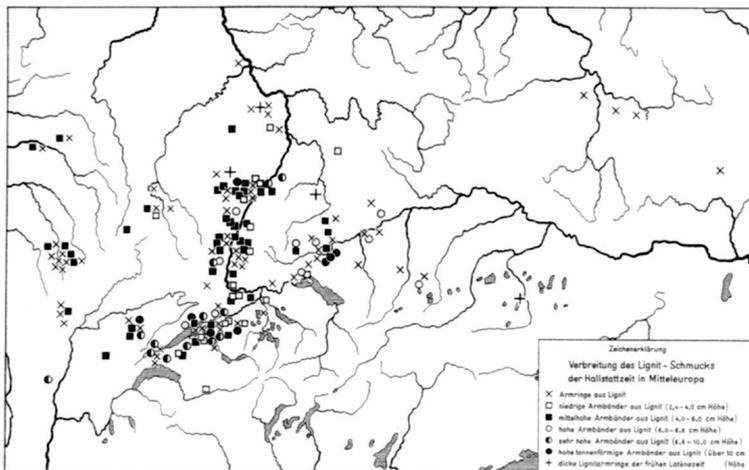


Bild 9: Verbreitung von Xylithringen in der Hallstattzeit (ROCHNA, 1962, S. 47)

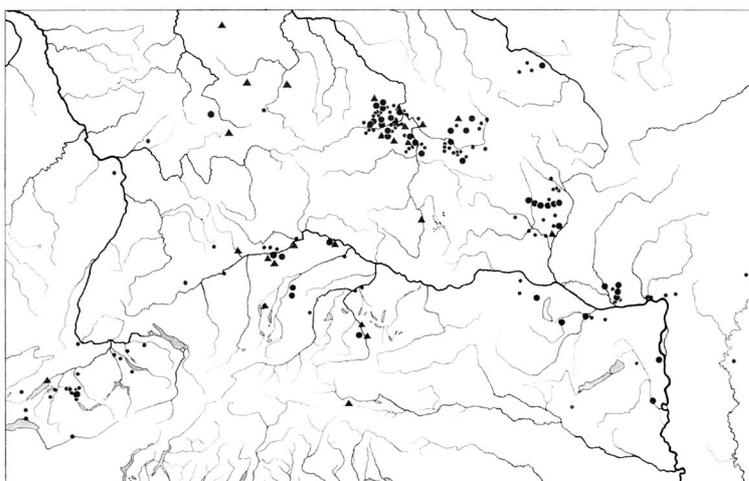


Bild 10: Verbreitung der Sappelitringe in der Latènezeit. (Punkte: Grab oder Gäberfeld mit mit einem/ mehreren Ringen. Dreieck: Siedlungsfunde.) (ROCHNA, 1961, S. 331)

3.1.4 Antike

Plinius der Ältere erwähnt Gagat in seinem Buch *historia naturalis*: ‚Gagat ist schwarz, glatt, leicht und porös, vermittelt einen unangenehmen Geruch, wenn er gerieben wird, riecht nach Schwefel, wenn er verbrannt wird.‘ Plinius erwähnt auch, dass die Römer Gagat von Lykien beziehen, der heutigen Türkei. Möglicherweise war dieses Rohmaterial aber von schlechter Qualität, denn während dem 3. und 4. Jh. n. Chr. wurde Gagat umfassend von Whitby genutzt. Gagat und andere Kaustobiolitharten waren besonders populär für die Verarbeitung zu Amuletten und Glücksbringern. Typische römische Anhänger zeigen den Kopf der Medusa (vgl. Bild 12) oder sind zweiseitig und zeigen auf der einen Seite das Profil einer Frau und eines Mannes und auf der Rückseite verschränkte Hände (vgl. Bild 11). Es wurden auch Halsketten, Armbänder, Ringe, Haarnadeln, Spiegelgriffe, Messerschäfte und Götterfigürchen, sogar Tischbeine und Möbelintarsien aus Kaustobiolithen hergestellt. Die Armbänder werden entweder in einem Stück angefertigt und mit Kerben und Rinnen verziert, oder sie sind segmentiert, das heisst aus aneinander anschliessenden dünnen Scheiben bestehend.



Bild 11: Römische Halskette mit Medaillon, gefunden in Deutschland (MULLER, 1987, S. 96)



Bild 12: Römische Gagatanhänger mit dem Kopf der Medusa (MULLER, 1987, S. 96)

In York, das 71 n. Chr. gegründet wurde, vermutet man die Hauptstadt der Gagatindustrie, von wo aus die fertigen Schmuckstücke in das ganze Empirium versendet wurden (LAWSON, 1975, S. 242). Man fand in York auch eine Werkstatt, wo sich Hinweise auf die Bearbeitung von Gagat befinden. (MULLER, 1987, S. 21ff, 95ff; ALLASON-JONES, im Druck, S. 11ff) Römische Funde in Deutschland scheinen in dieser Zeit nicht mehr aus den lokalen Vorkommen, sondern aus Whitbygagat hergestellt zu sein. (WERT/ WELLER, 1993, S. 320)

3.2 Kunstgeschichte

3.2.1 Mittelalter bis 19. Jahrhundert

In Schottland und Skandinavien wurden Gagatschmuck, Würfel und Schachfiguren der Wikinger gefunden. In der Zeit nach der Wikinger Ära bis ins 19. Jh. wird dann fast ausschliesslich Kirchenschmuck hergestellt (vgl. Bild 13 und Bild 14). Ab dem Hochmittelalter sind auch vermehrt schriftliche Quellen zu Kaustobiolithbearbeitung und –handel vorhanden. Darunter kennt man schriftliche Bestellungen von Gagatschmuck, Verzeichnisse zur Vererbung von Gagatminen und es werden Namen von Gagatarbeitern genannt, die in England *jeaters* und in Deutschland *Augsteindreher* heissen. Schwäbisch Gmünd war in Deutschland das Zentrum des Handels mit Gagatschmuck. (WERT/ WELLER, 1993, S. 320) Die Industrie war in Zünften organisiert und erreichte ihre Blütezeit im 16. Jh.. Die Augsteindreher stellten Rosenkränze, Kreuze, Anhänger und Knöpfe her, die nach Italien, Spanien, Portugal und Frankreich exportiert wurden. In Spanien entwickelte sich eine Gagatindustrie rund um die Pilgerstadt Santiago de Compostela⁴. Als Zertifikat für die erfüllte Pilgerzeit brachte man aus Gagat geschnitzte Jakobsmuscheln nach Hause. Neben den Muscheln wurden auch Kruzifixe, Pietas, Rosenkränze, Ringe und Kreuze hergestellt, am populärsten waren aber Darstellungen des heiligen Jakobus (vgl. Bild 16). Wie in Deutschland waren auch die spanischen Gagatarbeiter in Zünften organisiert. Im 17. Jh. nahm die Anzahl der Pilgerer ab. Um die Gagatherstellung dennoch aufrecht zu erhalten, wurden nun profane Schmuckstücke hergestellt, allen voran Higas (vgl. Bild 15). Die Higa ist ein beschützendes Abzeichen, das eine geschlossene Hand zeigt, wo der Daumen zwischen Zeigefinger und Mittelfinger hervorschaut. Dieses Symbol war schon im alten Ägypten bekannt und wurde durch die Araber nach Spanien gebracht. (TRUSTED, 1996, S. 142ff) In Frankreich war eine Gagatindustrie im 18. Jahrhundert in Sainte Colombe und Labastide-sur-l'Hers im Gange. Es wurden vor allem Rosenkränze hergestellt. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 16f)

⁴ Zur Verehrung der Reliquien des heiligen Jakobus' des Älteren, Apostel und Bruder des Evangelisten Johannes. Durch eine päpstliche Bulle von 1181 wurde den Pilgern der Erlass ihrer Sünden garantiert.



Bild 13: Mittelalterliches Gagatkreuz mit Silber, Deutschland 16. Jh. (MULLER, 1987, S. 99)



Bild 14: Rosenkranz aus Schwäbisch Gmünd mit Silberfiligran und Gagatperlen (MULLER, 1987, S. 98)



Bild 15: Higas aus Gagat, mit geschnitztem Kreuz (MULLER, 1987, S. 107)



Bild 16: Der Heilige Jakobus aus Gagat, 16. Jh. (MULLER, 1987, S. 105)

3.2.2 19. Jahrhundert

Die Verarbeitung von Gagat ist im 19. Jh. eng verbunden mit der Küstenstadt Whitby in Yorkshire England. Die erste Gagatwerkstatt wurde dort nach schriftlichen Quellen um 1808 eröffnet. Durch die Erschliessung Whitbys durch die Eisenbahn wurde die Küstenstadt zum beliebten Ferienziel für die Viktorianer⁵. Als Souvenir des Urlaubs brachte man lokale Produkte heim, was die Gagatindustrie aufblühen liess. (FELTON, 2004, S. 2) Der Höhepunkt der Gagatverarbeitung war aber durch seine Popularität als Trauerschmuck begründet. Als 1861 Prinz Albert, der Gemahl von Königin Viktoria verstarb, legte diese die Trauer bis zu ihrem Lebensende 1901 nicht mehr ab. Die Trauerbekleidung wurde somit zu einer Modeerscheinung. (FAILING, 1999, S. 7) Viktorianische Frauen befanden sich sowieso während dem grössten Teil ihres Lebens in Trauer, da es bei den grossen Familien des 19. Jahrhundert und der hohen Kindersterblichkeit fast immer jemanden zu betrauern gab und die vorgegebene Zeit der Trauer je nach Nähe zum Verstorbenen sehr lange dauern konnte. Viktorianische Schmuckstücke sind kunstvoll gearbeitete Broschen, Anhänger, Uhrenketten, Halsketten, Armbänder, Ohrringe, Knöpfe, usw. Für die Verzierungen der Schuckstücke wurden Naturmotive wie Weinblätter, Haselnüsse und Zweige gewählt, später vor allem Blumen und glücksbringende Symbole. Gagat wurde ab 1860 auch mit anderen Materialien wie Elfenbein und bemaltem Porzellan kombiniert. In Anhänger wurden oft Fotografien oder Haare eingearbeitet. (MULLER, 1987, S. 66ff; ALLASON-JONES, im Druck, S. 17f) Auffallend ist die Grösse der Schmuckstücke. Durch die Mode voluminöser Kleider musste auch der Schmuck massig sein, da er sonst unbedeutend wirkte.

Die Assoziierung von Gagat mit Trauer bewirkte vermutlich auch den raschen Untergang. Durch den Burenkrieg und die zwei Weltkriege wollten Briten alles vermeiden, was an Tod erinnerte, also auch Gagatschmuck. Die Änderung der Mode, die Schwierigkeit, qualitativ guten Gagat aufzutreiben und die Tatsache, dass viele billige Imitationen auf dem Markt zu finden waren, trugen ein Weiteres zum Abstieg des Gagatgewerbes bei. Zwischen 1870 und 1874 waren in Whitby über 1000 Personen in der Gagatindustrie tätig, 1884 waren es noch 300, 1921 noch 40 und nach dem 2. Weltkrieg noch 3 Personen. (MULLER, 1987, S. 66ff)

⁵ Englisches Bürgertum des 19. Jahrhunderts unter Königin Victoria (1837-1901)



Bild 17: Viktorianischer Gagatschmuck, sogenannte Tropfenkette (HALEY CLARKE, 2005)



Bild 18: Viktorianische Lady mit Gagatschmuck (HALEY CLARKE, 2005)

3.2.3 20. Jahrhundert bis heute

Seit Mitte der achtziger Jahre wird in Whitby wieder Gagatschmuck hergestellt, jedoch musste das Handwerk neu gelernt werden, da die drei letzten Schnitzer mit viktorianischer Tradition keine Nachfolger fanden und ihr Wissen und Können mit ins Grab nahmen. In Santiago de Compostela sind heute eine handvoll Gagatschnitzer tätig. Sie stellen nach traditioneller Art Pilgerfiguren her, die in der Qualität den besten Gagatarbeitern Whitbys des 19. Jahrhunderts in nichts nachsteht. (MULLER, 1987, S. 31ff) In der Zeitschrift *Gem and jewellery news* (2004, Vol. 13, No. 4, S. 83) wird die Schmuckdesignerin Jacqueline Cullen vorgestellt, die mit Whitby Gagat zeitgenössische Schmuckstücke herstellt. Ein im deutschen Fernsehen Sat 1 ausgestrahlter Beitrag preist Gagatschmuck als modisches Highlight der Wintersaison 2002/2003. (3SAT ONLINE, 2002). In Russland gab es um 1930 eine Torbanitindustrie⁶. Es wurden Schmuckstücke, Zierobjekte und elektrische Isolatoren hergestellt. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 2, 17f) Bei Neunkirchen in Deutschland lebten 1950 noch drei Kännelkohleschnitzer. (MÜLLER, 2003) Diese beiden Traditionen scheinen heute keine Nachfolge zu haben.

⁶ Ein anderes Wort für Bogheadkohle

3.3 Ethnologie

Amerikanische Indianer verwendeten Gagat für die Herstellung von Mosaiken und Intarsien. Pueblo Indianer kombinierten Gagat mit Türkis für ihre Schmuckstücke. Sie stellten Anhänger, Ringe und Amulette her, oft mit Einlegearbeiten aus Türkis im Gagat. Ein sehr beliebtes Motiv war der Frosch (vgl. Bild 20). Zuni Indianer stellten sehr farbige Schmuckstücke her und benützten Gagat und Türkis für Einlegearbeiten in Silber (vgl. Bild 19). (MULLER, 1987, S. 113f; WERT/ WELLER, 1993, S. 320) Kurden tragen zum Teil noch heute dicke Ringe aus einem lignitähnlichen Material am Ober- oder Unterarm als Eheringe. (ROCHNA, 1962, S.72)



Bild 19: Zuniindianer beim Bohren von Gagat (MULLER, 1987, S. 115)



Bild 20: Pueblofrosch aus Pechkohle mit Türkiseinlagen (FORSTNER-BILLAU, 2004)

3.4 Herstellungstechnik

Urgeschichtliche Herstellungstechniken und modernes Vorgehen enthalten im Wesentlichen die gleichen Arbeitsschritte. Sie unterscheiden sich nur in den verwendeten Mitteln. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 27)

Auf urgeschichtlichen Funden kann man verschiedene Bearbeitungsspuren sehen und daraus auf Bearbeitungstechniken schliessen. Für die verschiedenen Gegenstände wurde zuerst ein Rohling aus dem Gagatstück ausgeschnitten, vermutlich mit einem Silexmesser. Dann wurde das Stück auf einem Sandstein gerieben, bis es die gewünschte Form hatte. Das Loch konnte mit einem Silexwerkzeug gebohrt werden. Auf Rondellen und Plaquetten des Magdaléniens sieht man, dass die Löcher von beiden Seiten her gebohrt wurden, dies noch vor der Bearbeitung der Ränder. Die zeitgenössischen stilisierten Frauenfiguren wurden mit einer Silexklinge geschabt oder auf Sandstein gerieben. (MAUSER, 1970, S. 76) Für die Politur von bronzzeitlichen Perlen wurde Gagatpulver mit Fett vermischt, auf ein Stück Leder aufgetragen und auf dem Objekt gerieben. (MULLER, 1987, S. 20f) Indianer bearbeiteten Gagat auf ähnliche Art wie während urgeschichtlichen Zeiten. (MULLER, 1987, S. 114; ALLASON-JONES, im Druck, S. 4)

Auch während der Eisenzeit wurde das Rohmaterial zuerst gespalten, zugesägt oder zugeschnitten. Das Rohstück wurde dann von Hand geschnitzt, geschliffen, gebohrt und poliert. Allerdings stand dem eisenzeitlichen Handwerker auch die Drehbank zur Verfügung. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 4; MÜLLER/ KAENEL/ LÜSCHER, 1999, S. 200; SCHOCH/ RUCKSTUHL, 2004, S. 315) Man kennt die Herstellung von Armringen auf der Drehbank sehr gut von Silchester, wo in erster Linie Ölschiefer von Kimmeridge verarbeitet wurde. Ein Stück Rohmaterial wurde zu einer ungefähr zwei Zentimeter dicken Scheibe vorgeschritten. In der Mitte der Scheibe wurde von beiden Seiten her ein Loch gebohrt, damit das Stück in die Drehbank eingespannt werden konnte. Zuerst wurde die Aussenseite der Scheibe abgerundet und geglättet, dann wurde von beiden Seiten her eine V-artige Kerbe eingeschnitten, bis der Armring sich von der Scheibe löste. Zurück blieb ein Kernstück, das als Abfall weggeworfen wurde. Zum Schneiden des Ölschiefers auf der Drehbank wurde ein speziell geformtes Silexwerkzeug verwendet (vgl. Bild 21). (LAWSON, 1975, S. 242) (DAVIES, 1936, S. 200ff) Ölschiefer wurde mit Bienenwachs poliert, um denselben Glanz wie Gagat zu erzeugen. Das Wachs wurde sogar noch schwarz eingefärbt. (LAWSON, 1975, S. 242; ALLASON-JONES, im Druck, S. 4) Die Römer arbeiteten wie die eisenzeitlichen Vorgänger auf der Drehbank. (MULLER, 1987, S. 22f)

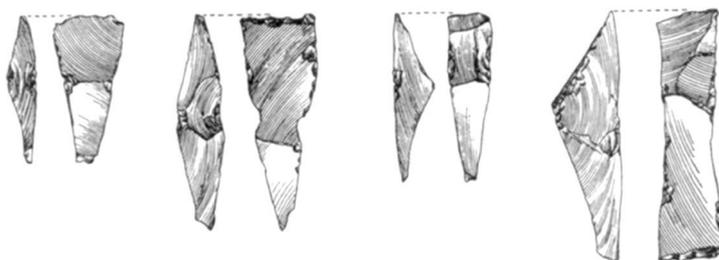


Bild 21: Spezielles Silexwerkzeug für die Bearbeitung auf der Drehbank (DAVIES, 1936, S. 207)

Die moderne Verarbeitung (vgl. Bild 22) von Gagat wird für Whitby und Santiago de Compostela ähnlich beschrieben. Als erstes wurde die Haut aus Ölschiefer (vgl. 4.2.4) mit einem schweren Stechbeutel entfernt, dann der Rohgagat auf die passende Form und Grösse zugeschlagen, gebrochen oder gesägt. Ecken und Kanten wurden auf einer Drehscheibe entfernt, wofür der Gagat benetzt und in Wasser gekühlt wurde. Das Stück wurde dann von Hand geschnitzt, graviert, eingelegt, gebohrt usw. (vgl. Bild 24) Es wurde anschliessend auf einem Bleirad mit feinem abrasivem Flussschlamm fein geschliffen (vgl. Bild 23). Die Politur erfolgte mit verschiedenen Bürsten aus Wolle oder Haar, unter Zusatz von Öl und sogenanntem Juwelierrot. Gegenstände wie Perlen wurden auf Drehbank geformt. (MULLER, 1987, S. 54ff, 111; PREUSCHOFT- GÜTTLER, 1995, S. 27; ALLASON-JONES, im Druck, S. 4)

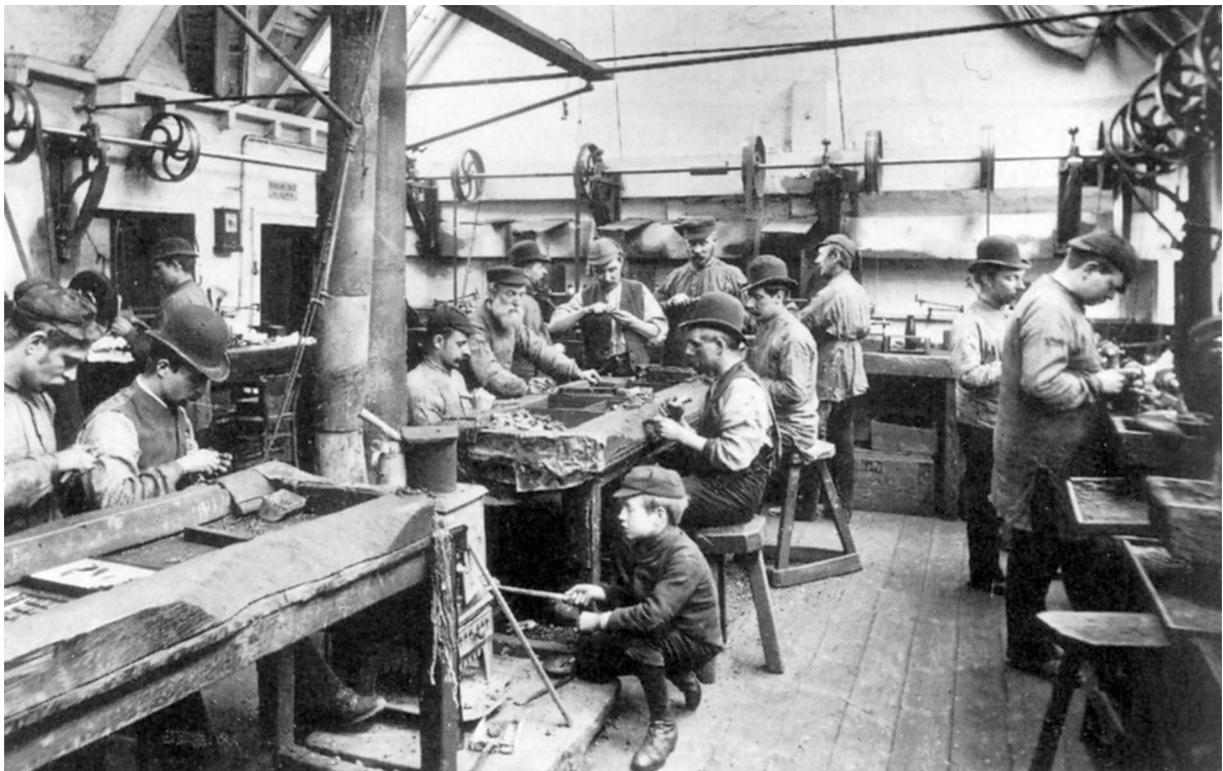


Bild 22: Gagatwerkstatt von William Wright in Whitby 1890 (MULLER, 1987, S. 42)



Bild 23: J. W. Barker arbeitet am bleiernen Schleifrad
(MULLER, 1987, S. 57)

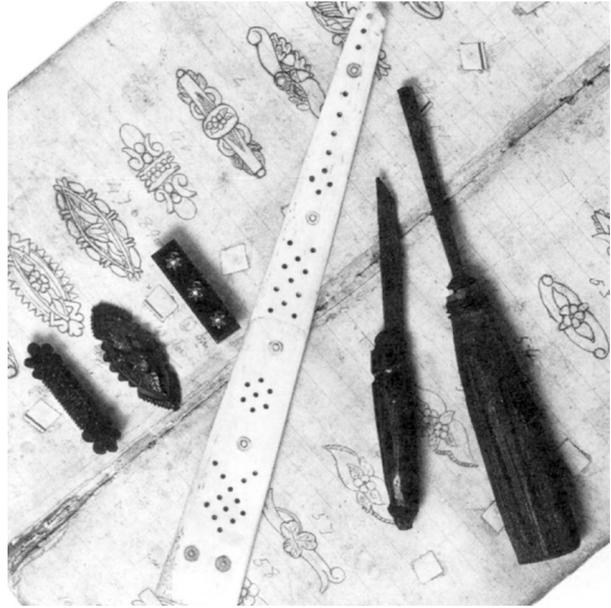


Bild 24: Schnitzwerkzeug und Musterbuch für Broschen
(MULLER, 1987, S. 56)

Von allen Zeitabschnitten kennt man Kombinationen von Gagat mit anderen Materialien. Abstandshalterplatten aus der Bronzezeit wurden mit Beschlägen und Einlagen aus Gold verziert, und Blattgold konnte auf römischen Armbändern nachgewiesen werden. Bariumsulfat, Zinn und Orpiment, letzteres ist ein sehr giftiges gelbes Pigment aus Arsen Trisulfat, wurden ebenfalls für die Dekoration von Gagatschmuck eingesetzt. Pechreste wurden auf eisenzeitlichen Armringen gefunden. Möglicherweise wurde damit eine Fütterung aus Leder festgeklebt oder Armringe wurden mit Pech repariert. (ROCHNA, 1984, S.94) Konservatoren-Restauratoren sollten bei der Reinigung von Kaustobiolithobjekten auf solche sekundäre Materialien aufmerksam sein. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 4; MULLER, 1987, S. 26)

3.5 Magische Eigenschaften von Kaustobiolithen

Schon bei Plinius im 1. Jh. n. Chr. werden dem Gagat eine ganze Reihe an magischen Eigenschaften zugeschrieben. Nach Plinius hält das Anzünden von Gagat Schlangen fern, zerstreut hysterische Zuneigung und hilft bei der Diagnose von Epilepsie. Der Rauch von Gagat deckt Versuche auf, Jungfräulichkeit oder eine unfähig machende Krankheit zu simulieren. Die Abkochung des Steins in Wein ist heilend für Zahnschmerzen und kombiniert mit Wachs gut gegen Skrofeln⁷. (MULLER, 1987, S. 21; LAWSON, 1975, S. 242; ALLASON-JONES, im Druck, S. 4) Ein Jahrhundert später beschreibt Solenius in seiner *collectana rerum memorabilium* Gagat als einen Stein, der unter Wasser brennt und durch Öl gelöscht werden kann. Er hat aber auch beobachtet, dass sich Gagat bei Reibung

⁷ Tuberkulöse Entzündung und Abszess der Lymphknoten, vor allem des Halses

elektrostatisch auflädt und kleine Dinge anziehen kann. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 4) Vermutlich ist diese wahre Eigenschaft der Grund, weshalb dem Gagat zu allen Zeiten so viele Kräfte und Eigenschaften zugeschrieben werden.

In Spanien ist es der arabische Physiker und Naturalist Benbuclaris, der als erster im 11. Jh. Gagat schriftlich erwähnte und ihm ebenfalls besondere Kräfte anerkannte. Er beschrieb, dass Kinder Gagat um den Hals trugen, um sie vor dem bösen Auge zu schützen. (TRUSTED, 1996, S. 142ff)

Im Mittelalter wurden die magischen Eigenschaften von Gagat als Material mit religiösen Symbolen vereint. Daraus entstand ein sehr wirkungsvoller Schutz gegen alles Böse. (MULLER, 1987, S. 27) Durch Gagatkreuze, die an der Haustür befestigt waren, glaubte man Hexen den Eintritt verwehren zu können. Gagatkreuze wurden auch von Wilderern als Schutz gegen Hunde getragen. Ausserdem dachte man, dass das Verbrennen von Gagat Fieber heilen könne. (BEYARS.COM, 2004) (LUCKYGEMSTONES.COM, 2004)

Verschiedene Kulturen glaubten, dass Gagat einen Teil der Persönlichkeit absorbiert, weshalb die Schmuckstücke besonders sorgfältig aufbewahrt werden mussten, damit nicht andere Personen Macht über einen erlangen konnten. Heute werden dem Material noch immer spezielle Eigenschaften zugeschrieben. Gagat soll ein starker Absorber von negativen Energien sein, was zum Beispiel bei Depressionen oder häuslicher Gewalt hilfreich sein kann. (LUCKYGEMSTONES.COM, 2004)

4 Bildung und Vorkommen von Kaustobiolithen

Kaustobiolithe entstehen durch Ablagerungsprozesse, gehören also geologisch zu den Sedimentgesteinen. Kaustobiolith bedeutet brennbares organogenes Sediment. Der Name bezeichnet die Bildung dieser Gesteinsgruppe aus organischen Resten und ihre Verwendbarkeit als Brennstoff. (SCHUMANN, 1991, S. 300) Archäologische Gegenstände sind aus ganz bestimmten, besonders kompakten, schwarzen und glänzenden Kaustobiolithen angefertigt, wie Gagat, Sapropelit, Kännelkohle, Bogheadkohle, Ölschiefer, festes Bitumen, Xylith usw.

In diesem Kapitel soll die Umwandlung von organischer Materie in Gestein, eben der Bildungsprozess von Kaustobiolithen, näher beschrieben werden. Dies soll zu einem besseren Verständnis des strukturellen Aufbaus solcher Werkstoffe führen. Die oben genannten, als Schmuckstein verwendeten Kaustobiolittypen werden anschliessend definiert und ihre makroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften beschrieben. Damit sollen die Materialien unterschieden und korrekt angesprochen werden können. Im letzten Teil werden die Vorkommen der wichtigsten Rohmaterialien lokalisiert.

Für dieses Kapitel war das Studium kohlenpetrografischer Literatur unerlässlich. Die Kohlenpetrografie befasst sich mit der Genese und Ausbeutung von Kohlen über das Studium der mikroskopischen Gefügebestandteile solcher Gesteine. Die Unterscheidung von den in der Archäologie anzutreffenden Kaustobiolithen ist von Auge nicht möglich. Gewisse makroskopische Merkmale werden durch den Alterungsprozess noch zusätzlich verfälscht. Deshalb ist es sinnvoll, mit der Methodik der Kohlenpetrografie zu arbeiten. Durch die Analyse polierter Anschliffe können ausser der Materialbestimmung auch Aussagen zum Erhaltungszustand, zu besonders zerfallsanfälligen Bestandteilen wie Pyrit und zur Materialherkunft gemacht werden.

4.1 Bildung von Kaustobiolithen

4.1.1 Ablagerung von Pflanzenmaterial als Kohlebildner

Die Bildung von Kaustobiolithen beginnt, indem sich Pflanzenmaterial an einem Ort ansammelt, wo es durch den Mangel an atmosphärischem Sauerstoff nicht zersetzt werden kann. Solche anoxische Bedingungen herrschen, wenn das Pflanzenmaterial sich in stagnierendem Wasser ablagert, wo es sich unter der Aktivität von Mikroorganismen zu Torf umwandelt. Wenn der Torf eingegraben wird und bestimmte Bedingungen vorhanden sind, findet die Umwandlung zu Braunkohle, Steinkohle, Anthrazit und Graphit als letztes Stadium statt. (GAMMIDGE, 2004; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995; ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS, 2002)

Das meiste angesammelte Pflanzenmaterial auf Erden wird aber nie zu Torf oder Kohle umgewandelt, sondern vollständig abgebaut oder von Bränden zerstört. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004) In gut durchlüfteten Böden werden abgestorbene Pflanzenteile durch *Verwesung* und *Vermoderung* zersetzt, da atmosphärischer Sauerstoff und Mikroorganismen wirken können. Als Endstadium solcher Vorgänge ist das Pflanzenmaterial vollständig in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt. *Fäulnis* und *Vertorfung* hingegen sind Prozesse, die die tote Pflanzenmaterie durch Luftabschluss erhalten (vgl. Tabelle 3). Fäulnis findet in stagnierenden Gewässern unter reduzierenden Bedingungen und bakterieller Aktivität statt. Vertorfung geschieht dann, wenn ein Ungleichgewicht zwischen Anhäufung und Verwesung von toten Pflanzen besteht. Durch das saure Milieu in Mooren ist auch die bakterielle Zersetzung reduziert. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, 32f)

	Verwesung	Vermoderung	Vertorfung	Fäulnis
Bedingungen	Stark oxidierend, trocken	Oxidierend, feucht	Schwach oxidierend bis reduzierend, feucht- nass	Reduzierend, subaquatisch
Konservierung der Ausgangssubstanzen	Keine soliden Rückstände, Bildung anorganischer Produkte wie Kohlendioxid und Wasser	Huminitische Substanzen und anorganische Reste; Bildung von Humus, Boden	Konservierung der huminitischen Substanzen als Torf	Faulschlamm- bildung; Konservierung von organischer Materie als subaquatischer Torf
Produkt	Stoffe, die zurück in den Kreislauf gehen	Nährstoffe für neue Pflanzen	HUMUSKOHLE	SAPROPELKOHL E ÖLSCHIEFER

Tabelle 3: Erhaltung und Umwandlung organischer Materie im Zusammenhang mit dem Vorhandensein von Sauerstoff (nach STACH, 1982, S. 35; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 33)

Je nachdem welche Art Pflanzenmaterial der Ausgang für die Kohlenbildung war und welche Prozesse zu der Konservierung der organischen Materie geführt haben, kann man verschiedene Kohlearten unterscheiden. Eine grosse Gruppe bilden die *Humuskohlen*. Humuskohlen entstehen aus Pflanzenmaterial, das sich vor Ort abgelagert hat, was man als *autochthon* bezeichnet. Es handelt sich vor allem um landlebende Gefässpflanzen wie Holz-, Blatt-, Rinden- und Wurzelgewebe, weshalb Humuskohlen reich an Lignin und Zellulose sind. *Sapropelkohlen* dagegen entstehen aus resistenten Pflanzenteilen wie Sporen, Pollen oder Wasserpflanzen, die an den Ablagerungsort transportiert wurden, was man *allochthon* nennt. Durch den Transport nehmen allochthone Kohlen mineralische Anteile auf und haben deshalb in der Regel einen höheren Mineralienanteil als autochthone Kohlen. (GAMMIDGE, 2004; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995; TAYLOR et al., 1998, S. 28)

In der Kohlepetrografie werden noch eine ganze Reihe weiterer Faktoren genannt, die für die Art und Qualität der Kohle bestimmend sind, wie zum Beispiel der Einfluss von Meerwasser, der pH-Wert, das Redoxpotential, das Vorhandensein von Nährstoffen etc. Zusammenfassend gesehen kann die Kohle so variabel sein, wie das Ausgangsmaterial und -milieu, das zu ihrer Bildung geführt hat (vgl. Bild 25). (TAYLOR et al., 1998, S. 34ff)

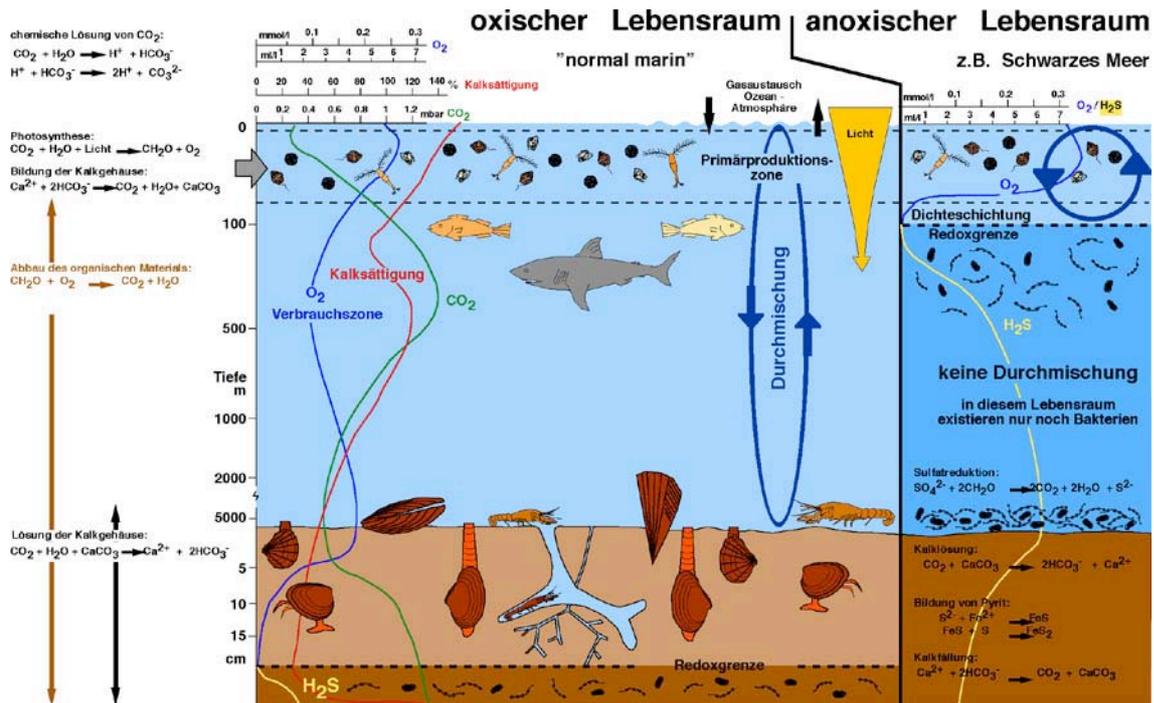


Bild 25: Beispiel eines marinen oxischen und anoxischen Lebensraumes (OSCHMANN, 2004)

4.1.2 Inkohlung

Damit das erhaltene Pflanzenmaterial sich in Kohle umwandelt, muss es eingegraben werden. Der Prozess, der aus organischem Material Kohle bildet, heisst *Inkohlung*. Dabei werden in den Molekülen des Pflanzenmaterials Atome wie Wasserstoff, Sauerstoff etc nach und nach entfernt, was eine relative Anreicherung an Kohlenstoff bewirkt. Als Vergleich für diesen Vorgang kann man an Essen denken, das anbrennt (CHAVIGNIER, 1990, S. 70). Zuerst verflüchtigt sich bei der Inkohlung Wasser, dann weitere leichte Bestandteile des organischen Materials, wobei der Gehalt an Kohlenstoff immer konzentrierter wird (vgl. Bild 27). Je nachdem wie weit die Inkohlung fortgeschritten ist, unterscheidet man Kohlearten verschiedenen Reifegrades, die in der sogenannten *Inkohlungsreihe* (vgl. Bild 26) festgehalten werden.

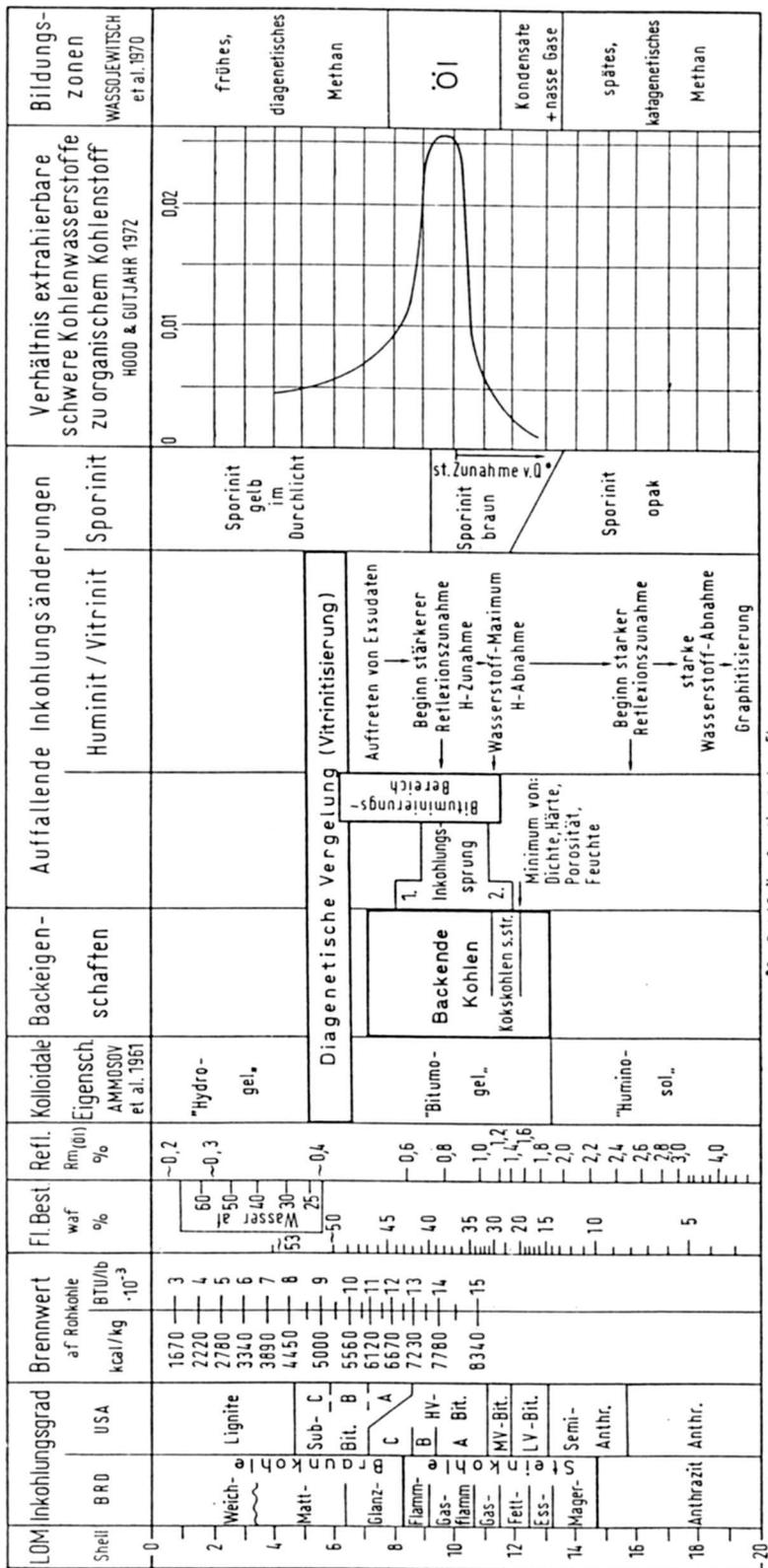


Bild 26: Inkohlungsreihe (LIGOURS, 1997)

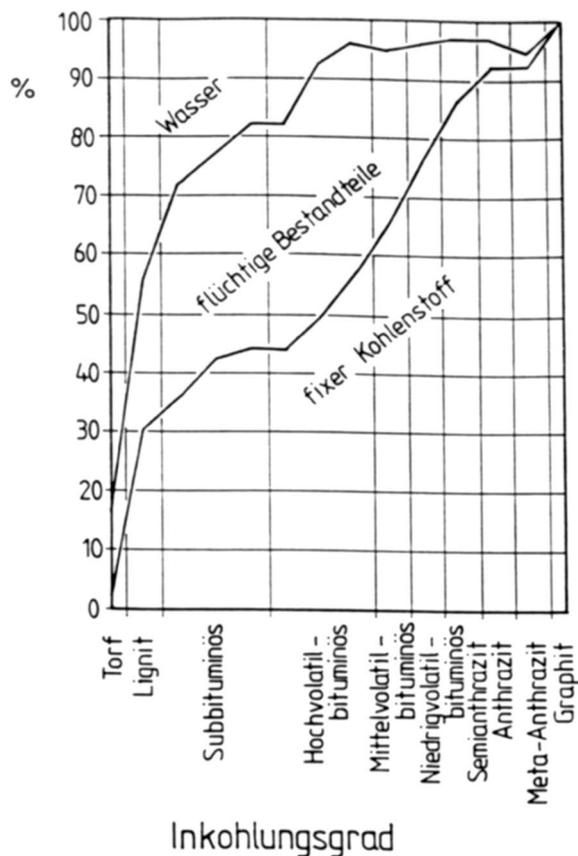


Bild 27: Entwicklung der Bestandteile mit fortschreitender Inkohlung (LIGOUIS, 1997)

Die Inkohlung findet in zwei Etappen statt. Die erste Etappe ist die *biochemische Inkohlung*. Dabei wird die botanische Materie mit Hilfe von Organismen chemisch teilweise zersetzt. Der Prozess beginnt mit der Ansammlung von Pflanzenmaterial und wird abgeschlossen, wenn der Reifegrad zwischen dem Matt- und Glanzbraunkohlestadium erreicht ist.

Während der biochemischen Inkohlung finden hauptsächlich zwei Prozesse statt, die *Humifizierung* und die *Vergelung* der Zellwände des Pflanzenmaterials. Humifizierung bezeichnet die partielle Zersetzung des Pflanzenmaterials durch Sauerstoff und durch den Angriff von aeroben Organismen wie Pilze, Insekten und Bakterien. Während der Humifizierung, die vor allem während der Torfbildung vorkommt, werden die chemischen Verbindungen des Pflanzenmaterials langsam oxidiert. Dabei werden Kohlenwasserstoffe aus dem Gewebe extrahiert. Es findet deshalb eine Anreicherung an Kohlenstoff und Sauerstoff statt, und aus den Zersetzungsprodukten der Bakterien bilden sich neue, vorwiegend saure Verbindungen in verschiedenen Molekulargrößen und Löslichkeiten, die so genannten *huminitischen Substanzen*⁸. (STACH, 1982, S.229) Der Vorgang trifft im Allgemeinen zuerst

⁸ Zum Beispiel Huminsäuren, Fulvische Säuren, Humine (=Huminsäuren, die die sauren Funktionen verloren haben) und Humate (mit Kationen verbundene Huminsäuren). Dies sind hauptsächlich Zersetzungsprodukte von Lignin und Zellulose. Sie beinhalten die Elemente C, O, H und N, haben einen aromatischen Kern und hydroxyle (-OH) und carboxyle (-COOH) Funktionen. Mit fortschreitender Diagenese verlieren sie diese Funktionen und werden zu Huminen. (Taylor, et al., 1998, S. 43)

die leicht zersetzbaren Bestandteile von Pflanzen wie Zucker und Stärke, erst dann die resistenteren, wie die aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin aufgebauten Zellwände. Wenn der Torf eingegraben wird, ist immer weniger Sauerstoff verfügbar, und der Prozess der Humifizierung hört langsam auf. Aerobe Bakterien und Pilze können nur in der Nähe der Oberfläche wirken, da sie auf die Zufuhr von atmosphärischem Sauerstoff angewiesen sind. Anaerobe Bakterien sind in tieferen Schichten anzutreffen, da sie chemisch gebundenen Sauerstoff von den Pflanzenresten beziehen können. Ab einer Tiefe von 10m sind keine Organismen mehr aktiv, es finden nur noch chemische Veränderungen wie Kondensation, Polymerisation und reduzierende Reaktionen statt.

Gegen Ende der Humifizierung setzt die Vergelung ein. Bei der Vergelung weichen die durch die Humifizierung schon teilweise zersetzten Zellwände auf, quellen, werden plastisch, verschmelzen miteinander und lösen sich als letztes Stadium ganz auf, wobei sie ein Gel aus huminitischen Substanzen bilden. Das Gewebe scheint homogenisiert, Zellumen verschwinden durch den Kompaktionsdruck. Wenn die huminitischen Substanzen zu grösseren Molekülen kondensieren, ist das Ende der biochemischen Inkohlung erreicht. (GAMMIDGE, 2004, S. 2; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, 34; TAYLOR, et al., 1998, S. 45f)

Die zweite Etappe der Inkohlung heisst *geochemische Inkohlung* und findet durch die Eingrabung in tiefere Schichten statt, wo keine Mikroorganismen mehr wirken können. Die Struktur und Chemie der organischen Materie werden durch die Auflast der Sedimente verändert, die Hitze und Druck erzeugen. In Grunde genommen sind es dieselben Prozesse, die auch zur Bildung von mineralischen Sedimentgesteinen führen. Ausser Druck und Temperatur spielt auch der Faktor Zeit eine entscheidende Rolle. (TEICHMÜLLER, 1987, S.120)

Die geochemische Inkohlung beginnt zwischen Matt- und Glanzbraunkohlestadium und wird mit dem Erreichen des Reifestadium von Methaanthrazit abgeschlossen. Die darauf folgende Umwandlung zu Graphit heisst Graphitisierung (TAYLOR et al., 1998, S. 86) Bezeichnend für die geochemische Inkohlung sind die *geochemische Vergelung* und die *Bituminisierung*. Beide Prozesse führen zu weit gehenden chemischen und physikalischen Veränderungen der Kohle.

Die *geochemische Vergelung*, auch *Vitrinitisierung*⁹ genannt, findet zwischen Braun- und Steinkohlestadium statt und verändert das Erscheinungsbild der Kohle drastisch. Sie wird nun schwarz, glänzend und hart, kompakter und homogener. Man vermutet, dass bei der geochemischen Vergelung das wässrige Gel, das durch die biochemische Vergelung aus hauptsächlich Zellulose- und Ligninresten entstanden ist, durch ein öliges System abgelöst wird. Geochemische Vergelung fällt nämlich zusammen mit der Bituminisierung, der Bildung von petroleumähnlichen Substanzen. Solche plastische bis flüssige Substanzen könnten die Lösemittel für ein öliges Gel, oder Bitumogel, darstellen, das das wässrige System ersetzt. Die stabilen aromatischen Gruppen der huminitischen Substanzen bilden dabei den soliden Bestandteil in einem kolloidalen System mit petroleumartigen Substanzen als Lösungsmittel. (TEICHMÜLLER, 1989, S.14; TAYLOR et al., 1998, S. 108)

Der Übergang zu Steinkohle ist nebst der geochemischen Vergelung ebenfalls charakterisiert durch die Bituminisierung. Dabei bilden sich aus fetthaltigen Ausgangsstoffen wie wachsige Blattkutikeln,

⁹ Weil durch die geochemische Vergelung das Mazeral (vgl. 4.1.3) Huminit zu Vitrinit umgewandelt wird.

Pollen und Sporen petroleumähnliche Substanzen. Es werden dabei hauptsächlich Sauerstoffgruppen aus den langkettigen Säuren, Alkoholen und Estern der Ausgangsstoffe entfernt, wodurch sich petroleumartige Kohlenwasserstoffe bilden, eben Bitumen und Öl. Man bezeichnet den Moment der Bildung solcher Substanzen auch als Ölfenster. (TAYLOR et al., 1998, S. 102ff; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 36) Das plastische bis flüssige Bitumen verfüllt noch verbleibende Poren in der Kohle. (TEICHMÜLLER, 1989, S.16)

Die geochemische Inkohlung führt zu einer Reihe an chemischen und physikalischen Veränderungen der Kohle. Durch den steigenden Druck wird vor allem Wasser ausgedrückt, die Porengröße verringert sich und strukturelle Einheiten ordnen sich parallel zur Ablagerungsfläche ein. (GAMMIDGE, 2004, S. 2; TAYLOR, et al., 1998, S. 94). Der Verlust an Feuchtigkeit steht mit dem Rückgang der Porengröße in direktem Zusammenhang. Jedoch ist auch die chemische Zersetzung an Hydroxylgruppen (-OH) für den verminderten Feuchtigkeitsgehalt verantwortlich. (TAYLOR, et al., 1998, S. 99ff).

Als chemische Veränderungen werden mobile Produkte wie Gase und Flüssigkeiten abgegeben, feste Rückstände kondensieren und bilden aromatische Verbindungen. (TAYLOR et al., 1998, S. 86) Als gasförmige Produkte entweichen in einem frühen Stadium bei Temperaturen zwischen 30 und 100°C vor allem Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O), später, bei Temperaturen bis zu 200°C vor allem Methan (CH₄). (GAMMIDGE, 2004, S. 2) Auch funktionale Gruppen, die Sauerstoff, Schwefel und Stickstoff enthalten, werden entfernt. Der relative Gehalt an Kohlenstoff steigt weiter an, während flüchtige Bestandteile abnehmen. (TAYLOR et al., 1998, S. 99ff)

Anthrazitisierung und Graphitisierung bezeichnen das Ende des Inkohlungsvorgangs. Aromatische Einheiten kondensieren zu grösseren Molekülen. Es findet eine starke Abnahme des Wasserstoffgehaltes statt und Bitumen zersetzt und verflüchtigt sich. Anthrazite verändern sich makroskopisch zu sehr harten, stark gelblich metallisch glänzenden Produkten mit kaum noch sichtbarer Schichtung. Graphite sind kristallin angeordnete Feststoffe und bestehen nur noch aus Kohlenstoff (TEICHMÜLLER, 1987, S. 143ff)

4.1.3 Mazerale

Die kleinsten, mikroskopisch erkennbaren Einheiten in Kohlen sind die Mazerale. Mazerale sind Analoge zu den Mineralien, die die Gefügebestandteile in inorganischen Gesteinen ausmachen. Im Unterschied zu Mineralien haben Mazerale aber keine geordneten Strukturen und keine einheitliche chemische Zusammensetzung, denn sie repräsentieren die verschiedenen Teile des originalen Pflanzenmaterials. (GAMMIDGE, 2004, S. 4; TEICHMÜLLER, 1987, S. 3, 1989, S.115) Der Begriff Mazerale wurde vom lateinischen *macerare* abgeleitet, was soviel bedeutet wie „aufweichen“. Endsilbe aller Mazerale ist -init. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004)

Die Mazerale sind in drei Hauptgruppen unterteilt: *Vitrinite*, *Liptinite* (auch *Exinite* genannt) und *Inertinite* (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5). Vitrinite entstehen vor allem aus Zellwänden und holzigem Gewebe, und kommen am häufigsten vor, nämlich zu 50 bis 90%. Liptinite bilden sich aus wachsigem,

harzigen und fettigen Pflanzenteilen wie Sporen Pollen, Blattkutikeln und Harzen von Hölzern. Sie machen etwa 10 bis 15% der Kohlenmasse aus. Bei Anregung unter ultraviolettem Licht fluoreszieren diese Substanzen. Die Fluoreszenz geht aber bei steigendem Reifegrad der Kohle zurück. Inertinite sind stark oxidierte Pflanzenteile, wie zum Beispiel Holzkohle, die durch ein Waldfeuer entstehen kann. Sie machen zwischen 10 und 40% der Kohlen aus. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004)

	Vitrinit	Intertinit	Liptinit
Ausgangsmaterial	Hölzig	Oxidiertes Material	Sporen, Pollen, Harze, ...
Chemie	Mittlerer C und H Gehalt	Hoher C Gehalt	Hoher H Gehalt
Farbe unter dem Mikroskop	Dunkel- bis Hellgrau	Hellgrau, Weiss, Gelb	Graubraun, Fluoreszierend

Tabelle 4: Mazeralgruppen und ihre Eigenschaften (nach GAMMIDGE, 2004)

Guppe	Mazeral	Charakteristiken
Vitrinite	Telinit	Zellwände
	Collinit	Amorphes Gel
	Corpocollinit	Zellverfüllung
	Vitrodetrinit	Detritus
Liptinite	Sporinit	Sporen, Pollen
	Cutinit	Kutikeln
	Suberinit	Zellwände des Suber (Kork)
	Fluorinit	Pflanzenöl
	Resinit	Harze, Wachse, Latex
	Alginit	Algen
	Bituminit	Amorph (Bakterien, Algen, Fauna)
	Chlorophyllinit	Chlorophyll
	Liptodetrinit	Detritus
Exudatinit	Sekundäre Exudate	
Inertinite	Fusinit	Zellwände (verkohlt, oxidiert)
	Semifusinit	Zellwände (partiell oxidiert)
	Sclerotinit	Zellwände von Pilzen
	Macrinit	Amorphes Gel (oxidiert)
	Inertodetrinit	Detritus
	Micrinit	Sekundäre Relikte der Ölbildung

Tabelle 5: Mazerale und ihre Charakteristiken (TEICHMÜLLER, 1987, S. 115)

4.1.4 Mikrolithotypen und Lithotypen

Mikrolithotypen und *Lithotypen* sind Konzepte, die beschreiben, wie sich die Mazerale als petrografische Einheiten untereinander anordnen.

Kaustobiolithe sind sedimentäre Gesteine und besitzen deshalb oft typische gebänderte Strukturen, die von periodischen Veränderungen während der Ablagerung des Pflanzenmaterials herrühren. (TAYLOR et al., 1998, S.275) Diese Bänder heissen *Lithotypen*. Es sind Lagen des Kohleflötzes¹⁰, die von bloßem Auge unterschieden werden können. (TEICHMÜLLER, 1989, S. 3; GAMMIDGE, 2004, S. 7) Der Beschrieb der Lithotypen war vor dem Einsatz des Mikroskops die einzige Möglichkeit, Kaustobiolithe zu untersuchen. Man kann unter den Humuskohlen in Steinkohlestadium vier Typen auseinanderhalten, Fusain, Durain, Clairin und Vitrain (vgl. Tabelle 6). (ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS, 2002; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004) Diese Einteilung ist aber idealisiert, denn es gibt jeweils Übergänge zwischen den einzelnen Typen. Bei Braunkohlen ist die Einteilung noch schwieriger. Es gibt dafür noch kein international akzeptiertes System. Lithotypen haben die Endung –ain. (TAYLOR et al. 1998, S.275ff)

HUMUSKOHLEN	Fusain, auch Faserkohle	ist faserig und pulvernd, gleicht Holzkohle	besteht hauptsächlich aus dem Mazerale Fusinit
	Durain, auch Mattkohle	ist hart und kompakt, hat einen matten, körnigen Bruch	besteht aus feinkörnigen Inertiniten und Liptiniten
	Clairin, auch Glanzstreifenkohle	ist kompakt, hat einen einheitlichen, leicht glänzenden Bruch	besteht aus Vitriniten und Liptiniten
	Vitrain, auch Glanzkohle	ist kompakt und homogen, hat einen glasigen, glänzenden, muscheligen Bruch	besteht hauptsächlich aus Vitriniten
SAPROPELKOHLLEN	Kännelkohle	ist matt, oder hat einen schwachen Fettglanz, ist schwarz, homogen, sehr hart und bricht muschelig	Die Mazerale sind sehr feinkörnig und haben eine einheitliche Textur
	Bogheadkohle	Wie Kännelkohle, kann bräunlich sein, hat eine braune Strichfarbe	Wie Kännelkohlen

Tabelle 6: *Lithotypen der Humuskohlen und der Sapropelkohlen (nach Taylor et al., 1998, S. 276)*

Mikrolithotypen sind typische Verbindungen von Mazeralen, die nicht makroskopisch, sondern nur unter dem Mikroskop identifiziert werden können. (TEICHMÜLLER, 1989, S. 3) Es gibt monomazeralische, bimazeralische und trimazeralische Mikrolithotypen, je nachdem ob sie Mazerale von einer, zwei oder drei Mazeralegruppen enthalten. Ihre Anordnung ist technisch gesehen wichtig und beeinflusst zum Beispiel das Verhalten beim Brechen. (GAMMIDGE, 2004, S. 7) Mikrolithotypen haben in der Terminologie die Endung –ite. (TAYLOR et al. 1998, S.275ff)

¹⁰ Ein Flötz ist in der Geologie eine schichtartige Ablagerung nutzbarer Gesteine

4.1.5 Mineralische Bestandteile

Die mineralischen Bestandteile der Kohle sind nicht brennbar und bleiben deshalb bei der industriellen Verwertung als sogenannte Asche zurück. Mineralien werden während der Torfbildung eingeschwemmt oder es kristallisieren im Grundwasser gelöste Salze aus. Auch die Pflanzenreste selber enthalten kleine Mengen an inorganischen Verbindungen.

Mineralien können in makroskopischen bis mikroskopischen Bändern, oder als Körner fein verteilt zwischen den Mazeralen vorkommen. Sie können Spalten oder kleinere Hohlräume wie Zelllumen und Poren der Kohle füllen. Mineralien können sogar die Zellstruktur von Pflanzenresten ersetzen, was man Pseudomorphose nennt. (SCHUHMAN, 1991, S. 17). Am häufigsten kommen Tonmineralien vor, davon vor allem Kaolinit. Auch Karbonate und Pyrite sind oft anzutreffen. (GAMMIDGE, 2004, S.10f; TAYLOR et al., 1998, S. 256ff)

Mineral	Vorkommen	Mineral	Vorkommen
Tone Illit Montmorillonit Kaolinit Hallosyt	Häufig	Sulfide Sphalerit Galena Chalcopyrit Pyrrhotit	Selten bis sehr selten
Eisendisulfide FeS ₂ Pyrit Marcasit Melnikovit	Selten bis gewöhnlich	Phosphate Apatit Phosphorit	Selten
Karbonate Siderit Ankerit Calzit Dolomit	Gewöhnlich	Sulfate Baryt	Selten
Oxide Hematit Quarz Magnetit Rutil	Selten	Silikate Zirkon Biotit Staurolit Tourmalin usw,	Selten bis sehr selten
Hydroxyde Limonit Goethit Diaspor	Selten	Salze Gypsum Bischofit Sylvit usw.	Sehr selten bis gewöhnlich

Tabelle 7: Mineralische Bestandteile von Kohlen (nach STACH, 1982, S. 123)

Pyrite (FeS₂), auch Schwefelkies, Schwefeleisen oder Katzensgold genannt, bilden sich hauptsächlich während der biochemischen Inkohlung durch die Aktivität von anoxischen, schwefelreduzierenden Bakterien. *Desulfovibrio desulfuricans* reduziert Sulfate zu Schwefelwasserstoff H₂S, der für die Pyritbildung benötigt wird. So entstehen hauptsächlich framboide Pyrite (vgl. Bild 28). Es kann auch geschehen, dass ganze Zellstrukturen im noch unkompaktierten Zustand als Pseudomorphose durch Pyrit ersetzt werden. (TAYLOR et al., 1998, S. 34) Schwefeleisen kann auch als Körner vorkommen. Wenn die Kristallform isometrisch ist, handelt es sich um Pyrit, bei der orthorhombischen Form um Markassit.

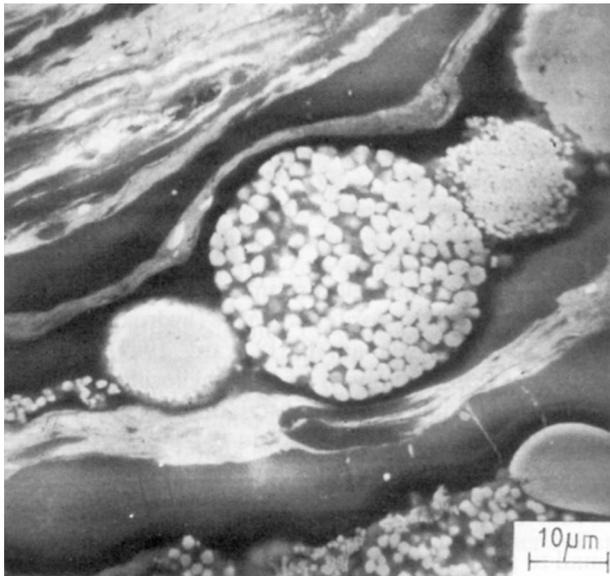


Bild 28: Pyrit Framboid (TAYLOR et al., 1998, S. 265)

4.2 Als Schmuckstein verwendete Kaustobiolithe

Als Ergebnis des Inkohlungsprozesses entstehen unterschiedliche Kaustobiolitharten, die für die Verarbeitung zu Schmuck und Gebrauchsgegenständen mehr oder weniger geeignet sind. Tatsächlich sind nur wenige Kohlen und Ölschiefer genug solide, um geschnitzt, gedreht und poliert werden zu können. (TEICHMÜLLER, 1992, s.7) Vermutlich hängt die gute Bearbeitbarkeit von Gagat, aber auch von anderen Materialien, damit zusammen, dass in ihrem Gefüge sehr fein verteilte, submikroskopische bituminöse Substanzen vorkommen. (TEICHMÜLLER, 1992, S.19)

4.2.1 Humuskohle

(frz.: charbon humique; engl.: humic coal) Es handelt sich um autochthon abgelagertes organisches Material, hauptsächlich von Gefäßpflanzen, das inkohlt wurde (vgl. 4.1.1). Dazu gehören Braunkohlen, die man auch Lignite nennt, und Steinkohlen. Humuskohlen sind sehr variabel in ihrer Erscheinung, denn diese hängt vom Inkohlungsgrad und vom Ausgangsmaterial ab. Sie können mittelbraun bis schwarz sein, matt bis stark glasig glänzend, weich und inhomogen mit erkennbaren Pflanzenresten bis homogen, kompakt und hart. Fast immer sind sie geschichtet oder gebändert. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S.66) Generell scheinen Humuskohlen nicht zur Bearbeitung geeignet. Im Braunkohlestadium sind sie zu wenig kompakt und zu porös, in fortgeschrittenem Steinkohlestadium färben sie schwarz ab und sind brüchig. Eine Verwendung ist möglich im Übergangsstadium zwischen Braunkohle und Steinkohle. Unter den magdalénienzeitlichen Funden von Neuchâtel-Monruz wurden kleine Rohmaterialstücke als Glanzbraunkohlen und Flammkohlen bestimmt. (LIGOUIS, im Druck, S.8)

4.2.2 Sapropelkohle und Sapropelit

(frz.: charbon sapropélique und sapropélite; engl.: sapropelcoal und sapropelite) Sapropelkohlen entstehen aus allochthon abgelagerten, resistenteren Pflanzenteilen wie Sporen, Pollen und Algen. Diese erhalten sich durch Fäulnis in stagnierenden Gewässern und vermischen sich mit feinsten, inorganischen Schlämmen zu einem Sediment, das man Sapropel nennt, was soviel bedeutet wie Faulschlamm (vgl. 4.1.1). Obschon man Humuskohlen und Sapropelkohlen grundsätzlich unterscheiden kann, gibt es dennoch viele Zwischenstufen und Übergänge. (DAVIS, 1993a, S.12)

Sapropelkohlen können in die Lithothypen Kännelkohle und Bogheadkohle unterteilt werden, beides sind für die Bearbeitung geeignete Materialien, weshalb sie weiter unten einzeln beschrieben werden. Es wird ebenfalls unterschieden zwischen Sapropelkohle und Sapropelit. Der Unterschied ist mit dem Verhältnis zwischen organischen und inorganischen Bestandteilen begründet. Sapropelkohle enthält kaum Mineralien, sondern die Grundmasse besteht aus dem amorphen Mazeral Bituminite, das durch bakteriell zersetzte Gefässpflanzen entstanden ist. Beim Sapropelit überwiegen die mineralischen Bestandteile. Sapropelit ist in der Regel feiner als Sapropelkohle, da das organische Ausgangsmaterial stärker degradiert wurde. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005) Beide zeigen im Unterschied zu Humuskohle keine von bloßem Auge erkennbare Schichtung. Kohlepetrographischen Analysen zeigen, dass für die Herstellung von keltischen Armringen der Schweiz und Deutschland Sapropelite besonders oft verwendet wurden. (SMITH, 2005, S.51)

4.2.3 Ölschiefer

Ölschiefer (frz.: schiste bitumineux; engl.: oil shale/ bituminous shale) sind Sedimentärgesteine mit einer lamellären Struktur, die vorwiegend aus Tonmineralien entstanden sind und ca zwischen 1 und 30% organische Reste, die ursprünglich aus Gewässern stammen, enthalten. Das unterschiedliche Verhältnis zwischen mineralischen und organischen Bestandteilen ist der Grund, weshalb es verschiedenste Arten an Ölschiefern gibt. (DAVIS, 1993a, S.13; Preuschoft-GÜTTLER, 1995, 42) Die Tonmineralien können in ihrer Zusammensetzung variieren, bestehen aber alle hauptsächlich aus hydratisierten Aluminiumsilikaten. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 1)

Ölschiefer sind schwerer als andere Kaustobiolithe, sind hart, glänzen nicht und haben eine schwarze, grauschwarze oder braunschwarze Farbe. Unter dem Mikroskop ist die organische Materie im Ölschiefer unsichtbar, da sie amorph und von submikroskopischer Größe ist. Sie bildet zusammen mit den mineralischen Bestandteilen eine mineralisch-bituminöse Grundmasse. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, 42)

Die Rohmaterialstücke der magdalénienzeitlichen Funde von Neuchâtel-Monruz (vgl. 3.1.1) wurden zum Teil als Ölschiefer des Toarcium, des Unterjura, bestimmt. Es ist bekannt, dass die Ölschieferschichten des Toarciums Gagat enthalten. (vgl. 4.3.3) Die gefundenen Reste zeugen daher nicht von der Bearbeitung von Ölschiefer sondern von der Verwendung von Gagat als Schmuckstein, denn es handelt sich vermutlich um Reste des Ganggesteins, das von den Gagatstücken abgeschlagen wurde. (LIGOUIS, im Druck, S.4f) Sehr kohlenstoffreiche Ölschiefer konnten aber auch zu Schmuckstücken und Gegenständen verarbeitet werden. Ein sehr bekanntes und schon zu

archäologischen Zeiten genutztes Vorkommen ist der Kimmeridge Schiefer, den man in England findet (vgl. 4.3.4). (TEICHMÜLLER, 1991, S.9) Armringe aus solchem Material wurden in der Schweiz schon ab der Eisenzeit gefunden. Auch römische Funde konnten als Kimmeridge Ölschiefer bestimmt werden. (SMITH, 2005, S.51f; TEICHMÜLLER, 1992, S.58ff)

4.2.4 Gagat

Der Begriff Gagat (frz.: jais; engl.: jet; span.: azabache) wird von Gages abgeleitet, einem Fluss und einer gleichnamigen Stadt in Lykien in der heutigen Türkei. Von dort erhielten die Griechen und Römer ihr Rohmaterial. (Muller, 1987, S.5)

Gagat ist eine spezielle Art von fossilem Holz. So wie es verkieselte und verkalkte Hölzer gibt, gibt es auch gagatisierte Hölzer. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S.23) Gagat entsteht aus einem Stück Schwemmholz, oft aus Gymnospermenholz, das eingegraben wurde und während seiner Inkohlung mit im umliegenden, oft tonigen, Sediment entstandenen Bitumen imprägniert wurde. Gagat wird deshalb meist in Ölschiefern als plattenförmige Einschlüsse von höchstens 25-30cm Dicke gefunden. (LIGOUIS, im Druck, S.2; TEICHMÜLLER, 1991, S. 5; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S.23)

Bergfrisch ist Gagat schwarz und glänzend, er bricht muschelrig (vg. 5.2.1) und scheint fettig. Gagat ist homogen, die Fläche, die mit dem Ölschiefer in Kontakt war, ist aber oft gerillt. Diese Rillen sind Reste des kompaktierten Holzgewebes. Feine Streifen als Reste der Jahrringe sind ebenfalls manchmal auf den Bruchstellen vorhanden. (LIGOUIS, im Druck, S.2)

Mikroskopisch gesehen besteht Gagat vor allem aus Mazeralen der Vitritgruppen. Das Gewebe des Holzvorgängers ist durch die starke Homogenisierung oft nur noch unter ultravioletter Lichtquelle erkennbar. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S.43)

Von allen Rohmaterialien ist Gagat das feinste und wertvollste. Er kann leicht poliert werden und erhält so eine feine, weiche Oberfläche. Unter den magdalénienzeitlichen Funden von Neuchâtel-Monruz wurde eine der stilisierten Frauenfiguren petrographisch analysiert. Sie wurde aus Gagat hergestellt. (LIGOUIS, im Druck, S.2) Die Verwendung von Gagat für die Schmuckherstellung reicht bis ins aktuelle Jahrhundert. (vgl. Kapitel 3)

4.2.5 Lignit

Der Begriff Lignit (frz.: lignite; engl.: lignite/ brown coal) ist ein Synonym für Braunkohle. Lignite gehören also in die Gruppe der Humuskohlen und liegen in der Inkohlungsreihe zwischen Torf und Steinkohle. Die Qualität von Ligniten kann sehr unterschiedlich sein. Wenig inkohlter Lignit ist ein nicht sehr stabiles Material in atmosphärischen Bedingungen, da es noch relativ viel Wasser enthält. Wenn solches Material trocknet, entstehen Spalten und Verzug. (DAVIS, 1993a, S.13) Erst im Glanzbraunkohlestadium ist die Bearbeitung denkbar. (vgl. 4.2.1).

In der Archäologie werden oft Kaustobiolithfunde mit Lignit bezeichnet. Einerseits wird der Begriff fälschlicherweise als Sammelbegriff verstanden, andererseits gibt es Verwechslungen mit der Bezeichnung Xylit. Das Wort Lignit kommt vom Lateinischen *Lignum* und bedeutet Holz. Es

bezeichnete früher Holzreste im Braunkohlestadium. Diese frühere Bedeutung wurde mit dem aktuellen Begriff Xylith ersetzt. Lignit ist heute das Synonym von Braunkohle. (ROCHNA, 1961, 333)

4.2.6 Kännelkohle

Kännelkohle (frz.: cannel coal; engl.: cannel coal) ist als Begriff abgeleitet von englischen Wort für Kerze „candle“, da Kännelkohle mit langer, gleichmässiger Flamme brennt. Kännelkohle ist eine Sapropelkohle (vgl. 4.2.2), die besonders reich an Pollen und Sporen ist, und kaum Algen enthält. In den meisten Kohlefeldern können Kännelkohlelagen vorkommen, oft als Übergang zwischen dem Kohleflötz und dem darüberliegenden Sediment. Kännelkohlen sind schwarz, sehr hart und rein, mit einem feinen kompakten Korn. Sie brechen muschelig, haben einen matten bis seidenmatten Glanz, können bearbeitet und poliert werden. Im Unterschied zu Gagat sind sie nicht elektrostatisch aufladbar und geben auf unglasiertem Porzellan eher einen schwarzen als einen braunen Strich. (DAVIS, 1993a, S.13; STACH, 1982, S.171) Die Mazerale der Kännelkohle sind sehr fein und homogen, eine Schichtung ist erst unter dem Mikroskop sichtbar. Die stark vermischten, feinen Partikeln aller Mazeralkomponenten erklären die Härte und gute Bearbeitbarkeit des Materials. (TEICHMÜLLER, 1992, S.15; STACH, 1982, 173f; MOORE, 1968, S.21) Kännelkohle wurde oft für bronzezeitliche Halsketten in Schottland verwendet. (HUNTER, DAVIS, 1994, S. 826)

4.2.7 Bogheadkohle

Bogheadkohlen (frz.: boghead; engl.: boghead), auch Torbanit genannt, gleichen den Kännelkohlen, denn sie sind ebenfalls eine Unterart der Sapropelkohlen. Sie bestehen im Gegensatz zu Kännelkohlen vor allem aus Algen. (STACH, 1982, 175) Besonders oft kommt die Süßwasseralge *Botryococcus braunii* vor. (MOORE, 1968, S.24) Bogheadkohle haben eine leicht bräunliche Farbe und geben einen braunen Strich auf unglasiertem Porzellan. Sie sind für die Bearbeitung wie Kännelkohlen gut geeignet.

4.2.8 Pechkohle oder Vitrain

Vitrain (frz.: vitrain; engl.: vitrain) ist einer der vier Lithotypen der Humuskohlen und heisst auch Glanzkohle (vgl. 4.1.4). Er entsteht aus kleinen, angehäuften Holzfragmenten oder aus einem ganzen Stück Holz. Diese Holzreste werden im Gegensatz zum Gagat nur wenig transportiert und nicht mit Bitumen imprägniert, sondern werden in Torf eingegliedert und dort inkohlt. Vitrain ist deshalb in Kohleflötzen als Linsen von mindestens 3mm Dicke zu finden.

Vitrain ist schwarz, stark glänzend und oft brüchig. Er bricht wie Gagat muschelig oder in Würfeln, zeigt aber kein fettiges Aussehen, ausser es handelt sich um sehr wasserstoffreichen Vitrain, der sogenannten Pechkohle. (LIGOUIS, im Druck, S.5) Vitrain dürfte höchstens für die Herstellung kleiner Objekte verwendbar sein. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005)

4.2.9 Xylit

Xylithe (frz.: xylithe; engl.: xylithe) sind inkohlte Holzstücke verschiedener Grösse, die man in Weich- oder Mattbraunkohleschichten, selten auch in Sapropelitschichten finden kann. Es handelt sich meist um Gymnospermenholz, da es resistenter gegenüber der Degradierung ist als Angiospermenholz. Xylithe können in Faserxylithe und Bruchxylithe unterteilt werden. Faserxylithe enthalten im Gegensatz zu Bruchxylithen noch grössere Mengen an Zellulose. Bruchxylithe entstehen als Fortsetzung der Inkohlung aus Faserxylithen und würden beim Fortschreiten des Prozesses Vitrain bilden. (vgl. 4.2.8)

Xylithe haben sehr unterschiedliche Farben, die von hellbraun bis schwarzbraun gehen können. Sie sind relativ weich und färben mit einem braunen Strich auf Papier ab. (LIGOUIS, im Druck, S.6)

4.2.10 Bitumen

Bitumen (frz.: bitume; engl.: bitumen) sind die nicht flüchtigen Bestandteile von natürlichen Ablagerungen an Kohlenwasserstoffen, können also flüssig bis fest sein. (CHILDS, 1995, S. 112; RIEDERER, 1987, S. 231) Sie bilden sich durch die Veränderung von degradiertem Pflanzenmaterial, das mit Schlamm und Sand vermischt ist, und sickern in Spalten und Poren im Gestein.

Albertit als solide Form von Bitumen scheint der einzige Typ zu sein, der bearbeitet werden konnte. Aus der Eisenzeit sind in Schottland Artefakte aus Albertit bekannt. Vermutlich war das Material lokal verfügbar. Es handelt sich um ein schwarzes Pyrobitumen, das stark glänzt und muschelrig bricht. (DAVIS, 1993a, S.13)

4.2.11 Ersatzmaterial und Fälschungen

Von allen oben beschriebenen Rohmaterialien ist Gagat das feinste und wertvollste. Alle anderen Rohstoffe können deshalb als eine Art Ersatzmaterialien angesehen werden, die lokal genutzt wurden, wenn Gagat nicht verfügbar war. Nur die Verarbeitung des Ölschiefers von Kimmeridge kann als eine eigenständige Industrie bezeichnet werden, die während der Eisenzeit bis zum Ende der römischen Besetzung von Britannien betrieben wurde. (MULLER, 1987, S.117f)

Ausser Kaustobiolithen wurden viele andere Materialien für die Imitation von Gagat verwendet. Besonders ab dem 19. Jahrhundert, während welchem Gagat sehr populär war, findet man eine grosse Auswahl an Ersatzmaterialien. Diese reichen von Mooreiche, Horn, schwarzem Glas, das auch *french jet* genannt wird, und Onyx bis zu verschiedensten Kunstharzen wie Bakelit, Vulkanit, gutta percha und bois durci. (MULLER, 1987, S.117f) (ANDERSEN, 1980, S. 380) Nicht kaustobiolithische Materialien wurden aber auch schon zu archäologischen Zeiten zur Imitation von Gagat verwendet. Von den von TEICHMÜLLER (1992) analysierten keltischen und römischen Grabbeigaben der Schweiz und dem Süden Deutschlands waren wenige Exemplare nicht aus Kaustobiolitharten, sondern aus schwarzem Tuff, Glas oder Knochen hergestellt. Nach ROCHNA (1962, S. 53, 69) wurden Nachbildungen aus Ton und schwärzlicher Glaspaste während der Hallstattperiode hergestellt.

4.3 Vorkommen von Kaustobiolithen

Das für die Schmuckherstellung am meisten gesuchte Material war Gagat, jedoch waren auch Sapropelkohlen und Sapropelite von Interesse. Gagat kommt in jurassischen Ölschieferschichten als Einschlüsse vor, Sapropelkohlen sind als Lagen in „normalen“ Kohlevorkommen zu finden.

4.3.1 Erdgeschichtliche Einordnung der Kohlevorkommen

Zeitalter	vor Mio. Jahren	Formation	Abteilung
Neozoikum oder Känozoikum (Erdneuzeit)	2	Quartär	Holozän (Alluvium) Pleistozän (Diluvium)
		Tertiär	Pliozän } Jungtertiär Miozän } Oligozän } Eozän } Alttertiär Paleozän }
			70
Mesozoikum (Erdmittelalter)	135	Kreide	Oberkreide Unterkreide
	180	Jura	Malm (Weißer Jura) Dogger (Brauner Jura) Lias (Schwarzer Jura)
	225	Trias	Keuper Muschelkalk Buntsandstein
	275	Perm	Zechstein Rotliegendes
	345	Karbon	Oberkarbon Unterkarbon
Paläozoikum (Erdaltertum)	400	Devon	Oberdevon Mitteldevon Unterdevon
	440	Silur	Obersilur Mittelsilur Untersilur
	500	Ordoviz	Oberordoviz Unterordoviz
	580	Kambrium	Oberkambrium Mittelkambrium Unterkambrium
	Präkambrium	1000	Jungproterozoikum Mittelproterozoikum Altproterozoikum
1800		Jungarchaikum Altarchaikum	
	4000		

Bild 29: Gliederung der Erdgeschichte (SCHUHMAN, 1991, S. 339)

Man kennt kohlige Sedimente bereits ab dem Präkambrium, grössere Kohleschichten kommen aber erst ab dem späten Devon und vor allem dem Karbon vor. Dass es kaum ältere Schichten gibt, ist mit der Abwesenheit von Pflanzen in den damaligen Zeiten begründet. Ab dem Karbon gibt es aus allen geologischen Epochen Kohlevorkommen, die wichtigsten stammen aus dem Ende der Kreide und

dem Tertiär. Grössere Vorkommen, wie die vom Karbon, vom Perm und vom Tertiär, hängen nicht mit besonders starkem Pflanzenwachstum zusammen, sondern eher mit günstigen Bedingungen, durch die sich das Pflanzenmaterial konservieren konnte. Bei der Gebirgsbildung entstehen oft gleichzeitig Depressionen, die grosse Mengen an Pflanzenmaterial und Sedimenten aufnehmen können. Da in den genannten Epochen solche Becken vorhanden waren, konnten grosse Mengen an Kohlen entstehen. (ENCYCOLPAEDIA UNIVERSALIS, 2002)

Kaustobiolithe kommen zu weniger als 0,1 Gewichtsprozenten in der Erdkruste vor. Die heute wirtschaftlich nutzbaren, das heisst von der Qualität und der Menge her lohnenswerten und zugänglichen Vorkommen, machen weniger als 10% der geologischen Vorkommen aus. Die zu urgeschichtlichen Zeiten, also ohne industrielle Mittel, zugänglichen Schichten waren sicher noch reduzierter. (ENCYCOLPAEDIA BRITANNICA, 2004)

4.3.2 Kohlevorkommen der Schweiz

Ausser dem Inkohlungsgrad werden Kohlen auch nach ihrer Beschaffenheit und nach ihrem Alter in Kohlen der Karbonformation, Kohlen aus mesozoischen und alttertiären Schichten, Kohlen aus den Molasseschichten und quartäre Kohlen eingeteilt. (KÜNDIG et al., 1997, S.414f) In der Schweiz kommen hauptsächlich eozäne und diluviale Kohlen vor. (KÜNDIG et al., 1997, S.408)

Art der Kohle	Kontext	Bekannte Vorkommen
Mesozoische und eozäne Kohlen	Sind in der Schweiz schwer zugänglich	Bekannt sind Vorkommen vom Beatenberg, Kandergrund und Boltigen im Kanton Bern
Molassekohlen (Pechkohlen, Glanzbraunkohlen)	Sind als dünne kleinräumige Flötze in der Molasse eingelagert	Grössere Produktionsorte befanden sich in Käpfnach/ Gottshalden/ Gwandeln ZH, Paudex-Oron VD, Mionnaz VD, Elgg ZH, Rufi/Schänis SG, Sonnenberg/ Littau LU, Reppischtal/ Riedhof ZH, Herdern TG und Höhrone ZG. Es gab aber auch viele kleine Ausbeutungen
Schieferkohlen	Kohlevorkommen in pleistozänen Ablagerungen (Moränen, fluvion-glaziale Schotter und Sande) Sie liegen im Reifestadium zwischen Torf und Braunkohlen und haben einen grossen Wassergehalt.	Grössere Vorkommen findet man in Uznach-Kaltbrunn SG, Eschenbach/ Dürnten/ Wetzikon SG, ZH, Zell, Gondiswil BE, LU, Mörschwil SG, und Grandson VD.
Anthrazit	Sind auf das Wallis konzentriert	Sie erstrecken sich in drei Hauptzügen von Salvan-Vernayaz zum Lac de Fully, im Lötschental und vom Val d'Entremont nach Sion und gegen den Simplon.
Karbonkohle		konnte durch Bohrungen in der Zone zwischen Riniken AG und Weiach ZH auf einer Tiefe zwischen 1400 und 1800m nachgewiesen werden.
Bitumen/ bituminöse Schiefer	sind in der Schweiz sporadisch im Jura, im Molasse-Vorland und seltener in den Alpen anzutreffen.	Historisch bedeutsam sind die Asphaltminen in La Presta im Val de Travers und die bituminösen Schiefer des Monte San Giorgio im Tessin.

Tabella 8: Kohlevorkommen der Schweiz (nach KÜNDIG et al., 1997, S.413ff; RUDHARDT, 1919, 25ff)

Bedeutendere Rohstoffvorkommen der Schweiz

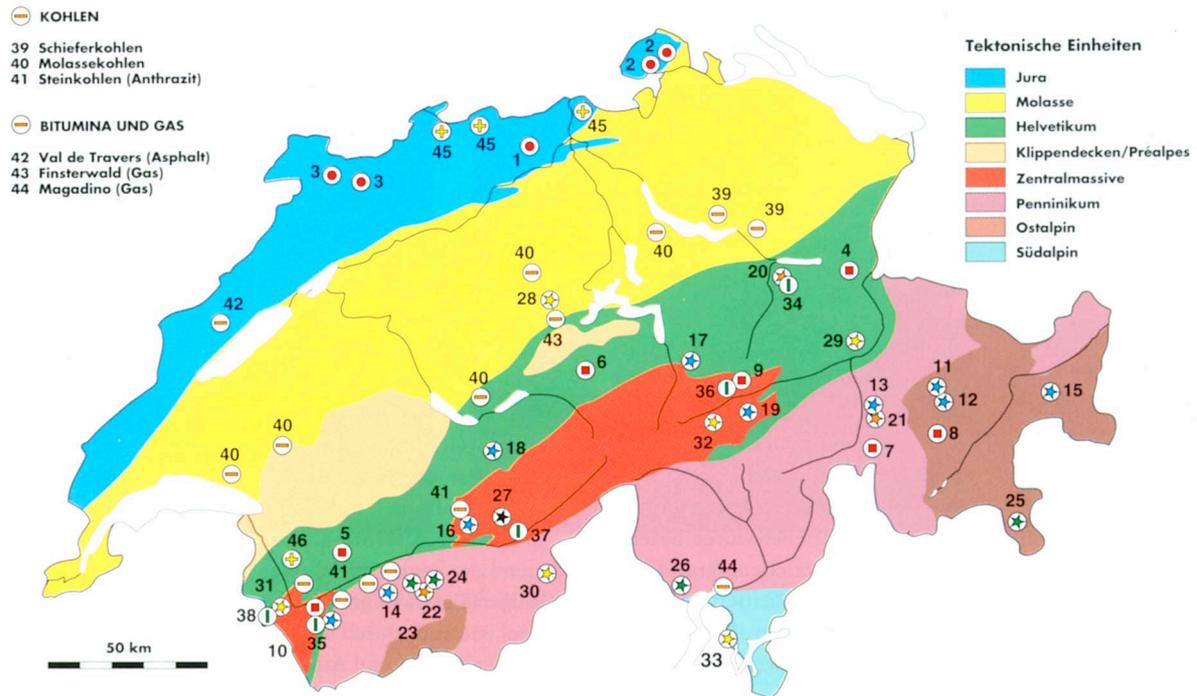


Bild 30: Kohlevorkommen der Schweiz (KÜNDIG et al., 1997, S. 408)

Gagatvorkommen sind in der Schweiz nicht bekannt. Die gagathaltige Schicht des Toarcium zieht aber durch die ganze Jurakette, könnte also Aufschlüsse bilden, die heute nicht mehr bekannt, oder nicht mehr vorhanden sind. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005) Als Ersatzmaterial für Gagat konnte in der Schweiz Sapropelkohle und Sapropelit lokal gefunden werden. Ein qualitativ schlechteres Ersatzmaterial war die Molassekohle, oder Pechkohle.

Material von guter Qualität musste also vermutlich importiert werden. TEICHMÜLLER (1992) stellte fest, dass von 80 keltischen und römischen kaustobiolithischen Schmuckstücken der Schweiz und des Südens von Deutschland ein grosser Teil aus englischem Material hergestellt wurde.

4.3.3 Vorkommen von Gagat

In Europa sind die Gagatvorkommen an Ölschieferformationen des Jura gebunden. Die erdgeschichtliche Periode des Jura ist in drei Schichten unterteilt, den schwarzen, braunen und weissen Jura, die in England Lias Dogger und Malm heissen. Jede der drei jurassischen Zeitabschnitte ist in sechs Unterteilungen eingeteilt (α β γ δ ϵ ζ). Gagat kommt hauptsächlich im schwarzen Jura, dem Lias ϵ vor, der auch Toarcium heisst. Alle bekannteren Fundstellen von Gagat wie in den „Jet Rocks“ in Whitby, Yorkshire, England (Unterer Lias), in den „schistes cartons“ des Pariser Beckens (Unteres Toarcium) und im Posidonienschiefer des schwäbischen Jura (Lias epsilon) sind jurassisch. (LIGOUIS, im Druck, S.4) Der Aufschluss der gagathaltigen Ölschieferschichten in Whitby verläuft entlang der Nordseeküste und ist elf Meilen lang. Gagat kann dort sogar am Strand

aufgesammelt werden. (TEICHMÜLLER, 1992, S.17) Der Posidonienschiefer¹¹ enthält ausser Gagat eine Vielzahl an Fossilien und ist besonders bekannt von den Orten Holzmaden und Dotternhausen. (UNIVERSITY OF BRISTOL, 2005) Der Aufschluss der Schicht liegt auf der Nordwestseite der Schwäbischen Alb und zieht sich der Neckar entlang gegen die Fränkische Alb (vgl. Bild 31). (WELLER/WERT, 1993, S.319)

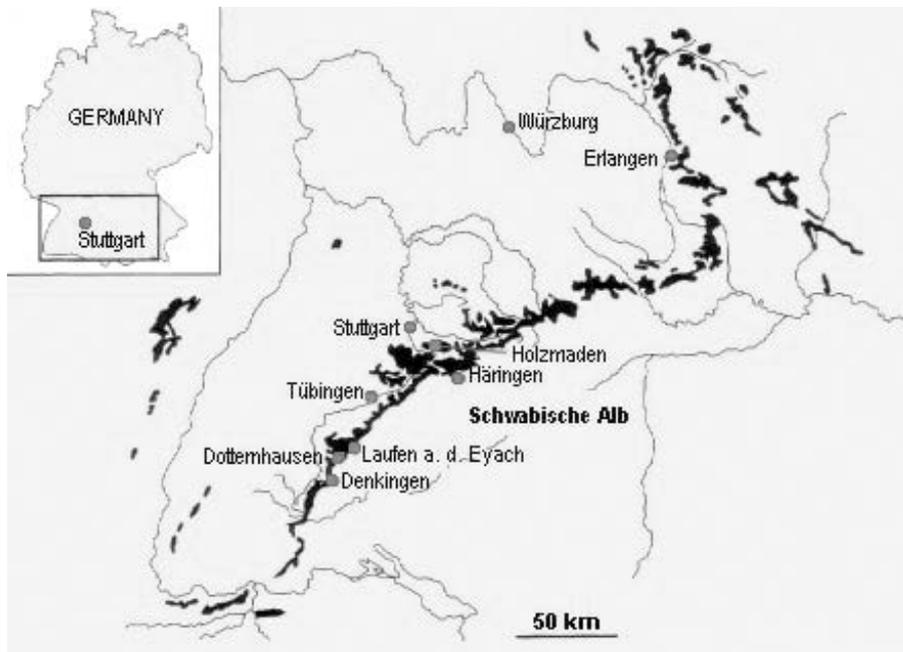


Bild 31: Aufschlüsse des Posidonienschiefers in der schwäbischen Alb (UNIVERSITY OF BRISTOL, 2005)

Während der jurassischen Periode war Europa eine Ansammlung an Inseln, getrennt durch warme, seichte Meere. Der Tethysozean lag weiter weg in Südosten. In diesen epikontinentalen Becken lagerte sich der jurassische Ölschiefer einstmal ab (vgl. Bild 32). (UNIVERSITY OF BRISTOL, 2005; OSCHMANN, 2001) Überall, wo diese Schichten vorkommen, ist es theoretisch möglich Gagat zu finden. Es kann früher Aufschlüsse gegeben haben, die heute nicht mehr bekannt oder nicht mehr vorhanden sind. In der Schweiz kommt Gagat möglicherweise in den medianen Voralpen vor. (LIGOUIS, im Druck, S. 4)

In Spanien liegen die bekanntesten Gagatvorkommen in Villaviciosa in der Provinz Asturias und Aragon. Er wurde hauptsächlich in Orviedo bearbeitet, während der Blütezeit im 19. Jh. wurde spanischer Gagat auch nach Whitby ausgeführt, hatte dort aber einen schlechten Ruf. Weiterer Gagat findet man im Departement Aude in Frankreich, der ähnlich wie in Spanien in unregelmässigen Venen im Grünsand der Kreide und im blauen Lehm des Albien vorkommt. In Sainte-Colombe, sur l'Hers waren im 18. Jh. über 1200 Arbeiter in der Gagatindustrie beschäftigt. Weitere Lagerstätten kennt man aus den vereinigten Staaten Amerikas, aus Colorado, Maryland und besonders von den Henry Mountains in Utah. (WEBSTER, 1975, S.518) (BARIAND, POIROT/ 1985, S.159)

¹¹ nach dem Fossil Posidonia, das in gewissen Horizonten des Vorkommens sehr häufig ist.

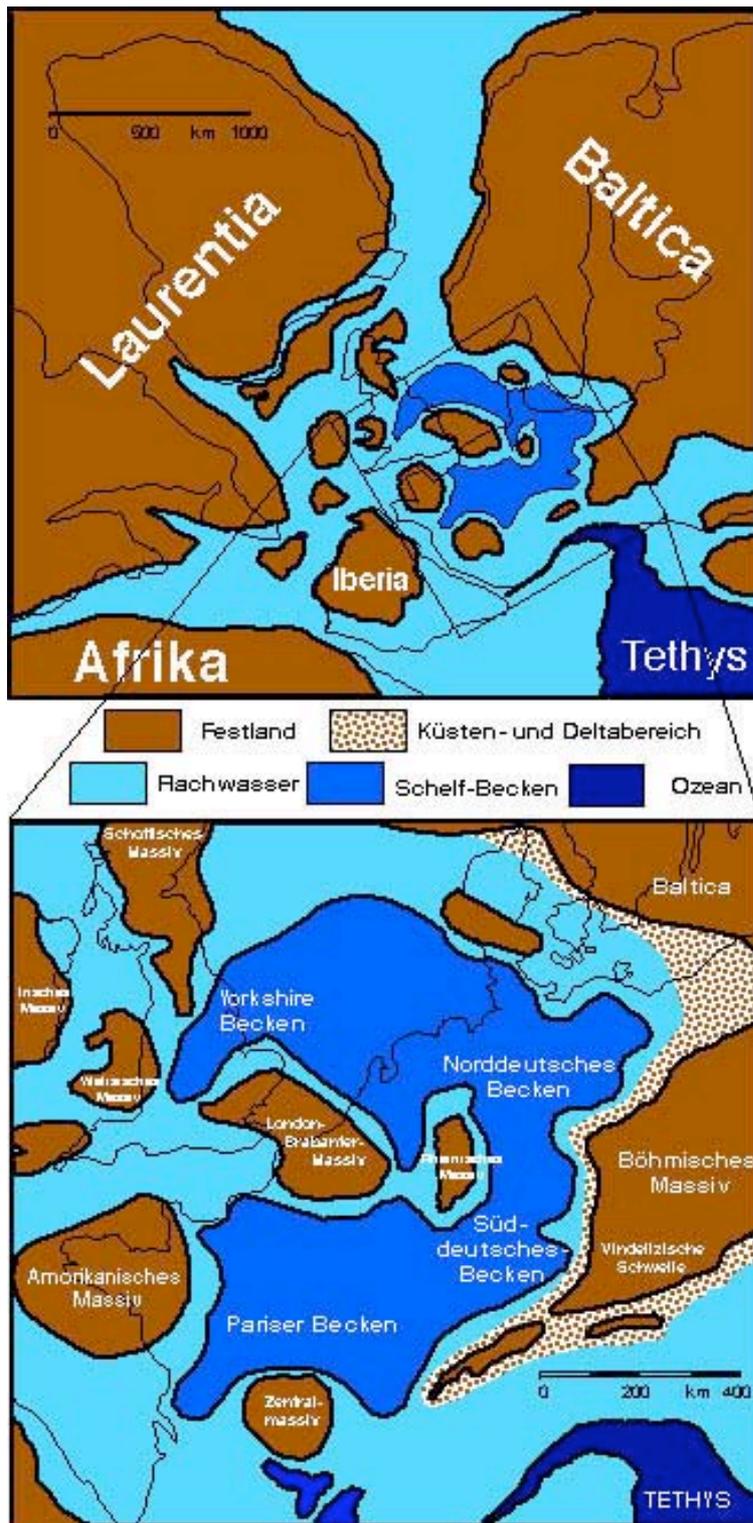


Bild 32: Geografie Europas während des Toarciums. Im Bereich des Schelfbeckens bildete sich der Ölschiefer des Toarciums. (OSCHMANN, 2001)

4.3.4 Vorkommen von Kännelkohle, Bogheadkohle und Sapropelit

Kännelkohlen und Bogheadkohlen kommen gemeinsam mit Humuskohlen vor, meist als Übergang des Kohleflötzes zu den darüberliegenden Schichten. Kännelkohlen sind bekannt aus Kohlebecken des Karbons in Europa, diese sind aber nicht überall zugänglich. Aufschlüsse sind im Norden und im Zentrum Englands und in Schottland vorhanden. Kännelkohle des Oberen Karbons findet man in dem Tauenzien Flötz des Westfal C, das im Westen Deutschlands unterhalb Neunkirchen aufschliesst. (TEICHMÜLLER, 1992, S.15; MÜLLER, 2003/ 2004)

„Schwarte“ ist ein wenig reifer Sapropelit des oberen Stephan, ebenfalls eine Formation des Oberen Karbon, in Böhmen und hatte früher einen Aufschluss im Nordwesten von Prag, bei Kralovice. (TEICHMÜLLER, 1992, S.5ff) Diese Quelle wurde vor allem von den Kelten östlich des Rheines genutzt. (ROCHNA, 1961, S. 345)

Kimmeridge Schiefer ist stark kohlenstoffhaltiger Ölschiefer und schliesst in Dorset im Süden von England und in Yorkshire, in Brora in Osten von Sutherland und auf einigen Inseln an der Nordwestküste Schottlands auf. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 2) Die Schicht kommt in grosser Tiefe auch in der Normandie in Frankreich und an der Nordsee vor. Das geologische Alter des Kimmeridge Schiefers ist im späten Jura, dem Malm in Deutschland, angesiedelt. Kimmeridge Schiefer kann gelegentlich auch Gagat beinhalten, jedoch nie in Mengen wie in Whitby. (WATTS, POLLARD, 1998, S. 41)

5 Zusammensetzung der kaustobiolithischen Rohmaterialien

Im folgenden Kapitel sollen einige naturwissenschaftliche Grundlagen zu den kaustobiolithischen Rohstoffen gegeben werden. Sie sollen zum Verständnis der Schäden und Veränderungen solcher Materialien beitragen. Es soll auch möglich werden, sich die Wirkung und Interaktionen von Konservierungsprodukten mit dem Rohmaterial besser vorzustellen.

5.1 Chemische Eigenschaften und Zusammensetzung

5.1.1 Allgemeines

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gagat sind, trotz seines Gebrauchs als Schmuckstein über Jahrtausende, schlecht bekannt. Es gibt zwar einige chemische Studien und Untersuchungen der Mazerale von Gagat, seine grundlegenden strukturellen Merkmale sind aber dennoch zu grossen Teilen unbekannt. (WELLER/ WERT, 1993, S.319ff)

Gagat kann chemisch als ein amorphes, organisches Stoffgemisch beschrieben werden. Er ist reich an Kohlenstoff und enthält zwischen 12 und 19% Mineralöl. In seiner Zusammensetzung sind Spuren an Aluminium, Silizium und Schwefel zu finden. Gagat enthält einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen, weshalb er gut brennt und dabei eine blaugrüne russige Flamme zeigt. (MULLER, 1987, S.ff; SMITH,1972, S.502; BARIAND/ POIROT, 1985, S.159) Gewisse Bestandteile von Gagat wie Exsudate (vgl. 4.1.3) sind löslich in organischen Lösungsmitteln. (LIGOUIS Pers. Komm., 04.2005)

5.1.2 Elementare Zusammensetzung

Elementaranalysen zeigen, dass Gagat zu ungefähr 80% aus Kohlenstoff besteht. Der Gehalt an Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff ist sehr variabel und hängt unter anderem von der Rohstoffquelle ab. Der Schwefelgehalt von mehreren Gewichtsprozenten ist bei Gagat relativ hoch (vgl. Tabelle 9). Die Messung mit dem Elektronenmikroskop auf einer Probe von Whitby ergab, dass Schwefel nicht in der Form von Pyrit vorhanden ist, sondern dass dieser organisch ist, das heisst Atom für Atom in der Kohlenwasserstoffmatrix verteilt ist, sozusagen als eine Lösung von Feststoffen. Es ist aber nicht untersucht worden, ob alle Gagate eine solche, nur atomare Schwefelverteilung aufweisen. (WELLER/ WERT, 1993, S.319ff)

	%C	%H	%O	%N	%S
Gagat	80	7	8	1	2
Holz	50	6	43	1	
Torf	60	6	33	1	
Braunkohle	73	6	19	1	
Steinkohle	83	5	10	1	
Anthrazit	94	3	2	1	
Graphit	100	-	-	-	

Tabelle 9: Elementare Zusammensetzung (nach SCHUHMANN, 1991, S. 300; WERT/ WELLER, 1993, S. 322)

5.1.3 Organische Verbindungen

Die Struktur organischer Verbindungen kann in der chemischen Analytik durch verschiedene Analysemethoden untersucht werden¹². Mit Kernresonanzspektroskopie NMR konnte festgestellt werden, dass Gagat von verschiedener Herkunft hauptsächlich aus aromatischen und aliphatischen Kohlenwasserstoffen bestehen. Das Verhältnis zwischen aromatischen und aliphatischen Anteilen beträgt zwischen 1,2:1 und 1,5:1, aromatische Verbindungen überwiegen also. Unter den aliphatischen Verbindungen können eine Vielfalt an gesättigten Kohlenwasserstoffen ausgemacht werden. Zum grössten Teil handelt es sich aber um Methylene (CH₂) und Methine (CH), die keine stark elektronegative Substituenten wie Alkohole und Ether aufweisen. Die aromatischen Substanzen sind hauptsächlich substituierte und unsubstituierte Benzole. Unter den am Benzolring befestigten Atomen sind hauptsächlich Kohlenstoffe auszumachen, es müssen aber auch Heteroatome wie Sauerstoff, Schwefel oder Stickstoff dabei sein. Substituenten der aromatischen Einheiten scheinen sich auf Ortho (1,2 Stellung) und Para (1,4 Stellung) zu befinden. Es handelt sich dabei vor allem um Phenole und die dazu gehörigen Ether, eventuell auch Amine. Zusammenfassend könnte eine mögliche chemische Definition von Gagat etwa wie folgt lauten: Gagat besteht aus mehr aromatischen als aliphatischen Verbindungen und enthält eine grosse Anzahl an phenolischen und damit verwandten Funktionen (LAMBERT/ FRYE/ JURKIEWICZ, 1992, S.123ff; WATTS/ POLLARD, 1998, S. 40)

Allgemein gesehen scheinen Kaustobiolithe hauptsächlich aus aromatischen Lagen zu bestehen, genauer gesagt aus aromatischen Ringen mit Phenolgruppen (vgl. Bild 33 und Bild 34). (TEICHMÜLLER, 1987, S. 122; WATTS/ POLLARD, 1998, S. 40) Ihre chemische Zusammensetzung hängt jedoch stark mit dem Inkohlungsgrad zusammen. Das originale Pflanzenmaterial besteht aus einer Mischung komplexer organischer Verbindungen, wie Zellulose, Lignin, Fette, Wachse, Tannine usw. (vgl. Bild 35). Während der Vertorfung und der Inkohlung werden diese mehr oder weniger offenen Strukturen zerlegt und es bilden sich neue, hauptsächlich aromatische und hydroaromatische Verbindungen.

¹² Fourier transformed infrared spectroscopy FTIR, Nuclear magnetic resonance NMR, gaz chromatography- mass spectrometry, Pyrolysis GC-MS Py

Zellulose kann einfach durch Hydrolyse depolymerisiert werden. Das vernetzte Polymer Lignin, das sich aus Phenylpropaneinheiten zusammensetzt, ist viel schwieriger zu zersetzen. (FLAIG, 1968, S.198ff; HOWIE, 1995, S.51) Torf enthält noch viele pflanzenähnliche Kohlenwasserstoffe und erst wenige aromatische Verbindungen. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004) Braunkohle hat ein ähnliches Verhältnis zwischen aliphatischen und aromatischen Strukturen wie Gagat, Anthrazit hingegen enthält wenig oder gar keine aliphatischen Verbindungen mehr. (LAMBERT/ FRYE/ JURKIEWICZ, 1992, S.123ff) Kännelkohle ist weniger aromatisch als Gagat, vermutlich da sie nicht aus hölzigem Vorgängermaterial besteht. (WATTS/ POLLARD, 1998, S. 41) Asphaltite werden als komplexe Mischungen von Asphaltinen und Harzen in einem öligen Medium beschrieben. (CHILDS, 1995, S. 111)

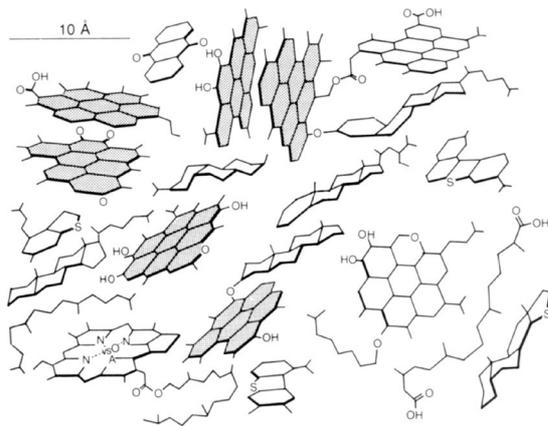


Bild 33: Strukturelle Molekülmodelle von Kohlen mit geringem Inkohlungsgrad. Die aromatischen Einheiten sind schraffiert. Die Moleküle zeigen keine Ordnung. (TAYLOR et al., 1998, S. 115)

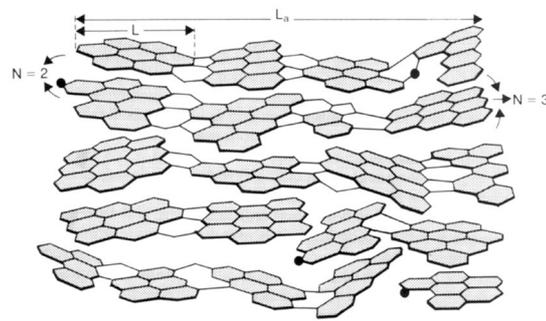


Bild 34: Strukturelle Molekülmodelle von stark inkohlten Kohlen, mit mehr aromatischen Einheiten (schraffiert) und mit wenigen Heteroatomen (schwarze Punkte). Die Moleküle sind fast parallel eingereiht. (TAYLOR et al., 1998, S. 115)

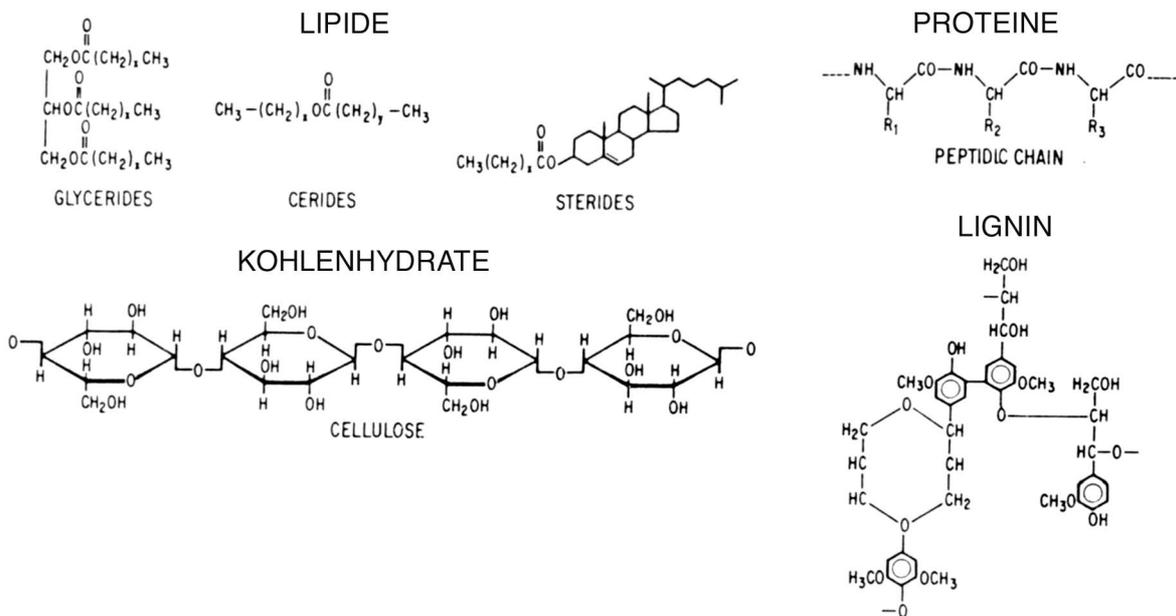


Bild 35: Einige biologische Moleküle (LIGOUIS, 1997)

5.1.4 Chemische Zusammensetzung der Mazerale

Der chemische Aufbau von Kaustobiolithen kann eigentlich nicht als Summe angegeben werden, sondern er entspricht der chemischen Zusammensetzung der vorhandenen Mazerale. Vitrinite haben einen hohen Sauerstoffgehalt, und bestehen aus Huminen. Humine haben einen aromatischen Kern, der mit aliphatischen funktionalen Gruppen umgeben ist. Inertinite sind kohlenstoffreich und bestehen aus konzentrierten aromatischen Strukturen. Liptinite sind wasserstoffreich und enthalten viele aliphatische Kohlenstoffe. Die zur Bearbeitung ausgewählten Kaustobiolithe sind oft konzentriert an Liptiniten. (Watts, Pollard, 1998, S. 39)

5.2 Physikalische und technische Eigenschaften

5.2.1 Härte, Dichte, Zähigkeit und Bruch

Die Härte von Gagat auf der Mohsskala (vgl. Tabelle 10) liegt zwischen 2,5 und 4, (SMITH, 1972, S.502; MULLER, 1987, S.2; ANDERSEN, 1980, S. 425) was für einen Schmuckstein relativ gering ist. Dafür lässt sich Gagat aber umso leichter schnitzen und drehen. Albertit liegt mit einer Härte von 2,5 im selben Bereich wie Gagat. (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159)

Mohshärte	Vergleichsmineral	Einfaches Härteprüfmittel	Absolut Härte (Schleifhärte nach Rosival)
1	Talk	Mit Fingernagel schabbar	0.03
2	Gipsspat	Mit Fingernagel ritzbar	1.25
3	Calcit	Mit Kupfermünze ritzbar	4.5
4	Fluorit	Mit Messer leicht ritzbar	5.0
5	Apatit	Mit Messer noch ritzbar	6.5
6	Orthoklas	Mit Stahlfeile ritzbar	37
7	Quarz	Ritzt Fensterglas	120
8	Topas		175
9	Korund		1000
10	Diamant		140000

Tabelle 10: Mohshärte (nach SCHUMANN, 1991, S. 22)

Nicht zu verwechseln mit der Härte ist die Zähigkeit, die man in der Fachsprache Tenazität nennt. Bei Mineralien versteht man darunter Sprödigkeit, Dehnbarkeit und Elastizität. (SCHUMANN, 1991, S. 30) Gagat ist ein zähes Material, deshalb lässt es sich gut bearbeiten. Kännelkohle ist brüchiger und spröder als Gagat und kann deshalb schlechter poliert werden. (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159) (WEBSTER, 1975, S.517) (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159)

Gagat hat eine Dichte von ungefähr 1,3 bis 1,35 g/cm². (SMITH,1972, S.502; BARIAND/ POIROT, 1985, S.159; WEBSTER, 1975, S.517; GÜNTHER, 1981, S. 102f; ANDERSEN, 1980, S. 425) Die Angaben liegen bei anderen Autoren wenig darüber oder darunter. Klar ist, dass es sich bei Gagat um ein Gestein mit geringem spezifischem Gewicht handelt, weshalb er sich besonders eignet, um grosse Schmuckstücke herzustellen. (MULLER, 1987, S.2) Die Dichte von Kohlen allgemein schwankt zwischen 1,1 und 1,5, g/cm², die Dichte von Schiefer und Pyrit liegen je bei 2,7 und 5,0 g/cm². (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004) Kännelkohle ist leicht dichter als Gagat, Albertit jedoch hat ein spezifisches Gewicht von nur 1,10 g/cm². (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159)

Bei nicht kristallinen Gesteinen beschreibt man anstelle der Spaltbarkeit den Bruch. Der Bruch kann muschelig, uneben, glatt, faserig, hakig, splittig oder erdig sein. Bei Gagat ist der Bruch eher glänzend und muschelig, das heisst wie der gerundete Abdruck einer Muschel aussehend, was man mit dem Fremdwort auch konchoidal nennt. (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159; WEBSTER, 1975, S.517; MULLER, 1987, S.2)

5.2.2 Farbe, Glanz und Brechungsindex

Gagat ist opak, einheitlich schwarz und glänzt samtig. (SMITH,1972, S.502) Das intensive Schwarz wurde im englischen sogar sprichwörtlich. Man sagt nämlich „as black as jet“, was im deutschen mit „Pechschwarz“ oder „Rabenschwarz“ ausgedrückt werden kann. (MULLER, 1987, S.1, WHITBY LITERARY & PHILOSOPHICAL SOCIETY, 2003) In der Mineralogie und Petrologie beschreibt man aber nicht die direkte Farbe eines Gesteins, sondern dessen Strichfarbe. Die Farbe von Mineralien kann nämlich variieren, da sie durch Fremdmaterial oder Störungen im Kristallgitter verursacht wird. Die Strichfarbe hingegen ist ein objektives Kriterium, da sie stets die Eigenfarbe des Materials wiedergibt. Man erhält die Strichfarbe, wenn man das Probierstück auf unglasiertem Porzellan reibt. Für die Probe muss man frische Bruchstellen verwenden, um Oxydationsüberzüge und Verwitterungsschichten zu meiden. (SCHUMANN, 1991, S.20f) Der zum Anschauen pechschwarze Gagat färbt beim Strichtest braun auf unglasiertem Porzellan ab. Je schwächer die Farbintensität des Strichs ist, desto härter ist das Stück und desto besser ist auch seine Qualität. (MULLER, 1987, S.3)

Der Glanz eines Materials entsteht durch das an seiner Oberfläche reflektierte Licht und ist abhängig vom Brechungsindex und der Oberflächenbeschaffenheit. Bei Steinen kann man unter anderen zwischen Glas-, Seiden-, Diamant-, Fett-, Wachs- und Metallglanz unterscheiden. (SCHUMANN, 1991, S.25) Gagat weist einen wachsig bis samtigen Glanz auf. Poliert man Gagat wird der Glanz so stark, dass dieser während dem Mittelalter sogar als Spiegel benutzt wurde. (MULLER, 1987, S.2) Glanz ist in der Gemmologie (Edelsteinkunde) eine wichtige Materialeigenschaft. Messungen des Brechungsindex auf Edelsteinen erlauben sogar dessen Bestimmung. Polierter Gagat zeigt auf dem Refraktometer einen Wert von ungefähr 1,65. Es ist aber schwierig eine genaue Messung zu erhalten, da es sich um einen nicht kristallinen Schmuckstein handelt. (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159; WEBSTER, 1975, S.517; MULLER, 1987, S.2; GÜNTHER, 1981, S. 102f) Kännelkohle ist matter als Gagat und hat einen Brechungsindex von 1,4 bis 1,5. (BARIAND, POIROT, 1985, S.159)

5.2.3 Elektrostatische Aufladung und Wärmeleitung

Wenn Gagat auf Wolle oder Seide gerieben wird, erhält er eine elektrostatische Ladung und kann kleine Papierstücke aufnehmen. (MULLER, 1987, S.2) Diese Eigenschaft hat er gemeinsam mit Bernstein, weshalb Gagat früher auch schwarzer Bernstein genannt wurde. (WEBSTER, 1975, S.517) Nach Plinius bildet die Reibung auch einen starken Geruch, möglicherweise wurde aber Gagat mit Bitumen verwechselt. (BARIAND/ POIROT, 1985, S.159)

Gagat ist ein schlechter Wärmeleiter, weshalb er sich bei der Berührung warm anfühlt. Dies ist eine angenehme Eigenschaft für Schmucksteine und hilft auch Gagat von Imitationen aus Glas zu unterscheiden, da Glas sich kalt anfühlt. (MULLER, 1987, S.2) (WELLER/ WERT, 1993, S.319ff)

5.2.4 Porosität

Porosität ist während des ganzen Inkohlungsprozesses in allen daraus resultierenden Materialien durchgehend vorhanden, wenn auch die Grösse und die Verteilung der Poren schwierig zu messen sind. Es scheint drei Größenordnungen von Poren zu geben: Makroporen, die grösser als 50 Nanometer ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) sind, Mesoporen, die zwischen 2 und 50 Nanometer und Mikroporen sind, die weniger als 2 Nanometer messen. Durch die Porosität weist Kohle eine grosse innere Oberfläche auf, nämlich um 200m^2 pro Gramm Kohle. In den Poren kann Methan adsorbiert sein, weshalb es in ungelüfteten Kohleminen zu Explosionen kommen kann. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2004)

5.2.5 Differenzierte Verwendung der Werkstoffe

Bei den Römern kann man eine differenzierte Verwendung der Rohstoffe feststellen. Gagat wurde vor allem für Haarnadeln und Perlen, Ölschiefer für Armbänder, Tablette und Tische und Kännelkohle für Fingerringe und Perlen verwendet. Kännelkohle konnte leicht zerschlagen, für grössere Objekte wurde deshalb Schiefer vorgezogen, welcher auch in grösseren Stücken auffindbar war. Der Ölschiefer hingegen war weniger geeignet um kleine Objekte herzustellen. Dies sind aber nur Tendenzen und keine festen Regeln. (ALLASON-JONES, 2004, S. 4, 82)

5.3 Biologische Strukturen

In Gagat können strukturelle Reste des Holzes noch vorhanden sein. Manchmal wird das Gewebe erst unter UV-Strahlung sichtbar. Die Bestimmung des Holzes ist selten möglich. Die Behauptung, dass es sich um Holz fossiler Arten von Araukarien handelt, kann nicht gestützt werden. Es scheint aber so, dass es sich oft um Koniferenholz handelt, was sich an konservierten Harzkanälen erkennen lässt. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005)

Als resistenteste pflanzliche Reste in Kaustobiolithen allgemein, können Sporen, Pollen und Algen gelten. Es ist oft möglich diese zu bestimmen. Figurative biologische Reste verschwinden aber mit

zunehmendem Inkohlungsgrad. Ab dem Übergang zu Anthrazit ist die Grenze der Bestimmbarkeit organischer Strukturen erreicht. (KLAUS, 1987, S. 71)

6 Abbauprozesse bei Kaustobiolithen

Die Mechanismen, die für die schlechte Stabilität von Kaustobiolithen verantwortlich sind, wurden bisher nie vertieft studiert. (HOWIE, 1995, S.51) (CRONYN, 1990, S. 295) Es ist sehr schwierig, die chemischen Veränderungen in diesen Materialien zu erfassen, denn dafür muss man ihre Struktur und ihre einzelnen Bestandteile gut kennen, die, wie durch die vorangehenden Kapitel deutlich wurde, sehr komplex sind. Verallgemeinern kann man kaum. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 8)

In diesem Kapitel wird versucht, die Elemente zusammenzufassen, die einen Einfluss auf die Beständigkeit von Kaustobiolithen haben. Im ersten Teil werden feststellbare Veränderungen, die in Publikationen beschrieben wurden, aufgelistet. Im zweiten Teil des Kapitels werden die heute bekannten Zerfallsvorgänge erläutert. Sie betreffen meist nur gewisse Bestandteile von Kaustobiolithen, und sind also für Materialien, die diese Bestandteile nicht aufweisen, ungültig. Zwischen den sichtbaren Veränderungen und bekannten Abbauvorgängen konnte in der Regel kein kausaler Zusammenhang gegeben werden. Im letzten Teil dieses Kapitels folgt eine Einordnung der Zerfallsvorgänge. Es wird festgehalten, welche Konsequenzen sie für die Arbeit des Konservators-Restaurators haben können und es wird Bezug genommen zu der ursprünglichen Fragestellung (vgl. 1.2). Nebst der Fachliteratur für Konservierung-Restaurierung war auch die kohlenpetrografische Literatur von Bedeutung für dieses Kapitel. Die Abbauvorgänge von Kohlen stossen in diesem Fachgebiet auf ein gewisses Interesse, da Kohlen, die lange gelagert wurden, schlechtere Heizeigenschaften aufweisen und da ältere Mikroskoppräparationen nach längerer Zeit nicht mehr dieselben Charakteristiken zeigen.

6.1 Feststellbare Veränderungen

6.1.1 Zustandsbeschreibung von archäologischen Objekten

Der Erhaltungszustand magdalénienzeitlicher Kaustobiolithobjekte erscheint äusserst unterschiedlich, offensichtlich unabhängig von Fundort und Fundzeit. Es gibt gut erhaltene Stücke, die sich ohne jede Behandlung stabil verhalten, andere spalten entlang der natürlichen Schichtung. (BULLINGER, im Druck, S. 159) Erfahrungen von Konservatoren-Restauratoren zeigen, dass grabungsfeuchte Kaustobiolithfunde sehr verschieden reagieren. Es gibt Stücke, die trotz der durch den Wasserverlust bedingten Schrumpfung keine oder nur eine geringe Rissbildung zeigen, während andere durch die Trocknung auseinandersprennen oder sich in Lamellen aufspalten. (CRONYN, 1990, S. 294; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 20) Allgemein scheinen sich Gagate besser als kaustobiolithische Ersatzmaterialien zu erhalten. Qualitativ schlechter Gagat spaltet aber noch stärker. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 8)

6.1.2 Während der Bearbeitung entstehende Schäden

Nach MULLER (1987, S. 4) gibt es zwei Arten von Gagat, so genannten harten und weichen Gagat. Diese Bezeichnung hat aber nichts mit der Mohshärte zu tun, sondern meint die Qualität des Rohmaterials. ‚Harter Gagat ist zäh und dauerhaft, behält seine Form und seinen Glanz für Jahrhunderte. Weicher Gagat ist brüchig, und übersteht schnell wechselnde Temperaturen nicht. Er beginnt kurze Zeit nach seiner Bearbeitung zu spalten (vgl. Bild 36). Die beiden Arten sind von Auge nicht zu unterscheiden, und die Enttäuschung war dementsprechend gross, wenn die schlechtere Qualität verarbeitet wurde und das fertige Schmuckstück bald zu spalten begann. Spanischem Gagat sagt man nach, dass er bei plötzlicher Hitze oder Kälte eine Tendenz zum Spalten habe.‘ (MULLER, 1987, S.101)

Ölschiefer wurde durch das Drehen erhitzt, weshalb er trocken und brüchig wurde. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 4)

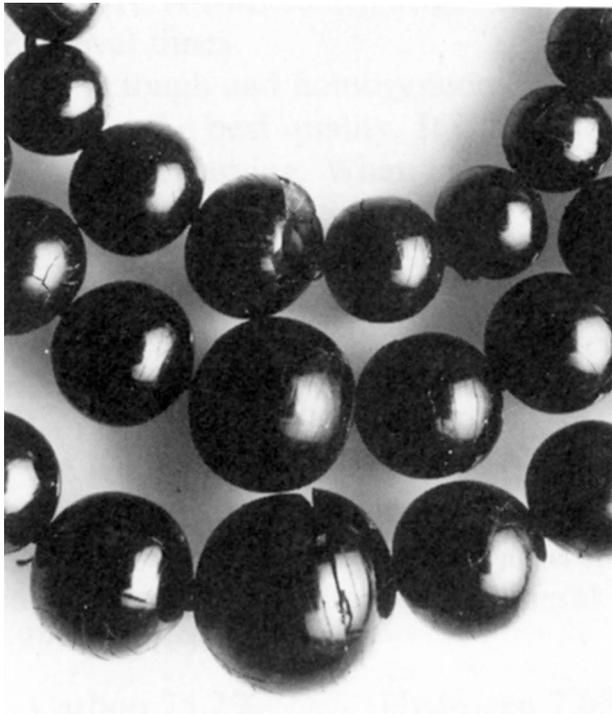


Bild 36: Perlen aus 'Soft Jet', mit typischen Spalten, die kurz nach der Bearbeitung entstehen (Muller, 1987, S. 4)

6.1.3 Durch Klebstoffe und Lösungsmittel verursachte Schäden

MAUSER (1970, S.76ff) berichtet, dass nach dem 2. Weltkrieg die magdalénienzeitlichen Frauenfiguren vom Petersfels für Ausstellungszwecke mit UHU Klebstoff auf eine Glasplatte geklebt wurden. Das empfindliche Gagatmaterial wurde dadurch angegriffen, die beklebten Seiten sahen 1970 „recht mitgenommen aus“. Eine Wilpferdgravierung auf einer Gagatplatte ist durch „unsachgemässe Präparierung“ völlig zerstört. Die meisten Gagatanhänger „sind so stark mit Konservierungsmitteln getränkt, dass über deren Oberflächenbehandlung nicht viel ausgesagt werden kann“.

6.2 Erläuterung verschiedener Zerfallsvorgänge

6.2.1 Spaltenbildung

Die Spalten und Risse in Kaustobiolithen scheinen der natürlichen Struktur des Materials zu folgen (PREUSCHOFF-GÜTTLER, 1995, S. 20) und sind daher typisch für das Rohmaterial. Wenn Gagat Spalten aufweist, bilden diese würfelförmige Einheiten, mit je muscheligen Bruch. Auch Vitrain zeigt ein solches Spaltenbild. (LIGOUIS, im Druck, S. 4) Bei Gagat scheinen die Spalten desto ausgeprägter zu sein, je mehr Zirkonium vorhanden ist, wie die Kopplung von Elementaranalysen mit Zustandsbeschreibungen zeigt. (DAVIS, 1990, S. 65/ 1993a, S. 16) Kämmkohlen bilden eher einzelne, Xylithe unregelmässige bis eher holzähnliche Spalten. Bei Objekten aus Albertit wurden keine Spalten festgestellt. Funde aus Ölschiefer können oft daran erkannt werden, dass sie laminiert erscheinen und Schollen bilden. Die öligen Bestandteile oxidieren vermutlich im Boden und an der Luft, weshalb die Beschaffenheit des Materials sich verändert. Das Objekt verliert den Glanz und die Glätte, es spaltet in Lamellen, wenn keine Behandlung erfolgt. (LAWSON, 1975, S. 242; MULLER, 1987, S. 118; DAVIS, 1993a, S. 16)

Da die Spaltenbildung typisch für das Rohmaterial ist, könnte sie als Erkennungshilfe beigezogen werden. (DAVIS, 1993a, S. 16)

6.2.2 Oxidation

Obwohl Gagat und die ihm ähnlichen Materialien aus relativ stabilen Kohlenwasserstoffen bestehen, unterliegen sie Oxidationsvorgängen. (WERT/ WELLER, 1993, S. 321) Kohlen oxidieren, sobald sie Sauerstoff in der Luft oder unter Wasser ausgesetzt sind. Ihre Eigenschaften, und insbesondere die des Vitrinites, verändern sich dadurch. Vitrinite entwickeln Mikroporen und -spalten, wenn sie oxidiert werden. Dies geschieht, weil Kohlenstoff sich vor allem in der Form von Kohlendioxid und Wasser verflüchtigt. Die Oxidation wird durch ultraviolettes Licht noch verstärkt. (TAYLOR et al., 1998, S. 273) Unter dem Mikroskop gesehen, zeigen stark verwitterte Kohlen Trocknungsspalten, dunkle Oxidationsränder und schwarze Löcher, die zurückbleiben, wenn Pyrit ganz oxidiert ist. (vgl. 6.2.3) (TAYLOR et al., 1998, S. 273f)

Auf molekularer Basis weiss man erst wenig über die Oxidation von Kohlen. Einzig ist bekannt, dass von aliphatischen C-H Verbindungen der Wasserstoff entfernt wird. Generell scheinen die aliphatischen Verbindungen zugunsten der aromatischen abzunehmen, obschon es vermutlich vielschichtige Oxidationsabläufe gibt. Fortgeschrittene Stadien der Oxidation sind bezeichnet durch Depolymerisierung und Bildung von kleineren, in Basen löslichen Molekülen, wie man sie unter den huminitischen Substanzen findet (vgl. 4.1.2). Weitere Veränderungen sind die relative Zunahme an Sauerstoff gegenüber dem Kohlenstoff und der Verlust an thermoplastischen Eigenschaften.

Die Oxidation kann durch die Messung der Fluoreszenz und des Reflexionsvermögens festgestellt und quantifiziert werden. Beide Messungen sind Standarduntersuchungen in der Kohlenpetrografie und zeigen niedrigere Werte auf oxidierten Kohlen. (TAYLOR et al., 1998, S. 528ff) Es gibt auch

spezielle Färbemittel, die oxidierte Zonen in polierten Anschliffen hervorheben. Allerdings funktioniert diese Technik nur bei Kohlen mit hohem Inkohlungsgrad¹³ und ist deswegen für die Untersuchung der archäologischen Kaustobiolithobjekte ungeeignet, da die meisten der verwendeten Rohstoffe einen geringen Reifegrad aufweisen. (TAYLOR et al., 1998, S. 437f)

6.2.3 Pyrit

Pyrit, auch Schwefeleisen genannt, kommt in Kaustobiolithen häufig vor. Er oxidiert beim Vorhandensein von Sauerstoff und Feuchtigkeit, und durch die damit einhergehende Volumenzunahme spalten und verformen sich die Kaustobiolithe. Es bildet sich als sichtbares Anzeichen des Vorgangs oranges und grauweisses Pulver aus Eisenoxiden und Sulfaten. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 8; RIXON, 1976, S.139; NEWMANN, 1998, S. 363) Die Oxidation trifft vor allem die durch Bakterien gebildeten framboiden Pyrite. (vgl. 4.1.5) Gut kristallisierter Pyrit ist nämlich sehr stabil. Die porösen Framboide hingegen degradieren unter ungünstigen Bedingungen schnell, denn sie weisen eine viel grössere Oberfläche auf, die für die Adsorption von Feuchtigkeit und Sauerstoff zur Verfügung steht. Die Adsorption von Wasser beginnt ab einer Luftfeuchtigkeit von über 55% und erreicht ein Maximum bei 75%. (HOWIE, 1978, S.18) Unter dem Mikroskop erkennt man oxidierte Pyrite dadurch, dass sie einen orangen Schimmer aufweisen. Im Endstadium sind die Oxidationsprodukte ganz aus der Matrix herausgelöst und es bleibt ein Loch zurück. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005)

Pyrit oxidiert an der Luft, jedoch auch unter Wasser. Es finden je unterschiedliche Abläufe statt, die wie bei der Bildung von Pyrit unter der Mithilfe von Bakterien geschehen. Unter Wasser oxidiert Pyrit durch das Mitwirken von *Thiobacillus ferro-oxidans* und wahrscheinlich auch *Thiobacillus thio-oxidans*. Vermutlich finden die verschiedenen chemischen Reaktionen beim Vorhandensein der Bakterien viel schneller statt. (HOWIE, 1978, S.14; NEWMANN, 1998, S. 365) Als Korrosionsprodukte werden als erstes Eisensulfate und elementarer Schwefel gebildet, der sich aber schnell in Schwefelsäure umwandelt, welche wiederum korrosiv für Pyrit ist. Bei der Oxidation an der Luft, wenn der Pyrit Sauerstoff und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, bildet sich ebenfalls Schwefelsäure, aber auch hydratisierte Eisensulfate als Hauptprodukte. Die Gesamtreaktion nach NEWMANN (1998, S. 363) lautet:



Welche Rolle die Bakterien für diese Vorgänge spielen, ist bisher unklar. (HOWIE, 1978, S.15) Die Oxidation beschleunigt sich, wenn Salze vorhanden sind. Die mit der Oxidation verbundene Bildung von Schwefelsäure kann auch andere Bestandteile in Kaustobiolithen beschädigen wie zum Beispiel Kalziumkarbonate oder Bitumen. (RIXON, 1976, S.139)

¹³ Das Färbemittel Safranin O zeigt Affinität mit sauren Carboxylfunktionen, die sich in oxidierten Bereichen der Kohlen neu bilden. Wenig inkohlte Kohlen weisen sowieso noch solche Funktionen auf. (TAYLOR et al., 1998, S. 437f)

Die Konservierung aller pyrithaltigen Spezimen, das betrifft nebst Kaustobiolithen vor allem Fossilien, stellt eine grosse Schwierigkeit dar. Beim fossilen Baum von Beuchille, der 2001 in sandigen Ablagerungen der Molasse im Süden von Delémont entdeckt wurde, sind 30% der ursprünglichen Substanz durch Pyrit ersetzt. Die daraus folgenden Probleme für die Konservierung konnten bis heute nicht gelöst werden. (BECKER/ ROCHAT, 2003, S. 37ff)

Der Gehalt an Pyrit scheint auch den Unterschied zwischen sogenannt hartem und weichem Gagat auszumachen (vgl. 6.1.2). Gagat von guter Qualität, also harter Gagat, enthält vermutlich kein Pyrit, sondern nur Schwefel in organischer Form. Solcher Schwefel ist Atom für Atom in der Kohlenwasserstoffmatrix verteilt, sozusagen wie eine Lösung von Feststoffen, was für die Konservierung unproblematisch ist. Dies könnte die chemische Stabilität von hartem Gagat in feuchten oxidierenden Atmosphären erklären. (WELLER/ WERT, 1993, S.319ff)

Obschon Pyrit ohne Zweifel ein wichtiges Element für die Erhaltung von Kaustobiolithobjekten darstellt, ist die Autorin überzeugt, dass beim hier beschriebenen Problem der Trocknung von grabungsfeuchten Funden andere Faktoren ausschlaggebend sind. Das für die praktische Untersuchung dieser Arbeit verwendete Versuchsstück (vgl. Kapitel 7) enthält grosse Mengen an Pyrit, die, wie man unter dem Mikroskop feststellen kann, völlig unoxidiert sind. Trotzdem spaltete sich das Stück bei der Trocknung. Hingegen ist die Zersetzung von Pyrit verantwortlich für Schäden, die während der Konservierung auf lange Zeit unter ungünstigen klimatischen Lagerungsbedingungen entstehen.

6.2.4 Bitumen

Die Degradierung von Gagat zeigt sich durch eine Abnahme der Intensität der Fluoreszenz, bis sogar zu ihrem Verschwinden. Daneben nehmen auch die Spalten zu und es erscheinen linsenartige bis runde Poren. (LIGOUIS, im Druck, S. 4) Das Bitumen in Gagat, aber auch in anderen Rohmaterialien, bewirkt die Geschmeidigkeit der Werkstoffe. Wenn das Bitumen aus dem Material entfernt wird, verändern sich seine Eigenschaften. Es wird spröde und brüchig. Wenn bei Gagat die Bitumenimprägnierung verschwindet, gleicht er in seiner Zusammensetzung und seinen Eigenschaften dem zerbrechlichen Vitrain. Durch welche Prozesse das Bitumen nebst dem oxidativen Abbau entfernt wird, ist nicht bekannt. Möglicherweise sublimieren wie beim Bernstein fortlaufend gewisse Verbindungen¹⁴. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005)

6.2.5 Wasseraufnahmefähigkeit

Nach PREUSCHOFT-GÜTTLER (1995, S. 20) scheinen solche archäologische Kaustobiolithobjekte, die sich problemlos trocknen lassen, während der Bodenlagerung nur wenig Wasser aufzunehmen. Auch CHAVIGNIER (1990, S. 70) sieht im Verhalten während der Trocknung einen Zusammenhang mit der Wasseraufnahmefähigkeit der Objekte. Möglicherweise wird die Wasseraufnahmefähigkeit des

¹⁴ Bei Bernstein bewirkt die Sublimierung von Kampher und Borneol eine Versprödung. (KOLLER/ BAUMER/ BAUMER, 1997)

Materials durch gewisse Abbauvorgänge beeinflusst. Es ist denkbar, dass die geochemische Inkohlung (vgl. 4.1.2), die ja zum Rückgang des Wassergehalts durch die Verringerung von Poren und die chemische Zersetzung von OH-Gruppen führt, durch Degradierungsprozesse gewissermassen rückgängig gemacht wird.

Wenig inkohlte Kaustobiolithe weisen noch einen so hohen Feuchtigkeitsgehalt auf, dass sie als Rohmaterial für die Verarbeitung zu Schmuck gar nicht erst verwendet werden können. Zum Beispiel kann Braunkohle bis zu 50% ihres Gewichts an Wasser aufnehmen, so dass sie zu zerbröckeln beginnt, sobald sie der Luft ausgesetzt wird. Dies betrifft bereits das bergfrische, undegradierete Material. (HOWIE, 1995, S.51; ALLASON-JONES, im Druck, S. 8) Wenn man solche Braunkohle für geologische Zwecke konservieren will (vgl. BERNER/ TIETZ, 2002), stellt man fest, dass bei der Trocknung Spannungen und schliesslich Risse entstehen, weil die Mazerale je eine unterschiedliche Wasseraufnahmefähigkeit aufweisen. Fusinite und Humusgele (vgl. Tabelle 5) zum Beispiel sind stärker wasserabweisend als andere Mazerale. (BERNER/ TIETZ, 2002, S. 81)

6.2.6 Tonmineralien

Ölschiefer enthalten hygroscopische Tonmineralien. Diese reagieren sehr sensibel auf Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit. Solche Tonlagen schwellen an, indem Wasser adsorbiert wird, weshalb der Schiefer mit der Zeit pulvert und sich laminiert. Das Problem verschlimmert sich noch beim Vorhandensein von kalkigen Salzen. (ALLASON-JONES, im Druck, S. 8; HOWIE, 1978, S. 13) Unter den Tonmineralien, das sind chemisch gesehen hydratisierte Aluminiumsilikate, können besonders Montmorillonite stark schwellen. (ALLASON-JONES, im Druck S. 1; TAYLOR et al., 1998, S.258) Auch Gagat kann Einschlüsse aus hygroscopischen Tonmineralien aufweisen. (CRONYN, 1990, S.294)

6.2.7 Konservierungsmaterialien

Klebstoffe und Lösungsmittel, die in der Konservierung verwendet werden, können Kaustobiolithe noch mehr degradieren. Beobachtungen zeigen, dass organische Lösungsmittel Bestandteile aus den Materialien herauslösen oder diese anschwellen lassen können. Säuren greifen das Material an und zerstören den Oberflächenglanz. Diese sehr komplexen Interaktionen sind bisher nicht vertieft studiert worden. (CHAVIGNIER, 1990, S. 70; DIETRICH, 2004)

6.2.8 Mechanische Degradierung

Gagat ist ein relativ weiches Material und kann von härteren Gegenständen leicht zerkratzt werden. Die Objekte können deshalb vom Gebrauch oder von der Bodenlagerung herrührende Kratzer aufweisen. Beim Reinigen und bei der Lagerung sollten metallische Gegenstände vermieden werden. (MULLER, 1987, S. 65)

6.2.9 Prozesse im Boden

Kaustobiolithe werden im Boden beschädigt, vermutlich indem sie dort wassergesättigt werden. Der anschließende Wasserverlust scheint strukturelle Probleme im Material zu verursachen, die Konservierungsmittel und Lösungsmittel schlecht kompensieren können. (DAVIS, 1988) Vermutlich sind wenig belüftete, feucht-lehmige Böden günstiger für die Erhaltung, da dort Oxidationsvorgänge gebremst werden und ein solches Milieu auch eher den anoxischen Bildungsbedingungen von Kaustobiolithen entspricht.

Kaustobiolithe können auch chemische Verbindungen aufnehmen, die aus dem archäologischen Boden stammen oder von in der Nähe liegenden Objekten. Bei einer bronzezeitlichen Kette, die aus Kännelkohle- und Bleiperlen besteht, wurden in den Kännelkohleperlen erhöhte Bleiwerte gemessen. (DAVIS, HUNTER, LIVINGSTONE, 1995, S. 258) Gewisse aufgenommene Verbindungen könnten sich schädigend auf das Material auswirken, zum Beispiel wenn es sich um Salze handelt, die die Korrosion von Pyrit beschleunigen können.

6.3 Interpretation und Folgerung

6.3.1 Bezug auf die Fragestellung

Ob sich ein Kaustobiolith gut oder schlecht erhält, scheint hauptsächlich durch die Zusammensetzung des Rohmaterials bestimmt zu sein. Obwohl Gagat scheinbar ein beständigerer Rohstoff als andere Kaustobiolitharten ist, kann man bei allen verwendeten Materialtypen besser und schlechter erhaltene Stücke finden. Gewisse Bestandteile, wie Pyrit, hygroskopische Tonminerale und bestimmte Mazerale wie oxidationsanfällige Vitrinite in der Zusammensetzung der Rohmaterialien wirken sich ungünstig auf deren Erhaltung aus. Sie sind aber nicht für das Spalten und Verziehen, das während der Trocknung feuchter und wassergesättigter Kaustobiolithe eintritt, verantwortlich.

Die Prozesse, die Kaustobiolithobjekte so empfindlich gegenüber der Trocknung machen, müssen im archäologischen Boden geschehen, denn sonst würde schon bergfrisches Material sich beim Trocknen spalten. Vermutlich werden dort gewisse organische Bestandteile chemisch verändert. Es werden aber im selben Boden gut und schlecht erhaltene Objekte gefunden, was wiederum aufzeigt, dass es empfindlichere und resistenzere Rohmaterialien gibt.

Wenn bei der Herstellung schon Spalten entstehen, sind die Gründe auch hier im Rohmaterial zu suchen und weniger in den Bearbeitungstechniken. Das Erhitzen beim Schleifen und das Kühlen in Wasser bei der modernen Verarbeitung bringt sogenannten weichen Gagat mit Pyritgehalt schnell zum Spalten, hat hingegen keinen Einfluss bei hartem Gagat. Jedoch könnten Öle, Fette und Wachse, die auch schon in urgeschichtlichen Zeiten für die Politur verwendet wurden, einen Einfluss auf die Konservierung haben.

Das Alter scheint kein Kriterium für die Erhaltung darzustellen, denn man findet sehr schlecht und sehr gut konservierte Funde aus römischen und paläolithischen Zusammenhängen.

Bisher ist auch keine Möglichkeit bekannt, eine Voraussage zu treffen, ob ein erdfeuchter Kaustobiolith bei der Trocknung spalten wird. Vielleicht könnte wie bei archäologischem Nassholz der Wassergehalt ein Indiz sein. Die kohlenpetrografische Rohmaterialanalyse kann sehr nützlich für den Zustandsbeschreibung eines Objektes sein, da Oxidationsvorgänge, die Entfernung von Bitumen und der Zustand der Pyrite erkannt werden können.

6.3.2 Folgerung für die Konservierung

Aus der vorangehenden Auflistung von Zerfallsvorgängen folgen gewisse Vorsichtsmassnahmen, die bei der Konservierung von Kaustobiolithen respektiert werden sollten.

- Kaustobiolithe müssen direkt ab der Grabung nass verpackt und bis zur Behandlung nass zwischengelagert werden. (vgl. WATKINSON, 1987, S.) Bei Kaustobiolithen, die Pyrit enthalten, könnte eine längere Lagerungszeit im Wasser aber zu Schäden führen, da Pyrit auch im Wasser oxidieren kann. Die Behandlung sollte deshalb nicht zu lange herausgezögert werden. Die feuchte Lagerung kann verbessert werden, wenn sauerstoffarmes Wasser verwendet und das Stück im Kühlschrank aufbewahrt wird. Es kann auch ein mildes Biozid eingesetzt werden.
- Es sollte nicht mit apolaren Lösungsmitteln gearbeitet werden, da diese Bestandteile wie Bitumen herauslösen können. Da das Objekt sowieso Wasser enthält, sollte eher auf Wasserbasis oder mit anderen polaren Lösungsmitteln gearbeitet werden. Auch Säuren sind zu vermeiden.
- Bei der Tränkung von pyrithaltigen Spezimen müssen Oxidationsprodukte wie Schwefelsäure zuerst entfernt werden, da diese sonst das Kunstharz zerstören. (HOWIE, 1978, S.15)
- Bei der Reinigung sollte man keine metallischen Werkzeuge gebrauchen, da sonst Kratzer entstehen können.
- Die klimatischen Bedingungen für die Lagerung konservierter Objekte sollten stabil sein und die Luftfeuchtigkeit von 40% nicht übersteigen, wenn die Materialien Pyrit enthalten.

7 Versuche zur Trocknung und Konsolidierung

7.1 Auswahl der Methoden und Produkte

7.1.1 Bisher eingesetzte Methoden und Produkte

Aus der Literaturrecherche und der Befragung von Institutionen ergibt sich eine Auswahl an Methoden und Produkten, die bis heute auf den verschiedenen Kaustobiolithen angewendet worden sind (vgl. Kapitel 2).

Am häufigsten wurde bisher mit PEG gearbeitet. Dieses Produkt hatte sich bei der Nassholzkonservierung bewährt. Da sich feuchte Kaustobiolithobjekte ähnlich wie Nassholz bei der Trocknung problematisch verhalten, lag es sicher Nahe, Methoden bei der schon seit über 50 Jahren erforschten Nassholzkonservierung zu suchen.

7.1.2 Bei verwandten Materialien eingesetzte Methoden und Produkte

Da bisher erst wenige Methoden und Produkte auf Kaustobiolithen zur Anwendung gekommen sind, wurden bei der Auswahl auch solche berücksichtigt, die auf ähnlichen Materialien eingesetzt wurden. Dabei bezieht sich das Wort ähnlich auf eine chemische Verwandtschaft der Materialien mit Kaustobiolithen, auf eine vergleichbare Entstehung, auf eine ähnliche strukturelle Beschaffenheit oder auf ein ähnliches Verhalten bei der Trocknung. In diesem Sinne wurde die Konservierung von Fossilien, Bernstein, Holz, Nassholz und Stein näher angeschaut.

7.1.3 Anforderungskatalog an Methoden und Produkte¹⁵

Oberstes Ziel der Konservierung ist es hier, das mit der Trocknung im Zusammenhang stehende Spalten der Materialien zu verhindern.

Wenn archäologische Kaustobiolithen im Wasser aufbewahrt werden können, ohne Schaden zu nehmen (vgl. 6.2.3), ist dies dennoch keine besonders befriedigende Lösung. Die Stücke sind so nicht ausstellbar und auch die wissenschaftliche Bearbeitung wird behindert. Um überhaupt eine Manipulation zu ermöglichen, müssen Kopien hergestellt werden. Es besteht auch die Gefahr, dass ein Gefäß undicht ist, und die Objekte trotz allem trocknen.

Die verwendete Methode sollte also die Schrumpfung und die Spannungen, die im Material durch den Wasserverlust entstehen, ausgleichen, damit die Kaustobiolithobjekte trocknen können ohne zu spalten.

Daneben müsste ein allenfalls verwendetes Tränkungsmedium auch günstige Voraussetzungen für die Konservierung auf längere Zeit schaffen. Das heisst, es sollte einen Schutz vor Oxidationsprozessen

¹⁵ Die Autorin orientierte sich an BRÄKER/ BILL (1979)

durch Sauerstoff und Feuchtigkeit bieten, denn oft können günstige Aufbewahrungsbedingungen nicht ausnahmslos beibehalten werden.

Die Konservierung sollte auch optischen Kriterien genügen und die wissenschaftliche Auswertung nicht beeinträchtigen. Trotz Tränkungsmedium sollte man polierte und unpolierte Oberflächen voneinander unterscheiden können. Die Farbe und der Glanz sollten sich nicht zu stark verfremden und das Tränkungsmedium sollte auch Materialanalysen nicht beeinträchtigen.

Daraus ergeben sich folgende Ansprüche an verwendete Tränkungsmedium:

Anforderungen an die Stabilisierung

- Verhindert Spaltenbildung, Schrumpfung und Verzug bei der Trocknung
- Bietet Schutz vor zukünftiger Oxidation
- Verschliesst schon bestehende Risse und Mikrorisse, damit das Material gefestigt wird

Anforderungen an die optische Erscheinung

- Oberflächenbearbeitung bleibt sichtbar
- Farbtreue
- Kein verfälschter Glanz

Anforderungen an die chemische Beschaffenheit

- Ist niedrig viskos und weist eine kleine Teilchengröße auf, damit es in die dichte Struktur von Kaustobiolithen eindringen kann
- Haftet gut am Material
- Weist eine maximale chemische Beständigkeit auf
- Sondert keine Stoffe ab, welche die Kaustobiolithe gefährden können

Anforderungen an die Verarbeitung

- Kann auf Basis polarer Lösungsmittel oder auf Wasserbasis verwendet werden, da unpolare Lösungsmittel Bestandteile wie Bitumen aus dem Material herauslösen würden

Anforderungen aus ethischen Gesichtspunkten

- Ist reversibel
- Stellt einen minimalen Eingriff dar
- Enthält keine gesundheitsgefährdenden Stoffe

Zusätzliche Anforderungen

- Anwendbar auch bei Kaustobiolithen, die mit anderen Materialien kombiniert wurden (vgl. 3.4)
- Geringer Aufwand und Kosten

7.1.4 Auswahl

Ein ideales Produkt, das allen oben aufgelisteten Ansprüchen genügt, gibt es nicht. Im Vordergrund steht deshalb der grundsätzliche Vergleich gut bekannter Methoden und Produkte, die sich in anderen Bereichen der Konservierung schon bewährt haben. Die Anforderungsliste soll aber der theoretischen Einschätzung dienen.

Die Testreihe muss trotz systematischem Vorgehen zu einem Teil empirisch bleiben, denn so lange die Zerfallsvorgänge, welche bewirken, dass Kaustobiolithe sich bei der Trocknung so empfindlich

verhalten, nicht erklärt werden können, kann bei der Auswahl von Methoden und Produkten auch nicht darauf Bezug genommen werden. Das Resultat einer solchen Versuchsreihe könnte aber dazu beitragen, bessere Vorstellungen darüber zu erhalten, wie sich das Material verändert hat, indem es spezifische Reaktionen gegenüber gewissen Harzen oder Lösungsmitteln zeigt.

Leider können durch die geringe Menge an Probenmaterial Methoden und Produkte nur in einer beschränkten Anzahl getestet werden und nur mit bestimmten Parametern, wie Konzentrationen, Hitzezufuhr, Lösungsmitteln usw. Die Resultate können also nur Tendenzen aufzeigen, die dann durch weitere Versuchsreihen noch konkretisiert werden müssten.

Es wurden insgesamt elf Konservierungsmethoden ausgewählt:

Einteilung	Methode/ Produkte	Nr. Probestück	Nr. Konservierungsmethode
Trocknungsmethoden	Kontrollierte Trocknung	G28/1; G28/12	KR3
	Gefriertrocknung	G28/2	KR4
Festigung auf Wasserbasis	PEG 4000	G28/3	KR5
	PEG 1000	G28/4	KR6
	PEG 200	G28/5	KR7
	Primal AC 337	G28/6	KR8
	Mowiol 3-83	G28/7	KR9
Festigung auf Lösemittelbasis	Mowital B30H	G28/8	KR10
	Mowilith 30	G28/9	KR11
Festigung anorganisch-organisch	Kieselsäureester Silres BS OH 100	G28/10	KR12
Festigung mit Naturharz	Kanadabalsam	G28/11	KR13
Vergleichsproben	Nasse Probe	G28/17	KR1
	Trocknung ohne Konservierung	G28/18	KR2

Tabelle 11: Ausgewählte Konservierungsmethoden für die Testreihe

Kontrollierte langsame Trocknung

Wahl der Methode: Diese Methode stellt einen Minimaleingriff dar, da kein Produkt verwendet wird. Der Vorteil davon ist, dass man nicht das Risiko von unerwünschten Reaktionen zwischen Festigungsmittel und Objekt in Kauf nehmen muss. Andererseits ist das Stück aber nicht vor weiterer Degradierung durch Oxidationsprozesse geschützt und auch nicht gefestigt. Es sollte daher nach einer solchen Behandlung klimatisiert gelagert werden.

Erfahrungen: Die Methode wurde in einer der befragten Institutionen erfolgreich auf kleineren Kaustobiolithobjekten angewendet.

Prinzip: Durch die langsame Trocknung sollen Spannungen vermindert werden, indem sich die Feuchtigkeit regelmässig verteilen kann. Spannungen können nämlich bei der unkontrollierten

Trocknung zwischen schon trockenen und noch nassen Partien entstehen. (GRATTAN/ CLARKE, 1987, S. 167)

Vorgehen: Das Probestück wird in einem mit Wasser gefüllten Becherglas in einen möglichst luftdicht verschlossenen Plastikkasten gegeben. Im Kasten befinden sich Messgeräte für die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit und ein Stück feuchtes Douglasienholz zum Ausgleich von unerwünschten Klimaschwankungen. (ROTHENHÄUSLER, Pers. Komm., 03.2005) Sobald die Luftfeuchtigkeit im Gefäss nahe bei 100% liegt, wird durch ein Loch im Deckel des Kastens das Wasser im Becherglas mit einer Pipette abgesaugt. Dasselbe Loch wird anschliessend mit Klebeband wenig oder fest verschlossen, damit die Luftfeuchtigkeit regelmässig aus dem Kasten entweichen kann. Über 4 Wochen soll die Luftfeuchtigkeit von nahe 100% auf 50% sinken.

Gefriertrocknung

Wahl der Methode: Bei der Gefriertrocknung ist der Eingriff auf die Substanz ebenfalls klein. Jedoch könnte die Volumenzunahme des Wassers beim Gefrieren in den sehr dichten Kaustobiolithen Schäden verursachen. Auch kann man mit dieser Methode keine Restfeuchtigkeit im Objekt lassen.

Erfahrungen: Gefriertrocknung soll viel versprechend sein für die Konservierung von Gagat und Ölschiefer (DAVIS, Pers. Komm., 02.2005). Ausserdem wird die Methode bei der Nassholzkonservierung breit angewendet.

Prinzip: Die durch den Wasserverlust verursachten Spannungen sollen durch die Sublimierung des Wassers verringert werden. Die Struktur des Materials ist während der Trocknung durch das Eis konsolidiert.

Vorgehen: Das Stück soll im Kühlschrank vorgekühlt werden, damit es anschliessend bei -40°C schnell einfriert, denn dadurch werden die Eiskristalle weniger gross und es entsteht weniger Druck. Es wird anschliessend bei einem Arbeitsdruck von $0,570 \pm 0,050$ mbar und -52°C ¹⁶ gefriergetrocknet, solange bis das Gewicht des Stücks konstant bleibt. (HUG, Pers. Komm., 02.2005)

Polyethylenglykol 4000, bei steigender Konzentration

Wahl der Methode: Der Erfolg von PEG bei der Nassholzkonservierung ist nicht nur dadurch begründet, dass er die degradierten Zellwände festigt, sondern auch, da PEG komplett löslich in Wasser ist¹⁷, weshalb es das Wasser in Zellen vollständig ersetzen kann. Nicht vollständig lösliche Produkte würden auskristallisieren und dadurch das Eindringen der weiteren Lösung verhindern. Dabei dringen hochmolekulare PEG Arten schlechter in ein Material ein, bewirken aber eine stärkere Festigung. Im Vergleich zu anderen Harzen ist das Festigungsvermögen von PEG jedoch eher gering. PEG weist auch Nachteile auf. Es ist sehr hygroskopisch, greift Metalle an, und Oxidation kann PEG depolymerisieren, wodurch es nicht mehr fest ist bei Raumtemperatur. PEG kann bei zu hoher Konzentration ein Objekt ungewollt trocknen, wenn die Diffusion des Wassergehalts in die Lösung schneller ist als die Diffusion der Lösung in das Objekt. (GRATTAN/ CLARKE, 1987, S. 170; HORIE, 1987, 117ff; UNGER, 1990, S. 71)

¹⁶ Temperatur des Kondensators

¹⁷ Ab Molekulargrösse 600 stimmt das aber nur, wenn die Lösung erwärmt wird. (GRATTAN/ CLARKE, 1987, S. 170)

Erfahrungen: Die Methode wurde von ODDY und LANE (1976) mit Erfolg auf Kimmeridge Schiefer angewendet. Auch befragte Konservatoren erhielten mit der Methode gute Resultate.

Prinzip: PEG soll interne Strukturen stabilisieren, damit sie unter dem Wasserverlust nicht kollabieren.

Vorgehen: Das Probestück wird in eine 10% Lösung PEG 4000 in demineralisiertem Wasser gegeben und auf knapp über 60°C erwärmt. Durch das Erhitzen findet die Diffusion und Penetration schneller statt und die Viskosität wird herabgesetzt. Aus dem leicht bedeckten Gefäß verdunstet fortlaufend Wasser. Dieses wird jeweils mit purem PEG ersetzt, so dass das Stück immer mit der Lösung bedeckt bleibt und die Konzentration über 4 Wochen kontinuierlich auf 100% ansteigt. Auf die Tränkung folgt ein langsames Trocknen in einem Kasten mit hoher Luftfeuchtigkeit, bis das Gewicht des Stücks konstant bleibt.

Produkteinformation: PEG 4000 liegt als weisses Pulver vor und ist wasserlöslich. Die Zahl 4000 bezeichnet das hohe Molekulargewicht.

Polyethylenglykol 1000, bei steigender Konzentration

Wahl der Methode: PEG 1000 dringt besser in ein Material ein als PEG 4000, hat aber ein schlechteres Festigungsvermögen.

Erfahrungen: BERNER und TIETZ (2002) haben mit mittelmolekularem PEG Weichbraunkohle erfolgreich gefestigt.

Prinzip: Vgl. PEG 4000

Vorgehen: Vgl. PEG 4000, jedoch soll hier die Konzentration nur auf 50% ansteigen.

Produkteinformation: PEG 1000 ist wachshart und klebrig bei Raumtemperatur und wasserlöslich.

Polyethylenglykol 200, bei steigender Konzentration

Wahl der Methode: Das niedrigmolekulare PEG 200 dringt noch besser in ein Material ein, das Festigungsvermögen ist aber deutlich herabgesetzt.

Erfahrungen: Fossile Baumstämme, nach den jeweiligen Beschrieben zu schliessen handelt es sich vermutlich um Xylithe, wurden mit niedrigmolekularem PEG behandelt. (HOFFMANN/ BLANCHETTE, 1997; TIETZ, 2003)

Prinzip: Das flüssige PEG 200 soll das Probestück in einem dauerhaft geschwellenen Zustand bewahren. (HOFFMANN/ BLANCHETTE, 1997)

Vorgehen: Vgl. PEG 4000, die Konzentration soll aber nur auf 25% ansteigen. Bei zu hoher Konzentration könnte PEG später heraussickern.

Produkteinformation: PEG 200 liegt als eine durchsichtige Flüssigkeit vor und ist wasserlöslich.

Primal AC-337, Acrylemulsion

Wahl der Methode: Acrylharze sind generell stabil gegenüber Oxidationsprozessen. Hier liegt dieses als eine Emulsion vor, mit dem Vorteil, dass auf Wasserbasis gearbeitet werden kann. (KREMER PIGMENTE, 2005; *Primal AC-337*, 1996) Der gewählte Typ AC-337 hat ein kleines Molekulargewicht und gute Penetrationseigenschaften.

Erfahrungen: Primal wird in der Steinrestaurierung eingesetzt (WIHR, 1986, S.122) und dient der Festigung von Wandmalerei und Knochen. (HORIE, 1987, S. 110)

Prinzip: Das Harz soll interne Strukturen stabilisieren, damit sie unter dem Wasserverlust nicht kollabieren.

Vorgehen: Das Probestück wird während 4 Wochen in auf 5% verdünnten Primal gegeben, anschliessend schonend in einem Kasten mit hoher Luftfeuchtigkeit getrocknet, bis das Gewicht des Stückes konstant bleibt.

Produkteinformation: Primal ist eine milchig weisse, wasserverdünnbare Flüssigkeit. (Sicherheitsdatenblatt Primal AC-337, 2002)

Mowiol 3-83, Polyvinylalkohol

Wahl der Methode: Mowiol ist in Wasser löslich. Durch einen PVAL Film kann nur wenig Luftsauerstoff dringen, es bietet also einen guten Schutz vor Oxidation. Es wird auch nur wenig durch Sauerstoff und ultraviolette Strahlung abgebaut. Hingegen ist es hygroskopisch und kann Wasserdampf absorbieren. In Gegenwart von Metallsalzen kann PVAL sich vernetzen und unlöslich werden. (HORIE, 1987, S. 99; *Kunsthharze Hoechst, 1990*)

Erfahrungen: Mowiol führte bei der Konservierung von Nassholz zu einer geringen Verbesserung der Dimensionsstabilität. (UNGER, 1990, S. 112)

Prinzip: Vgl. Primal

Vorgehen: Vgl. Primal

Produkteinformation: Mowiol ist eine milchige, wasserlösliche Flüssigkeit

Mowital B30H, Polyvinylbutyral

Wahl der Methode: Damit dieses nicht wasserlösliche Harz eingebracht werden kann, muss man zuerst das Wasser im Probestück durch Ethanol ersetzen. Dies kann einen Vorteil darstellen, denn Ethanol hat eine geringere Oberflächenspannung als Wasser und eine tiefere Viskosität, was eine bessere Diffusion und Penetration vom Kunstharz bewirkt. (GRATTAN/ CLARKE, 1987, S. 166) Mowital gibt feste Filme mit guter Lichtbeständigkeit. Der Typ B30H hat ein geringes Molekulargewicht und bildet niedrig viskose Lösungen, weshalb er gut in einen Werkstoff eindringt. (*Mowital*, 2003) Bei der Anwendung auf Holz wird die Oberfläche nur gering verändert und das Aussehen bleibt natürlich. (UNGER, 1990, S.112) PVB kann aber beim Vorhandensein von Säuren unlöslich werden. (HORIE, 1987, S. 100)

Erfahrungen: Polyvinylbutyral wird für die Konservierung von Fossilien eingesetzt und für das Kleben von Holz. (HORIE, 1987, S. 100) PVB wurde bei der Konservierung von grabungsfeuchten Kämmelkohleperlen angewendet und führte zu einem guten Resultat. (DAVIS/ HUNTER/ LIVINGSTONE, 1995)

Prinzip: Vgl. Primal

Vorgehen: Das Wasser im Probestück wird progressiv durch Alkohol ersetzt. Das erste Bad in 80% Ethanol und 20% Wasser dauert einige Tage, dann finden drei Bäder in 100% Ethanol statt, die auch je einige Tage dauern. Insgesamt werden für den Austausch des Wassers durch Ethanol 10 Tage

eingerechnet. Erfahrungen im Landesmuseum in Zürich zeigen, dass nach drei Bädern in purem Ethanol in der Regel bei Nassholz sämtliches Wasser entfernt ist. (ANDRE, Pers. Komm., 03.2005). Nach jedem Bad wird die Alkoholkonzentration mit einem Alkoholometer überprüft. Nach vollendetem Alkoholaustausch wird das Probestück während 3 Wochen in 5% Mowital in Ethanol gegeben, und schliesslich schonend in einem Kasten mit hoher Sättigung an Ethanol getrocknet.

Produkteinformation: Mowital B30H liegt als Pulver vor und löst sich in Ethanol.

Mowilith 30, Polyvinylacetat

Wahl der Methode: PVAC ist eines der stabilsten Kunstharze gegenüber Lichtalterung. Trotz anderer Oxidationsvorgänge bleibt PVAC löslich. (HORIE, 1987, S. 92ff) Mowilith haftet gut auf porösen und nichtporösen Stoffen. (UNGER, 1990, S. 111) Der Typ 30 gibt einen harten Film, hat aber eine niedrige Viskosität bei der Verarbeitung. (*Mowilith 30*, 1999)

Erfahrungen: Bei Holz ist die Durchtränkung eher mittelmässig. (UNGER, 1990, S. 111) Mowilith führte zu guten Resultaten bei der Tränkung von Bernstein. (JEBERIEN, 2000, S. 56)

Prinzip: Vgl. Primal

Vorgehen: Vgl. Mowital

Produkteinformation: In Alkohol lösliches Polyvinylacetat, liegt als Granulat vor.

Silres BS OH 100, Kieselsäureester

Wahl der Methode: Kieselsäureester kann in Ethanol gelöst werden. Er dringt gut ein, da er niedrigviskos ist. Der Angriff von Säuren, Laugen und Salzen setzt seine Beständigkeit herab. KE ist nicht reversibel. (WIHR, 1986, S. 114; *Silres BS OH 100*, 2003; *Sicherheitsdatenblatt SILRES BS OH 100*, 2005)

Erfahrungen: Dieses Produkt wird bei der Steifigung breit angewendet.

Prinzip: Vgl. Primal

Vorgehen: Vgl. Mowilith

Produkteinformation: KE ist eine durchsichtige, farblose, lösemittelfreie Flüssigkeit.

Kanadabalsam, natürliches Polymer

Wahl der Methode: Kanadabalsam ist ein stark klebriges Tannensekret, das hauptsächlich aus Diterpenen besteht. Seine Zusammensetzung ist variabel, da es sich um ein natürliches Harz handelt. (JEBERIEN, 2000, S 52) Das Harz wird für Mikroskopiepräparationen verwendet, da es stabil ist gegenüber Abbauprozessen. (STRAUB, Pers. Komm., 09.2004; *Sicherheitsdatenblatt Kanadabalsam*, 2003)

Erfahrungen: Armringe aus Kaustobiolithen wurden laut Umfrage mit Kanadabalsam gefestigt.

Prinzip: Vgl. Primal

Vorgehen: Vgl. Mowilith

Produkteinformation: Das Produkt ist zähflüssig, bräunlich bis gelb und in Ethanol löslich.

7.2 Auswahl des Probematerials

7.2.1 Schwierigkeiten

Die Hauptschwierigkeit bei der Erforschung von Zerfallsgründen bei Kaustobiolithen und bei der Durchführung konservatorischer Testreihen ist, dass archäologische Objekte aus solchem Material eher selten sind. Das Austesten von Konservierungsmethoden oder die Untersuchung der Gründe für den Abbau solcher Objekte, würden diese unwiderruflich beschädigen. Untersuchungen auf archäologischem Material sind aber nötig, denn geologische Proben haben unterschiedliche Eigenschaften, da sie nicht mit den verschiedenen Techniken bearbeitet wurden, da sie nicht getragen wurden und somit nicht mit Körperfett in Berührung kamen, und vor allem da sie keine Abbauprozesse während der Eingrabung erlebt haben. (ALLASON-JONES, im Druck, S.9)

Eine zweite Schwierigkeit hängt mit der grossen Heterogenität der Materialien zusammen. Es müssten auf jedem Rohmaterialtypen Untersuchungen und Konservierungsversuche durchgeführt werden, da die Abbauprozesse und der Erfolg von Konservierungsmethoden mit der Zusammensetzung des Materials in Verbindung stehen. Auch dann noch wäre es schwierig, die erzielten Resultate auf ein anderes Objekt desselben Rohmaterialtyps zu übertragen. Die Unterschiede in der Zusammensetzung innerhalb einer Rohmaterialart können beträchtlich sein. Zusätzlich können sich die Stücke noch durch eine gute oder schlechte Erhaltung unterscheiden.

7.2.2 Beschrieb und Einschätzung des gewählten Stückes

Hier wurde trotz den vorher genannten Einwänden ein geologisches Probestück für Konservierungsversuche verwendet. Es handelt sich um ein Stück Vitrain, das in der Nähe von Delémont in der Birs gefunden wurde (BIGLER, Pers. Komm., 03.2005). Das Probestück befand sich also nicht in seiner originalen geologischen Schicht, wo es gebildet wurde, sondern in einem ihm fremden Milieu. Dies bedeutet, dass das Stück in einer gewissen Weise auch eine archäologische Vergangenheit hat und Abbauprozesse in einem spezifischen Milieu erlebt hat. Diese Situation rechtfertigt es, trotz den vorher beschriebenen Nachteilen ein geologisches Stück für Testreihen zu verwenden. Ein weiterer Vorteil ist, dass Vitrain einem archäologisch degradierten Gagat in seiner Zusammensetzung vermutlich sehr ähnlich ist. Degradiertes Gagat fluoresziert unter dem Mikroskop kaum noch, was ein Hinweis darauf ist, dass die Bitumenimprägnierung weit gehend abgebaut wurde. Vitrain ist sozusagen Gagat ohne Bitumenimprägnierung (vgl. 4.2.8). Die Ergebnisse der Versuchsreihe könnten also möglicherweise gut auf degradierten Gagat und auf Vitrain übertragbar sein, vermutlich auch auf Sapropelkohlen, die zwar keinen Holzvorgänger haben, jedoch wie Gagat und Vitrain sehr dicht sind und kaum Mineralien enthalten. Die Übertragbarkeit auf Sapropelite und Ölschiefer ist wegen der mineralischen Bestandteile wahrscheinlich nur beschränkt gegeben. Noch schlechter übertragbar werden die Resultate auf die porösen, wenig inkohlten und in der Chemie deutlich verschiedenen Xylithe und Lignite sein.

7.2.3 Geologische Herkunft

Da das Vitrainstück nicht in seiner ursprünglichen Schicht gefunden wurde, kann man über seine geologische Herkunft nur Vermutungen anstellen. In der alsässischen Molasse im Tal von Delémont ist eine mergelige bis tonige Sandschicht vorhanden, in der fossile Hölzer oder Holzreste zu finden sind. Diese Sedimente, reich an organischer Materie, stammen aus einer paläoökologischen Überschwemmungszone mit wenig Energie. (BEDER/ LEPERLE, im Druck) Da man Vitrain vor allem in Molasseschichten findet (Verweis), kommen diese Sedimente der alsässischen Molasse gut als Herkunftsort des Probestücks in Frage. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005)

7.2.4 Kohlenpetrografische Analyse

Beim Material von der Birs handelt es sich um eine ungefähr 1cm dicke schwarze, homogene Platte, die in der Grösse ungefähr eine Handfläche ausmacht. Von Auge war die genaue Bestimmung dieses Kaustobiolithen nicht möglich. Da im Querschnitt eine Struktur sichtbar ist, die komprimiertem Holzgewebe gleicht, und da der Bruch muschelartig ist mit halbgänzender bis glänzender Bruchfläche, kamen Rohmaterialarten wie Xylith und Lignit nicht in Frage.

Dank der kohlenpetrografischen Analyse konnte das Probestück als Vitrain angesprochen werden. Unter dem Mikroskop war eine gut erhaltene Holzstruktur deutlich erkennbar, deren Zellen vergelt und stark komprimiert erschienen (Bild 37 und Bild 38). Für Kaustobiolitharten mit Holz als Vorgängermaterial gibt es nur drei Möglichkeiten: Xylith, Vitrain oder Gagat. Xylith hat noch keine vergelten Zellwände und kann deshalb ausgeschlossen werden. Für Gagat müsste das Holzgewebe fluoreszieren, da es mit Bitumen imprägniert ist. Hier war aber keine Fluoreszenz sichtbar, weshalb es sich eindeutig um Vitrain handelt. Dementsprechend können die vorhandenen huminitischen Mazerale als Corpohuminite (Gel das Poren füllt) und Ulminite (bezeichnet die sichtbare Zellstruktur) (vgl. 4.1.3) angesprochen werden. An liptinitischen Mazeralen ist nur Exsudatinit zu verzeichnen. Da Exsudatinit vorhanden ist, muss der Inkohlungsgrad beim Beginn des Öffnensterns (vgl. 4.1.2) liegen, also am Übergang von Braunkohle zu Steinkohle.

Unter den mineralischen Bestandteilen waren grosse Mengen an Pyrit vorhanden. Dieser war als helle Bänder sogar von Auge sichtbar. Einerseits konnte durch bakterielle Aktivität entstandener framboider Pyrit in der Matrix ausgemacht werden, andererseits war massiver Pyrit sichtbar, der in Spalten aus eisen- und schwefelionenreichem Wasser auskristallisiert war. Die auch von Auge sichtbaren Pyritbänder zeigten unter dem Mikroskop eine besonders interessante Struktur. Es handelt sich um eine Pseudomorphose, das heisst, das Holzgewebe wurde in diesen Bereichen vollständig durch Pyrit ersetzt, und dies schon in einem frühen Stadium der Inkohlung, weshalb die Zellen nicht komprimiert sind.

Strukturell gesehen kann man das Material als sehr dicht bezeichnen. Es sind keine Poren erkennbar. Falls doch welche existieren, müssen diese im submikroskopischen Bereich liegen. Unter dem Mikroskop ist hingegen ein dichtes Netz an Spalten sichtbar. Da das Probematerial vor der Einbettung in Kunstharz mit Silikagel vollständig und ohne jede Vorkehrung getrocknet wurde, entspricht dieses

Bild einem unkonservierten Objekt. Es können verschiedene Typen an Spalten beobachtet werden, solche, die der Zellstruktur folgen, solche, die die Zellstruktur durchtrennen und solche, die an den Grenzen der Mazerale Corpohuminit und Ulminit erfolgen. Die Breite der Spalten liegt im Mikrometerbereich. (LIGOUIS, Pers. Komm., 04.2005)



Bild 37: Mikroskopaufnahme des Probematerials. Es sind verschiedene Arten an Spalten erkennbar.

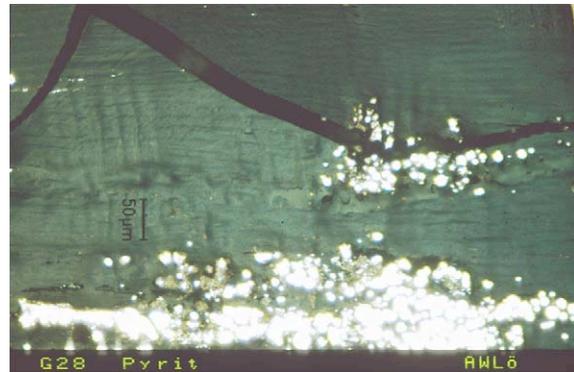


Bild 38: Mikroskopaufnahme des Probematerials. Pyrit ist in grossen Mengen vorhanden.

7.2.5 Holzanatomische Analyse

Zur holzanatomischen Bestimmung des Probestücks wurde ein Abschnitt an Herrn Werner Schoch geschickt. In dem Probestück sind kaum mehr anatomische Details erhalten geblieben, die eine genaue Bestimmung des Holzvorgängers erlauben würden. Nadelholzstrukturen sind aber eindeutig in den pyritisierten Partien vorhanden. Auf den Tracheiden sind Hoftüpfel erkennbar, ebenso entsprechende Markstrahlzellen. Feinstrukturen waren nicht erkennbar, weshalb die Bestimmung nur auf die Klasse Coniferopsida, also Nadelholz lautet. (SCHOCH, Pers. Komm., 08.2005)

7.3 Aufbau und Durchführung der Versuchsreihe

7.3.1 Vorbereitung der Probestücke

Das Vitrainstück wurde mit einer Steinsäge in 18 Probestücke gesägt. Jedes Probestück ist ungefähr 3cm lang und 1cm breit. Die Höhe, das heisst eigentlich die Dicke der ursprünglichen Platte, wurde beibehalten und beträgt also knapp 1cm. Die Grösse der Probestücke wurde so gewählt, weil dies gut archäologischen Schmuckstücken wie Armreifen usw entspricht. Nebst den Probestücken wurden auch 8 Abschnitte für Materialanalysen aufbewahrt.

Die Probestücke wurden in verschliessbaren Glasbehältern in demineralisiertem Wasser aufbewahrt. In diesen Gefässen fanden dann auch die Tränkungen statt.



Bild 39: Zersägtes Probestück Vitrain, Nr. G28

7.3.2 Dokumentation vorher

Die Probestücke konnten auf den zur Verfügung stehenden Apparaturen nicht genau gleich gross gesägt werden. Ihre Dimensionen wurden darum mit einer Schieblehre auf den Zehntelmilimeter genau ausgemessen, um die Dimensionstreuung nach der Konservierung bewerten zu können. Auch das Gewicht der Stücke wurde vermerkt. Die Proben wurden ausserdem gezeichnet und fotografiert, wodurch schon bestehende Spalten aufgenommen wurden. Damit sollte vermieden werden, dass solche Spalten fälschlicherweise einem Versagen der Konservierungsmethode zugeschrieben wurden. In der Zeichnung konnten auch strukturelle Merkmale verzeichnet werden, wie sichtbare Pyritkristalle oder eine sandige Kruste auf der natürlichen Oberfläche der Stücke. Solche Unterschiede könnten nämlich das Resultat der Konservierung beeinflussen. Von jedem Stück wurde auch seine Position im Gesamtstück vermerkt.

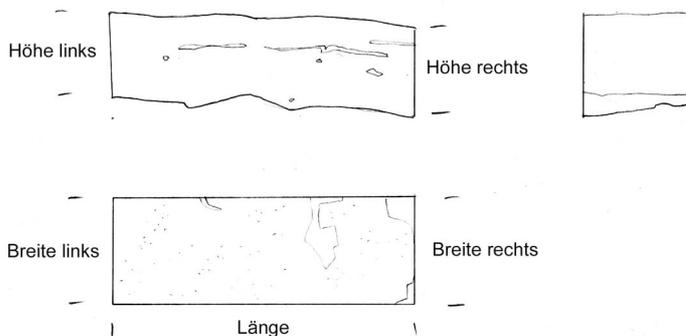


Bild 40: Zeichnerische Dokumentation der Versuchsstücke

7.3.3 Trocknung ohne Konservierung als Vergleichsbasis

Damit es möglich war, eine Vorstellung davon zu erhalten, was geschieht, wenn man einen Kaustobiolithen ohne Konservierung trocknen lässt, wurde dies an einem Probestück Vitrain dokumentiert. Es wurde bei einer Raumtemperatur von 23°C und bei einer Luftfeuchtigkeit von 42% an einer vor Sonnenstrahlung und Luftzug geschützten Stelle trocknen gelassen. Jede halbe Stunde wurde das Stück ausgemessen, gewogen und fotografiert. Da in einem Arbeitstag die Trocknung noch nicht abgeschlossen war, wurde das Stück über Nacht luftdicht eingepackt und die Trocknung am nächsten Tag weitergeführt.

Es war erstaunlich zu sehen, wie schnell die Degradierung bei diesem Material einsetzte. Nach nur 15 Minuten Trocknungszeit entstanden bereits erste Spalten. Auf der ersten Fotografie nach 30 Minuten sind diese schon deutlich sichtbar. Nach nur einer Stunde Trocknung sind klaffende Spalten vorhanden, die so stark ausgeprägt sind, dass sie auch durch eine Klebung oder Tränkung nicht mehr verschlossen werden könnten. Nach sechs Stunden ist der Endzustand bezüglich der Spaltenbildung erreicht, obschon die Trocknung noch nicht abgeschlossen ist, wie die stetige Gewichtsabnahme zeigt. Erst nach 32 Stunden Trocknung bleiben das Gewicht und die Dimensionen konstant. Das Spaltenbild ist nach der vollständigen Trocknung eher besser als nach sechs Stunden, da sich die Spalten wenig geschlossen haben.

Dieser Versuch zeigt, falls dieses Stücks Vitrain sich analog zu anderen Kaustobiolitharten verhält, dass eine Chance, solche Objekte zu konservieren nur dann besteht, wenn diese direkt auf der Grabung geschützt und feucht aufbewahrt werden.

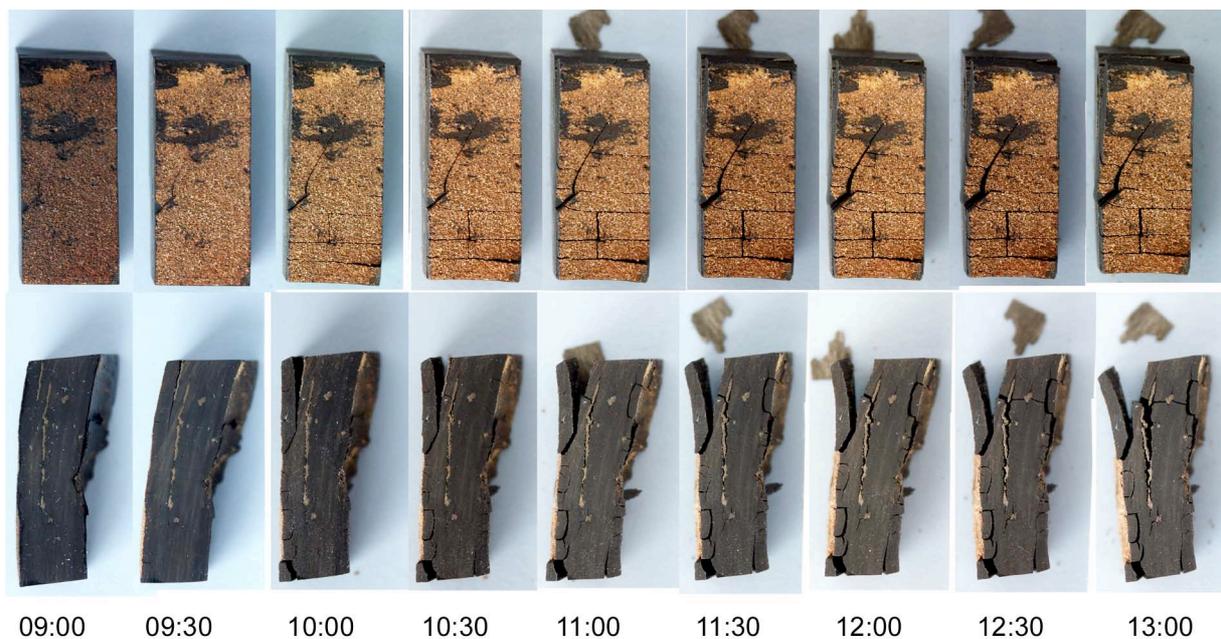


Bild 41: Zerstörung des Probestücks G28/18 durch die Trocknung (ca 1:1)

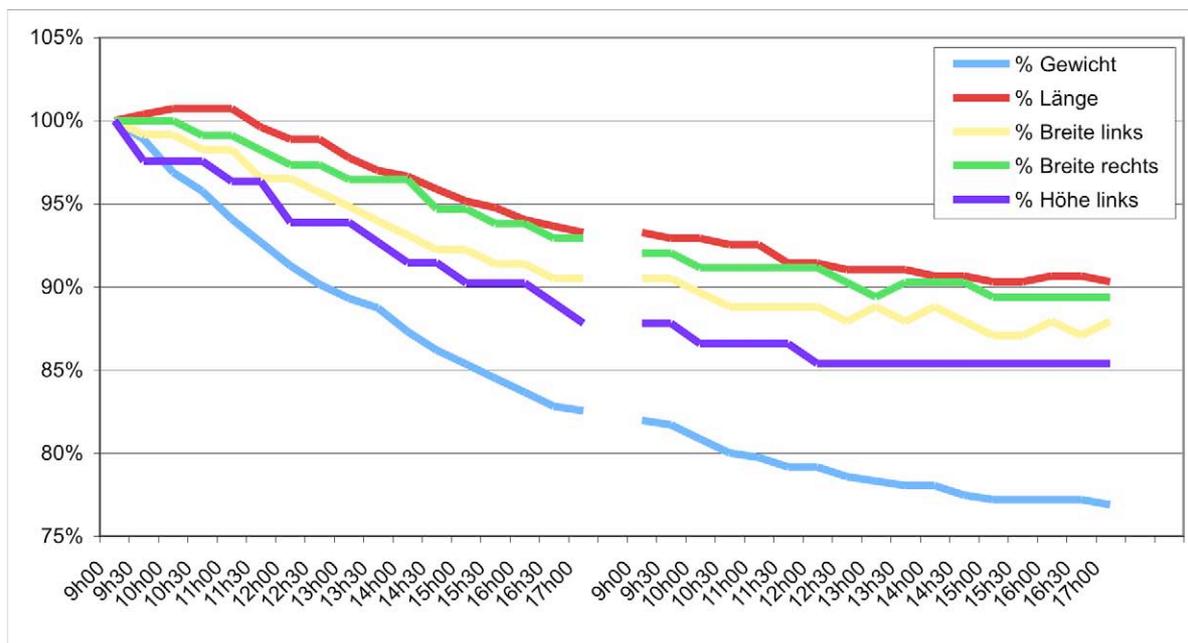


Bild 42: Prozentuale Dimensions- und Gewichtsveränderungen durch die Trocknung bei Stück G28/18

Nebst dem Verlauf der Degradierung wurde an diesem Stück auch der prozentuale Wassergehalt ermittelt, indem das lufttrockene Stück im Ofen darr getrocknet wurde. Der totale Wassergehalt wurde nach der Methode UNGER (1990, S. 145) ermittelt und beträgt 37% des Ausgangsgewichts. Im Vergleich zu Nassholz ist dies eher gering, da wassergesättigtes Eichenholz einen Wassergehalt von über 80% aufweisen kann (UNGER, 1990, S. 15f). Der Wasserverlust beim raumtrockenen Stück beträgt nur 25%. Lässt man das darrgetrocknete Stück bei Raumklima stehen, nimmt dieses wieder Feuchtigkeit auf, erreicht aber nicht wieder den vorher genannten Wert.

7.3.4 Behandlungen

Je ein Probestück stand für die Durchführung der unter Kapitel 7.1.4 aufgelisteten Methoden zur Verfügung (vgl. Bild 43). Als Vergleich blieb ein Stück nass und ein weiteres Stück wurde, wie vorher beschrieben, ohne Konservierung getrocknet. Alle nicht verwendeten Stücke waren als Reserve gedacht, falls eine Methode aus irgendwelchen Gründen wiederholt werden musste.

Die Behandlungen wurden durchgeführt wie unter 7.1.4 beschrieben. Die Tränkungen dauerten je einen Monat. Diese Tränkungsdauer wurde mit Per Hoffmann diskutiert, der grosse Erfahrungen mit der Behandlung von Nassholz hat. (HOFFMANN, Pers. Komm., 03.2005) Die Lösungen wurden während dieser Zeit ab und zu gerührt. Bei den PEG Tränkungen wurde über das Gewicht regelmässig die Konzentrationssteigerung überprüft und wenn nötig durch Öffnen und Schliessen der Gefässdeckel oder Nachgeben von PEG reguliert.

In der Übersicht ergab sich folgender schematischer Ablauf:

- Das Wasser durch Ethanol ersetzen für ethanollösliche Produkte

- Die Probestücke in das Tränkungsmedium geben
- Während der Tränkungszeit regelmäßig kontrollieren und ab und zu umrühren
- Herausnehmen und in den wassergesättigten, bzw. ethanolgesättigten Trocknungskasten geben
- Die Trocknung durch die Gewichtskontrolle überprüfen und evtl. überschüssige Produkte entfernen
- Die fertig behandelten Stücke dokumentieren



Bild 43: Probestücke in den Behältern für die Behandlung

7.3.5 Dokumentation nachher

Genau wie vor den Versuchen wurden wieder die Dimensionen gemessen und das Gewicht aufgenommen. Sämtliche Stücke wurden auch fotografiert, indem auf möglichst ähnliche Bedingungen wie bei den Fotografien vor der Konservierung acht gegeben wurde, um gut vergleichbare Bilder zu erhalten. Der Zustand nach der Konservierung wurde nicht neu gezeichnet, jedoch ausführlich beschrieben, wobei Kriterien wie Spaltenbildung, Fragilität, Deformierung, Oberflächenbeschaffenheit, Farbe und Glanz berücksichtigt wurden.

7.4 Resultate und Auswertung

7.4.1 Kriterien

- Kann das Konservierungsverfahren das Spalten, Schrumpfen und Verformen, das normalerweise während der Trocknung eintritt, effizient verhindern?
- Ist das Stück so gefestigt, dass es normal gehandhabt werden kann?
- Entsprechen die Oberflächeneigenschaften, die Farbe und der Glanz der Bearbeitung des Stückes und dem verwendeten Rohmaterial?
- Gewährt die Festigung eine Stabilisierung auf lange Zeit?

Zum letzten Punkt können hier keine Aussagen gemacht werden. Die konservierten Probestücke müssten dafür jetzt über längere Zeit, die hier nicht zur Verfügung steht, beobachtet werden und erneut die Dimensionstreu und Spaltenbildung überwacht werden.

7.4.2 Vergleich der Masse

Der Erfolg der Konservierungsverfahren soll ausser über sichtbare Veränderungen auch objektiv über die Überprüfung von Dimensionen und Gewicht bewertet werden. Die Daten können aber nur Tendenzen aufzeigen und sind nicht geeignet, um Statistik zu betreiben, da dafür jeder Versuch mehrere Male hätte durchgeführt werden müssen. Dazu stand aber nicht genug Probematerial zur Verfügung.

Auf Grund der Dimensionstreu stechen 2 Resultate ganz klar hervor. PEG 1000 liefert bei 5 Messungen 4 mal das beste Resultat und einmal das zweitbeste, und PEG 4000 weist 4 mal das zweitbeste und einmal das beste Resultat auf. Kanadabalsam kann als nächst erfolgreiches Tränkungsmittel auf Grund der Dimensionstreu gelten. Am schlechtesten schnitten die Gefriertrocknung und die kontrollierte Trocknung ab. Das Einbringen eines Produktes scheint also für die Dimensionsstabilität von Vorteil zu sein. Bei allen konservierten Stücken ist die Dimensionstreu aber besser als bei dem Vergleichsstück, das an der Luft getrocknet wurde.

Die Dimensionsmessungen lieferten im Allgemeinen gut auswertbare Daten. Nur die Höhenmessungen sind weniger verlässlich, da sie zum Teil durch Schollenbildung verfälscht wurden.

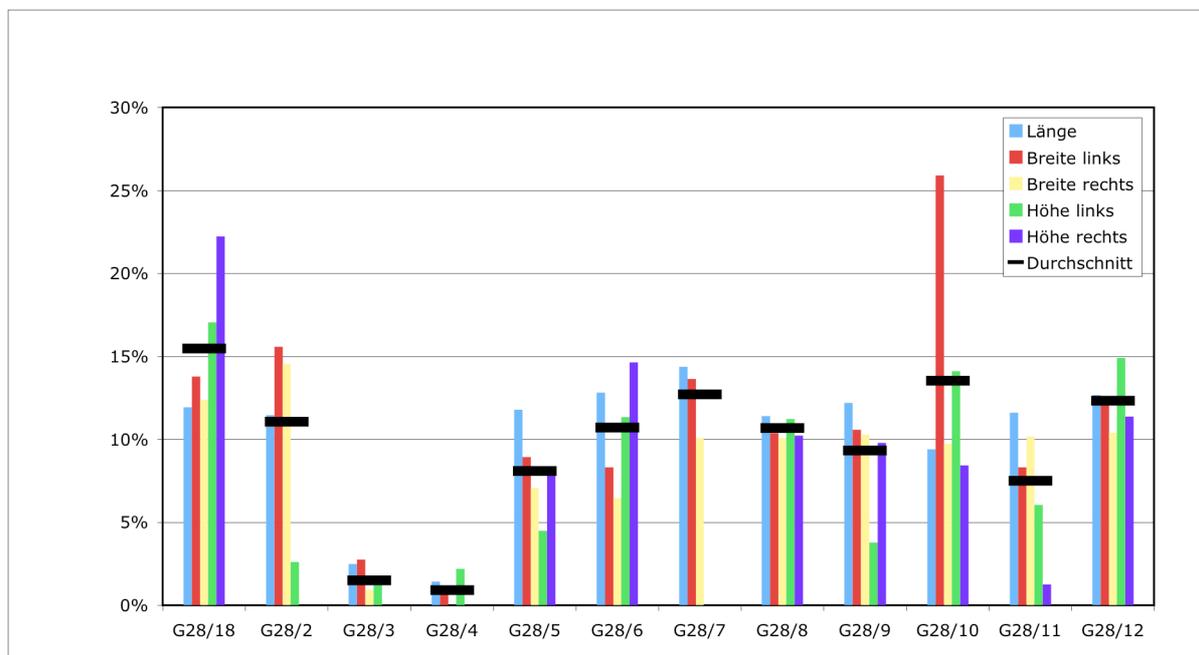


Bild 44: Dimensionstreu



Bild 45: Die Probestücke im nassen (links) und im konservierten (rechts) Zustand. Die besten Resultate zeigen PEG 4000 und Peg 1000.

Die Gewichtszunahme durch das Tränkungsmedium kann schlecht bewertet werden, da das Material als Ausgangslage mit Wasser vollgesogen war. Man kennt das Trockengewicht also nicht und kann es auch nicht sicher ausrechnen. Man kann feststellen, dass bei PEG 4000 und 1000 das Gewicht nach der Behandlung fast dem Nassgewicht entspricht. Das würde bedeuten, dass das Wasser vollständig durch das Tränkungsmedium ausgetauscht wurde. Die restlichen Produkte zeigen eine deutliche Gewichtsabnahme gegenüber dem nassen Zustand, bleiben aber prozentual gesehen knapp über dem Trockengewicht des Vergleichstücks. Dies scheint deutlich aufzuzeigen, dass die Produkte aufgenommen wurden. PEG 200 und Kieselsäureester zeigen nach PEG 4000 und 1000 die grösste Gewichtszunahme. Kieselsäureester weist ein kleines Molekül auf, deshalb könnte der Gewichtswert aufzeigen, dass die Eindringung in das Material besonders gut war. Dies steht aber im Gegensatz zu den unbestritten besten Resultaten mit PEG 4000 und 1000, die eine grosse Teilchengrösse aufweisen. Andererseits war die Konzentration bei PEG 4000 und 1000 höher als bei allen anderen Produkten. Nach dem Endgewicht zu schliessen wäre Kanadabalsam besonders schlecht eingedrungen, seine Bewertung bei der Dimensionsstabilität zeigt aber eine relativ gute Wirkung des Produkts. Es muss also doch eingedrungen sein. Insgesamt zeigte sich, dass das Gewicht keine sehr aussagekräftige Grösse ist, um den Erfolg der Methoden zu beurteilen.

7.4.3 Vergleich sichtbarer Unterschiede

Die Stabilität wird bei PEG 4000 und 1000 am besten bewertet, auch Mowital, Mowilith, Kanadabalsam und die kontrollierte Trocknung führten zu einem manipulierbaren Resultat, jedoch stehen Pyritkristalle vor, da die Dimensionstreuung bei den genannten Methoden schlechter war. Die organische Matrix ist also geschrumpft, während die mineralischen Pyrite ihre Dimensionen beibehielten. Mowiol und Gefriertrocknung führten zu zerbrochenen, nicht manipulierbaren Proben.

Obschon bisher bei PEG 4000 und 1000 für die meisten Kriterien die besten Resultate zu verzeichnen waren, ist aber deren Formstabilität am schlechtesten. Die gesägten Flächen dieser Proben waren nach der Konservierung eindeutig konkav verformt. Bei allen anderen Proben war diese Tendenz ebenfalls sichtbar, jedoch weniger ausgeprägt.

Spalten entstanden bei fast allen Proben in der Richtung der Pyritkristalle, was sich logischerweise als Spannung zwischen einem Material, das schrumpft und einem das nicht schrumpft, erklären lässt. Durch die gute Dimensionstreuung sind es wiederum PEG 4000 und 1000, die die besten Resultate aufweisen, und Gefriertrocknung, die als schlechtestes Resultat abschliesst. Bei Mowilith und Mowital scheinen sich viele, aber nur feine Risse gebildet zu haben.

Zur Einschätzung von optischen Kriterien kann bei diesem Material als gut gelten, wenn die Sägespuren der Probenvorbereitung analog zu archäologischen Bearbeitungsspuren sichtbar geblieben sind, wenn das materialbezogene Erscheinungsbild holzig matt bis seidenmatt erscheint, und wenn die Farbe homogen und braunschwarz ist.

Das Erscheinungsbild von PEG 4000 und 1000 wird durch PEG 200 und Mowiol übertroffen, die eine homogene, natürlich holzige, seidenmatt Oberfläche zeigen. Schlechte Oberflächen bewirkten die Gefriertrocknung mit einem sehr spröden Aussehen, Kieselsäureester durch eine graue Verfärbung

und Primal durch weisse Schlieren. Bei Mowilith und Mowital ist sichtbar Kunstharz wieder ausgetreten und hat sich an der Oberfläche angesammelt.

7.4.4 Nachweis der Resultate mit dem Rasterelektronenmikroskop

Es wurde nach einer Möglichkeit gesucht, folgende Fragen zu der Versuchsreihe zu beantworten:

- Wie tief ist das jeweilige Konservierungsmittel eingedrungen?
- Wo befindet es sich? In Spalten, Poren oder Hohlräumen? In den Resten an Zellwänden? In grossen oder kleinen Zwischenräumen?
- Kann der Erfolg oder Misserfolg von Methoden begründet werden?

Es wurden verschiedene Untersuchungsmethoden in Betracht gezogen. Dünnschliffe gewähren den Einblick in ein Material, es ist aber sinnlos aus Kaustobiolithen Dünnschliffe herzustellen, da das Material opak bleibt und man nichts sehen kann. Auch könnte das Einbettungsharz sich schlecht vom verwendeten Tränkungsmedium unterscheiden. Mit dem Einbringen eines Färbemittels kann dieses Problem auch nicht gelöst werden. Man kann nämlich nur beweisen, wo sich das Färbemittel befindet, da dieses möglicherweise ein anderes Eindringungsverhalten hat als das Kunstharz. In der Nassholzkonservierung hat man bereits versucht, Tränkungsmedium, oder insbesondere PEG, nachzuweisen. Für PEG gibt es einen möglichen Nachweis über die Fluoreszenz. Nassholz fluoresziert normalerweise, weist aber dort, wo es mit PEG getränkt wurde, keine Fluoreszenz mehr auf. Diese Methode kann leider bei Kaustobiolithen nicht angewendet werden, denn bei diesen Materialien fluoreszieren nur Liptinite. Rohstoffe ohne diese Mazerale, wie im Fall des hier verwendeten Probematerials aus Vitrain, oder Rohmaterialien, die degradiert wurden, fluoreszieren auch ohne Tränkungsmedium nicht. (LIGOUIS, BURKHARD, HOFFMANN, HUG, Pers. Komm.)

Schliesslich entschied die Autorin sich für eine Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop REM. Diese Methode ermöglicht einen Einblick in die Materie, der es erlaubt, auch kleinste Poren und Spalten zu erkennen. Durch die Koppelung mit energiedispersiver Röntgenanalytik EDX sind auch Messungen der chemischen Zusammensetzung des Materials möglich. HOFFMANN und BLANCHETTE (1997) haben mit dem REM erfolgreich das PEG in den Zellwänden eines fossilen Baumstammes nachweisen können.

Es wurden die mit PEG 4000, PEG 1000 und Gefriertrocknung konservierten Proben angeschaut. Leider zeigte sich, dass die Methode nur wenig erfolgreich war, um das Tränkungsmedium nachzuweisen. Vorhandene Spalten zeigten starke Randeffekte, das heisst, es entsteht eine Überbelichtung, weil am Rand eines Spaltes verhältnismässig zu viele Elektronen auftreffen, was als helle Schlieren sichtbar wird. Das Bild wurde dadurch stark verfälscht, so dass man nicht feststellen konnte, ob sich Tränkungsmedium in den Spalten abgelagert hatte. Auch Messungen der chemischen Zusammensetzung in den Spalten blieben ohne Erfolg, denn diese können durch ein anarchisches Auftreffen der Elektronen ebenfalls verfälscht sein. Auch zeigte es sich, dass die Resistenz des Materials gegenüber dem Elektronenstrahl sehr schwach war. (NEURURER, Pers. Komm., 05.2005) Der Erfolg der PEG Methoden kann dennoch durch die REM Aufnahmen bestätigt werden. Es sind bei den erfolgreich konservierten Stücken mit PEG kaum Spalten zu sehen, während beim gefriergetrockneten Stück ein Netz an internen Spalten vorhanden ist.

Obschon die Fragen insgesamt nicht beantwortet werden konnten, hat die Untersuchung mit dem Elektronenmikroskop immerhin zu spektakulären Bildern geführt, wo materialspezifische Eigenschaften wie die Vergelung und Komprimierung der Holzzellen schön sichtbar werden (vgl. Bild 46 und Bild 47). Man stellt auch die hohe Dichte des Materials fest. Bis zu einer 10'000 fachen Vergrößerung sind kaum Poren oder Hohlräume zu sehen. Poren müssen sich also im Nanometerbereich befinden. (vgl. 5.2.4)

Als vielleicht erfolgreicherer Verfahren für den Nachweis von Tränkungsmiteln in den Probestücken hätte die Neutronenradiografie verwendet werden können. Dieses noch sehr neue, zerstörungsfreie, bildnerische Verfahren stellt den Wasserstoff in den organischen Festigungsmitteln kontrastreich zum Ausgangsmaterial dar. Das Verfahren wurde auf Holz mit Erfolg angewendet. (LEHMANN, et al, 2005)

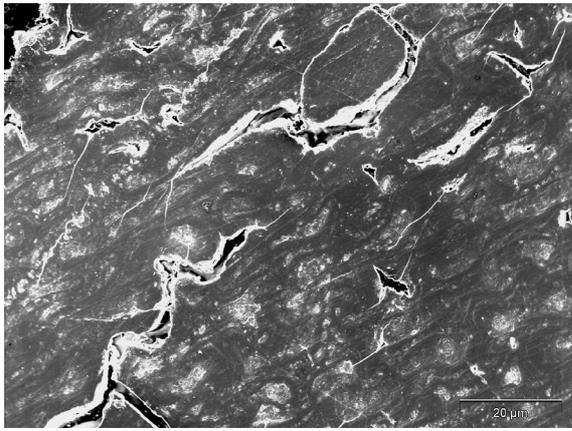


Bild 46: G28/3 unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die ursprünglichen Holzzellen werden als liegende Achten sichtbar.

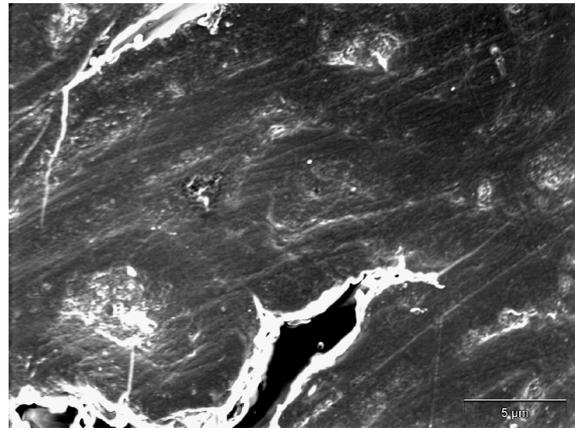


Bild 47: G28/3 unter dem Rasterelektronenmikroskop. Es sind zwei gegeneinander stossende Holzzellen sichtbar, die stark komprimiert und vergelt sind.

8 Anwendung auf archäologischem Material

8.1 Die Objekte

8.1.1 Identifikation und Beschrieb

Für die Anwendung der Ergebnisse der Versuchsreihe standen drei Objektfragmente aus Kaustobiolithen zur Verfügung, die direkt ab der Grabung feucht aufbewahrt wurden (vgl. Bild 48, Bild 49 und Bild 50):

- 2004/1.436. FK 101699 Armreiffragment
- 2004/1.445. FK 101725 Armreiffragment
- 2004/1.449. FK 101743 Gefässfragment

Die Funde stammen von der Martinsgasse 6 und 8 in Basel. Die zuständige Archäologin vermutet, dass es sich um Lignit oder Gagat handelt, und denkt, dass die Armreife wahrscheinlich auf einer Drehbank hergestellt wurden. Im Folgenden werden die Objekte vereinfacht mit den Nummern 36, 45 und 49 bezeichnet.

Das erste Armringfragment 36 ist das grösste Stück und macht vielleicht einen Fünftel des ursprünglichen Armreifs aus. Der innere Durchmesser des Armreifs betrug vermutlich ungefähr 70mm. Das Fragment ist 48mm lang und zeigt im Profil annähernd eine D-Form, wo es ca 8,5mm misst. Die Rundung des D, die der Aussenseite des Reifs entspricht, ist sehr regelmässig, während die Innenseite nicht glatt ist, mehrere Rillen und einen Grat aufweist. Vermutlich handelt es sich dabei um die Spuren der Drehbank. Wenn dem so ist, wurde der Ring von beiden Seiten her aus einer Platte herausgeschnitten (vg. 3.4), man traf aber dabei nicht genau aufeinander. Das Fragment ist sehr glatt und fein zu berühren, weshalb man vermuten kann, dass zumindest die Aussenseite noch nachgearbeitet wurde, dass heisst fein geschliffen und poliert. Das Stück scheint sehr kompakt und homogen. Es hat eine schwarzbraune Farbe und glänzt durch den Wassergehalt und die glatte Oberfläche stark. Die Bruchstellen an beiden Seiten zeigen einen splitterigen bis faserigen Bruch, was auf ein geschichtetes Material hinweist. Unter dem Binokular wird dies bestätigt. Das Material scheint aus übereinander liegenden schwarzen, weissen und rotbraunen Fasern zu bestehen. Dabei liegt die Schichtung in der gleichen Ebene wie die Platte, aus der der Ring herausgeschnitten wurde. Diese Merkmale des Rohstoffes weisen eher auf Xylith oder sapropelitisches Material hin. Gagat kann ziemlich sicher ausgeschlossen werden, da das Stück keinen muscheligen Bruch zeigt.

Das Armringfragment 45 ist kürzer und macht vielleicht einen Achtel eines ganzen Ringes aus. Der Innendurchmesser des Ringes scheint kleiner als beim vorherigen Stück und kann ungefähr auf 60mm geschätzt werden. Das 29,5mm lange Fragment weist im Profil eine regelmässig ovale Form auf, wobei die breitere Seite des Ovals ungefähr 10mm und die schmalere Seite ungefähr 8mm misst. Die breitere Seite entspricht der Breite des Armbands. Auch dieses Stück könnte auf einer Drehbank hergestellt worden sein. Es wurde aber feiner nachbearbeitet, weshalb es innen wie aussen völlig glatt

ist und keine Bearbeitungsspuren zeigt. Das Armreiffragment scheint sehr kompakt und homogen, zeigt eine tief schwarze Farbe und glänzt durch den Wassergehalt und die glatte Oberfläche stark. Die Bruchstellen sind zwischen faserig und muschelig. Unter dem Binokular erscheint auch dieses Fragment geschichtet. Man kann braune und schwarze Streifen unterscheiden. Die Schichtung liegt auch hier in derselben Ebene, wie die Platte, aus der der Armring ausgeschnitten wurde. Hier kommen verschiedene Rohmaterialien in Frage. Auf Grund der Farbe und des Bruches kann auch Gagat nicht ausgeschlossen werden, obschon die beobachtete Schichtung dagegen spricht. Ausser materialspezifischen Merkmalen waren auf diesem Stück unter dem Binokular auch Kratzer sichtbar, die Gebrauchsspuren darstellen könnten.

Das als Gefässfragment interpretierte Stück 49 weist eine sehr unregelmässige Form auf, die eine maximale Länge von 29,8mm, eine maximale Breite von 26,9mm und eine maximale Dicke von 13,2mm zeigt. Auf dem Stück sind sehr glatte Flächen auszumachen, wovon eine regelmässige Ringe zeigt, die vielleicht auf eine Bearbeitung hinweisen. Zwei Flächen sind ganz klar als Bruchstellen zu interpretieren. Sie sind unregelmässig, zeigen aber stellenweise deutliche muschelige Strukturen. Das Stück ist sehr homogen, sehr kompakt und tief schwarz. Der Glanz ist wie bei den Armringfragmenten durch den Wassergehalt stark. Unter dem Binokular erscheint dieses Fragment ebenfalls tief schwarz. Es sind keinerlei Strukturen sichtbar, weder holzartige noch schichtartige. Auf Grund dieser Erscheinung und den muscheligen Bruchstellen könnte es sich hier um Gagat als Rohmaterial handeln.



Bild 48: Armreiffragment 36 im nassen Zustand, vor der Behandlung



Bild 49: Armreiffragment 45 im nassen Zustand, vor der Behandlung



Bild 50: Gefässfragment 49 im nassen Zustand, vor der Behandlung

8.1.2 Archäologischer Kontext

Die Armreiffragmente wurden an der Martinsgasse 6 und 8 in Basel gefunden. Wegen eines Tiefgaragenprojekts fanden dort von Februar bis September 2004 Notgrabungen statt. Die durchschnittlich 3m mächtigen Schichten waren weitgehend ungestört, und zeigten Siedlungsspuren aus bronzezeitlichen, latènezeitlichen, römischen und mittelalterlichen Phasen, sowie hochmittelalterliche Bestattungen. Als Fundmaterial sind Architekturteile, bemalter Wandverputz, Metallobjekte, Gefässkeramik, Knochen- Geweih- und Steinartefakte zu nennen. (HAGENDORN/STELZLE-HÜGLIN, 2005)

Das Armreiffragment 36 wird in das Frühmittelalter datiert und wurde in der Verfüllung eines Grubenhauses gefunden. Das frühmittelalterliche Fundmaterial allgemein stammt aus einer

mächtigen, stark humosen *dark earth* Schicht. Fragment 45 wurde in einem spätrömischen Grobkiespflaster mit zugehörigem Bauhorizont und möglichen jüngeren Eingriffen entdeckt. Das Sediment ist ein bräunlichgrauer Lehm mit viel Fein- und Grobkies, in dem auch Holzkohle, Kalksplitter, Knochenfragmente, Ziegelstücke und Buntsandsteinfragmente vorhanden waren. Das Gefässfragment 49 stammt aus einem einplanierten, hochmittelalterlichen Abbruchschutt, der ungefähr in das 12. Jahrhundert datiert wird. Das Sediment wird als brauner sandiger Lehm mit viel Fein- und Mittelkies beschrieben.

Alle drei Funde stammen aus Tiefen zwischen 1m bis 2,50m, also nicht aus modern durchwurzelter Bereichen und mit geringem Einfluss der Witterung auf die Funde. Es handelt sich bei den Schichten um einen gut durchlüfteten Boden, nicht um einen Feuchtboden mit idealen Bedingungen für die Erhaltung von organischem Material. Vermutlich müssen die entsprechenden Schichten eher neutral bis basisch sein, da Knochen und Mörtel sehr gut erhalten waren, was in einem sauren Milieu nicht der Fall wäre. (STELZLE-HÜGLIN, Pers. Komm., 08.2005)

8.1.3 Kohlenpetrografische Analyse

Normalerweise betrachtet man bei einer kohlenpetrographischen Analyse vorerst makroskopisch das Probenmaterial, eventuell mit Hilfe des Binokulars, dann wird die Probe eingebettet und unter dem Mikroskop angeschaut. Hier wurde ein neuer Arbeitsschritt zwischengeschaltet. Die nassen Objekte wurden direkt unter dem Mikroskop mit Wasserimmersion angeschaut. Dies war möglich, weil die Objekte sehr glatte Oberflächen aufweisen. Eine solche Untersuchung ist zerstörungsfrei und gibt genauere Hinweise als die makroskopische Betrachtung, reicht aber für eine abschliessende Bestimmung dennoch nicht aus. Zudem war das Ziel der Analyse nicht nur die Bestimmung des Rohmaterials, sondern es sollten auch Hinweise auf die Herkunft und die Erhaltung des Materials gewonnen werden.

Unter der Wasserimmersion sind auf dem Armreiffragment 36 Algen erkennbar sowie eine deutliche Schichtung, weshalb es sich nur um Sapropelit oder Sapropelkohle handeln kann. Die Fluoreszenz erscheint auf den Algenresten sowie auf der Matrix gleich stark wie auf bergfrischem Material, was ein Hinweis auf eine sehr geringe Verwitterung ist.

Durch die Interpretation des polierten Anschliffs kann das Material eindeutig als Sapropelit bestimmt werden (vgl. Bild 51 und Bild 52). Die Grundmasse ist mineralisch bituminös, die mineralischen Bestandteile erscheinen tonig bis kalkig, in gemischten Lagen. Das Material zeigt also die typische Mikroschichtung von Sapropelit. Als weiteres inorganisches Element ist Pyrit in grossen Mengen vorhanden. Er kommt in framboider und kristalliner Form vor und erscheint kaum degradiert. Von den organischen Bestandteilen ist Bituminite, das mit den mineralischen Bestandteilen eng vermischt ist, das wichtigste Mazeral. Es kommen auch Inertinite vor, davon vor allem Fusinite und einige Semifusinite. Vitrinite sind kaum vorhanden. Die Fluoreszenz der Grundmasse ist sehr stark, homogen und hat eine senfgelbe Farbe. Unter dem Fluoreszenzmodus werden auch die Algenreste sichtbar, die als sogenannte Tasmanalgen, eine Meeresalgenart, bestimmt werden können. Der Sapropelit hat keinen hohen Inkohlungsgrad erreicht. Seine Reife liegt unterhalb des Ölfensters (vgl. 4.1.2), weil

sonst das Mazeral Exsudatinit vorhanden wäre. Er befindet sich also im Glanzbraunkohlestadium oder sogar noch darunter. Die Herkunftsbestimmung ist beim hier vorliegenden Material schwierig, da Sapropelit sehr lokal in höchstens 20cm dicken Lagen vorkommen kann. Dieser Sapropelit muss sich in einem marinen Milieu, was man auch paralisch nennt, weg vom Kontinent gebildet haben, da er Meeresalgen und kaum Sporen enthält (vgl. Bild 57). Jurassische Schichten können nicht ganz ausgeschlossen werden, obschon die Fazies¹⁸ dafür untypisch ist.

Das Armreiffragment 45 zeigt bei Wasserimmersion Algenreste und eine Mikroschichtung, weshalb auch hier nur Sapropelit oder Sapropelkohle als Rohmaterial in Frage kommen. Dieses Rohmaterial scheint ein anderes zu sein als beim Armreif 36, denn es ist reicher an Liptiniten.

Durch das Studium des polierten Anschliffes konnte dieses Rohmaterial als Kännelkohle, also die sporenrreiche Art der Sapropelkohle, bestimmt werden (vgl. Bild 53 und Bild 54). Die Grundmasse ist mikrogeschichtet und fein körnig. Sie besteht hauptsächlich aus dem Mazeral Bituminit. Mineralien sind nur wenige vorhanden. Am häufigsten sind Karbonatkristalle, nebenbei kommen vereinzelt Pyritframboide und Tonmineralien vor. Unter den organischen Resten, die sehr fein sind, können nebst dem Bituminit vor allem Alginite und Sporinite, also Algen- und Sporenreste, in grossen Mengen ausgemacht werden. Die Algenreste stammen hier ausschliesslich von Botryococcusalgen, einer Süsswasser-alge. Vitrodetrinite und Liptodetrinite, sowie Fusinite und Semifusinite sind nur in kleineren Mengen in der Grundmasse verteilt vorhanden. Da man auch Mikrinit ausmachen kann, muss der Reifegrad dieser Kännelkohle zwischen Braun- und Steinkohlestadium liegen. Dieses Rohmaterial ist ganz klar verschieden vom Vorherigen. Es muss sich in einem sehr pflanzenreichen kontinentalen Milieu gebildet haben, was man als limnisch bezeichnet. Es kann sich unmöglich um Juraschichten handeln, da diese marin, sind (vgl. Bild 57). Auch hier kommt das Material womöglich sehr lokal in dünnen Schichten vor, weshalb eine Zuordnung zu einer Rohstoffquelle im Rahmen dieser Arbeit unmöglich ist.

Das Gefässfragment 49 erschien unter Wasserimmersion sehr dicht und leicht körnig. Es ist kein Gewebe und keine Schichtung erkennbar. Die Fluoreszenz des Stückes ist braun. Hier kommt Gagat als Rohmaterial am besten in Frage. Dafür muss aber der Holzvorgänger nachgewiesen werden können, was unter Wasserimmersion nicht möglich ist.

Auf dem polierten Anschliff konnte das Material als verkohlter Knochen identifiziert werden (vgl. Bild 55 und Bild 56). Es handelt sich hier also um keinen Kaustobiolithen. Im Material sind mandelförmige, regelmässig verteilte Kanäle auszumachen, welche typisch für Knochen sind. Im Grundmaterial ist im Fluoreszenzmodus eine netzartige, polygonale Struktur zu erkennen.

¹⁸ In den Erdwissenschaften in verschiedenen Arten verwendet. Bedeutet in der Kohlenpetrografie « die Summe aller primären lithologischen und paläontologischen Charakteristiken, die ein Sedimentgestein aufweist und von denen die Herkunft und die Bildungsumwelt abgeleitet werden können. (Taylor, et al., 1998, S. 26)

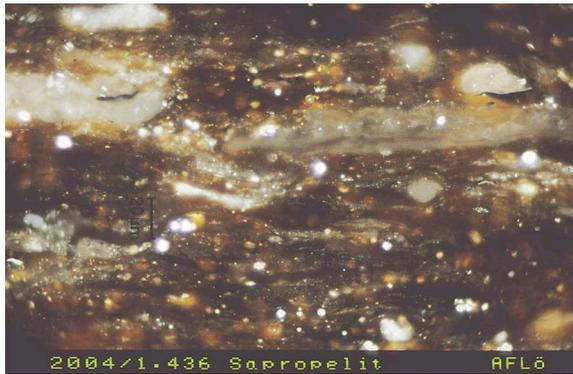


Bild 51: Mikroskopieaufnahme einer Probe von Armreiffragment 36. Die kleinen weißen Punkte sind Pyrite.

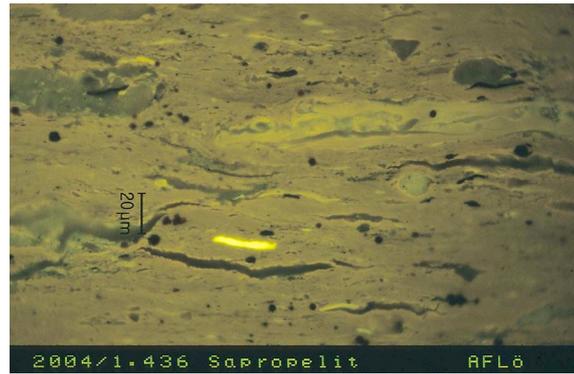


Bild 52: Mikroskopieaufnahme unter Fluoreszenz einer Probe von Armreiffragment 36. Gelb sichtbar ist Alginite.

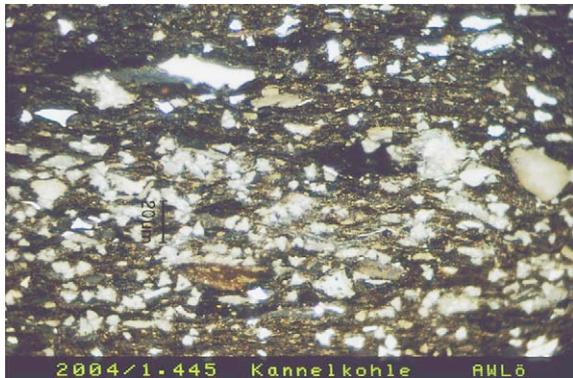


Bild 53: Mikroskopieaufnahme einer Probe von Armreiffragment 45. Die weißen Flecken sind Pyrite.

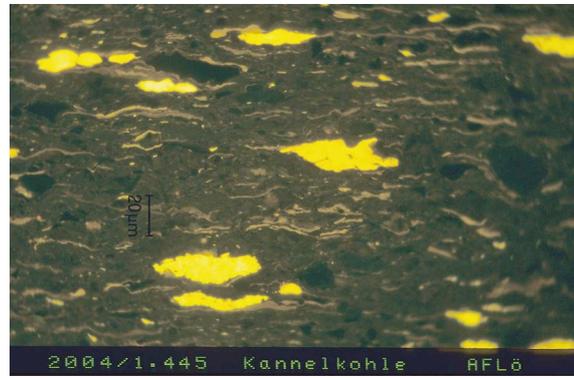


Bild 54: Mikroskopieaufnahme unter Fluoreszenz einer Probe von Armreiffragment 45. Gelb sichtbar ist Alginite, die feinen beigen Linien sind Sporinite.

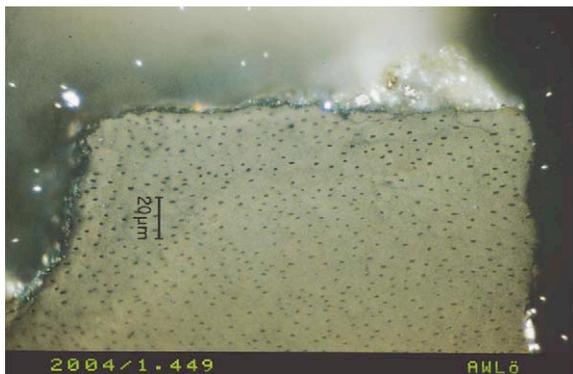


Bild 55: Mikroskopieaufnahme einer Probe von Gefässfragment 49. Es handelt sich um Knochengewebe.

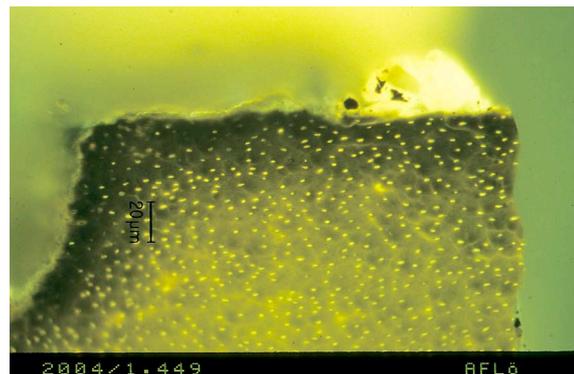


Bild 56: Mikroskopieaufnahme unter Fluoreszenz einer Probe von Gefässfragment 49.

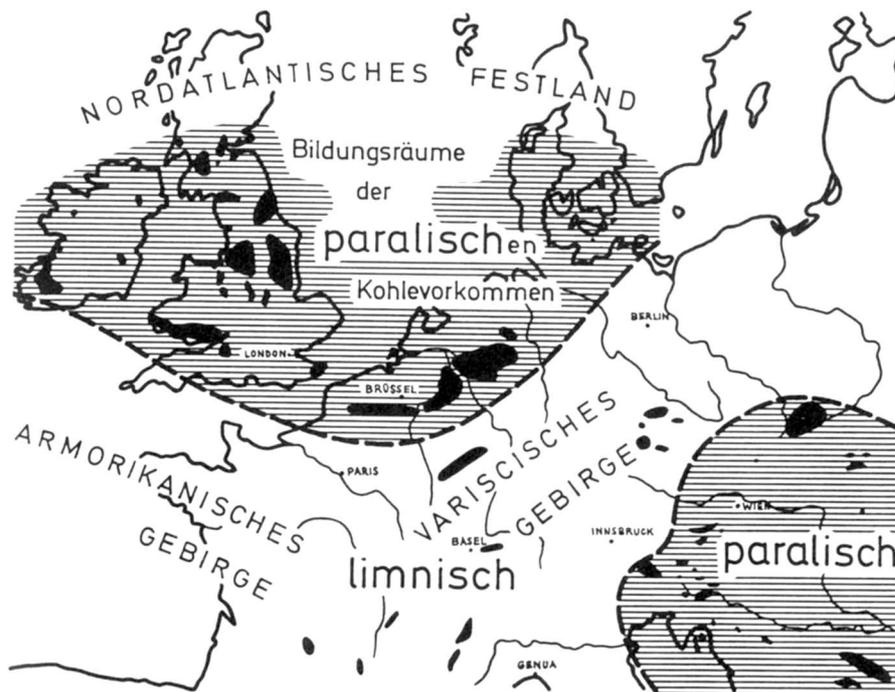


Bild 57: Limnische und paralische Kohlevorkommen (KLAUS, 1987, S. 97)

Verkohlte Knochen sind von Auge nicht von Gagat zu unterscheiden, da sie gleich dicht und kompakt sind, wenn es sich um kortikalen Knochen ohne Spongiosa handelt, und da sie ebenfalls schlechte Wärmeleiter sind. Dass ein Knochen sich tief schwarz verfärbt, ist abhängig von der Brenntemperatur. Nur um 400°C findet eine Schwarzfärbung als unvollständige Verbrennung der organischen Materie statt. (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S.62) Ob im Fall dieses Objektes ein Knochenstück absichtlich als Ersatzmaterial für Gagat verwendet wurde, ist nicht klar. Weitere Hinweise könnte vielleicht ein Archäozoologe liefern.

8.1.4 Voruntersuchung mit Computertomografie

Computertomografie CT ist ein Röntgenverfahren, bei welchem die Aufnahmen spiralförmig rund um das Objekt verlaufen. Durch die Umrechnung auf dem Computer ist es daher möglich, jeden beliebigen Schnitt im Objekt anzuschauen, und dreidimensionale Bilder zu rekonstruieren. Die Dichte eines Objektes wird auf dem CT Bild einem bestimmten Helligkeitswert zugeordnet. Helle Stellen entsprechen hohen Dichtewerten, dunkle Stellen bezeichnen eine geringere Dichte. Diese Bilddichte kann auch in einer Zahl ausgedrückt werden. Sie ist aber nicht mit dem spezifischen Gewicht eines Feststoffes zu verwechseln, sondern sie bezeichnet die Hounsfield Dichte, was eine röntgentechnische Bilddichte ist. (MAITRE, Pers. Komm., 05.2005)

Um im Anschluss zerstörungsfrei eine naturwissenschaftliche Einschätzung des Erfolgs der Tränkung vornehmen zu können, wurden die Objekte mit Computertomographie voruntersucht. Die bildnerischen und numerischen Dichtemessungen sollen später mit den Werten nach der Konservierung verglichen werden. Somit ist es möglich, Aussagen zu machen über:

- Das Eindringverhalten des Festigungsmittels: Gleichmässiges Eindringen bis in den Kern, Ansammlung an der Oberfläche, usw.
- Entstehung oder Vergrösserung von inneren Rissen und Spalten

Nebst der Bewertung der Konservierungsmethode dient die Computertomografie auch dem Erkennen von Strukturen im Material oder der Sichtbarmachung von degradierten Bereichen.

Die Voruntersuchung zeigt bei Armreif 36 eine durchgehend homogene Dichte. Der Ring wird auf dem CT Bild in einem gleichmässigen Grauton abgebildet. Ein Schnitt durch den Armreif 45 erscheint auf dem Bild streifenartig. Dabei verlaufen die Streifen in der Richtung der natürlichen Schichtung. Es muss in der Kännelkohle also eine Makroschichtung geben, die unter dem Mikroskop nicht erkannt wurde, da die Probemenge zu gering war. In beiden Armreifen können keine degradierten Randzonen und keine internen Spalten ausgemacht werden, was auch gut der mikroskopischen Analyse entspricht.

Das Gefässfragment 49 wurde ebenfalls untersucht. Der Dichtewert entspricht gut dem eines Knochens, was eine weitere Bestätigung für die Rohmaterialbestimmung ist. Im Objekt sind Spalten und ein Hohlraum sichtbar.

8.1.5 Erhaltungszustand

Alle Objekte erscheinen von Auge sehr dicht, kompakt und nahezu frei von Spalten. Deshalb könnte man die Erhaltung als sehr gut einschätzen. So lange die Objekte aber nass sind, wird ihre wahre Degradierung vielleicht durch das Wasser maskiert.

Auf dem polierten Anschliff erhält man einen Einblick in das Material, wie es sich präsentiert, wenn es ohne Konservierung getrocknet würde. Im Sapropelitmaterial von Armring 36 sind viele offene Spalten erkennbar, die sehr kurz und linsenartig sind, und der natürlichen Schichtung des Materials folgen. Wenige Spalten verlaufen auch quer zur Schichtung, wobei diese eine treppenartige Form aufweisen. Anscheinend haben diese Spalten keinen Zusammenhang mit Pyriten. Die Pyrite sind gesund und zeigen keine Anzeichen von Oxidation. Auch die Fluoreszenz des Materials ist stark und homogen, es hat also kaum Oxidation stattgefunden. Insgesamt scheint dieses Armreiffragment also günstigen Bedingungen im Boden ausgesetzt gewesen zu sein. Die Degradierung ist allgemein als gering zu bewerten. Dass sich durch die Trocknung dennoch relativ viele Spalten gebildet haben, könnte hier mit dem Quellen und Schrumpfen der Tonminerale in Zusammenhang mit Wasser begründet sein.

Das Kännelkohlematerial von Armring 45 zeigt keine Poren und erscheint sehr dicht. Spalten sind kaum vorhanden. Wenige blitzförmige Spalten verlaufen von der Oberfläche her in das Material hinein, was bedeuten könnte, dass das Material an seiner Oberfläche stärker degradiert wurde. Von den framboidalen Pyriten sind einige im Begriff zu oxidieren. Die Fluoreszenz ist ebenfalls stark, hier aber heterogener. Die organischen Bestandteile sind also wenig oxidiert. Auch hier kann der Erhaltungszustand insgesamt als gut eingeschätzt werden. Da in dieser Kännelkohle nur geringe Mengen an Tonmineralen vorhanden sind, scheinen sich hier auch kaum Spalten gebildet zu haben.

Bei der Voruntersuchung unter Wasserimmersion direkt auf der Objekt Oberfläche wurde der Erhaltungszustand für beide Armreiffragmente schlechter eingeschätzt, denn die Materialien

erschieden sehr porös. Vermutlich kommt dies davon, dass Minerale aus der Grundmasse herausgelöst wurden, entweder durch die Bodenlagerung, oder schon während der Bearbeitung. Objekt 49 fluoresziert in Randbereichen kaum noch, und wurde daher dort stärker oxidiert. Es sind keine Spalten sichtbar. Obschon es sich um einen Knochen handelt, ist das Kriterium der Fluoreszenz dennoch gültig, um Aussagen zu seiner Erhaltung zu machen.

8.2 Auswahl der Methoden und Produkte

8.2.1 Übertragbarkeit der Versuchsreihe

Zwei Methoden sind in der Testreihe auf geologischem Vitrinit erfolgreicher gewesen als alle anderen. Er handelt sich um die Tränkungen mit PEG 4000 und PEG 1000. Obschon die Übertragbarkeit der Versuche auf die hier zur Verfügung stehenden Objekte nicht vollständig gegeben ist, (vgl. 7.2.2) ist es dennoch sinnvoll, diese beiden Methoden hier anzuwenden.

Als Fortsetzung der Versuchsreihe müssten die erfolgreichsten Konservierungsmittel jetzt auf den jeweiligen Materialtypen mit bestimmter Degradierung getestet werden. Die Tränkungen mit PEG 4000 und 1000 auf den Armringfragmenten sind in diesem Sinne eher als eine Fortsetzung der Untersuchungen zu sehen, als eine echte Anwendung. Ein weiterer Grund ist, dass nur Versuche auf archäologischem Material zu einer sicheren Aussage führen. Es ist also sinnvoll zu überprüfen, ob die auf geologischem Material gewonnenen Erkenntnisse auf archäologischem Material gültig sind.

8.2.2 Auswahl in Bezug auf Rohmaterial und Erhaltungszustand

Der Erhaltungszustand ist bei beiden Armringfragmenten ähnlich, vielleicht bei 45 leicht schlechter, da oxidierte Pyrite vorhanden sind. Als Kriterium für die Auswahl der Methoden wird deshalb vor allem auf die Rohmaterialart geachtet.

Das Armringfragment 36 soll mit PEG 4000 getränkt werden. Das Rohmaterial ist gröber und poröser als Objekt 45 und hat eine stärkere Tendenz zu spalten, weshalb die Tränkung mit hochmolekularem PEG günstiger sein müsste. Der Sapropelit ist reich an Tonmineralien und diesbezüglich einem Ölschiefer ähnlich. Die Methode wurde ja ursprünglich für wassergesättigten Kimmeridge Ölschiefer erfunden (ODDY/ LANE, 1976), und sollte deshalb gut auf den hier vorliegenden Sapropelit übertragbar sein.

Das Armringfragment 45, das aus dichterem und weniger porösem Material besteht, wird mit PEG 1000 konserviert. Die mittlere Molekulargröße sollte einen guten Kompromiss zwischen Eindringvermögen und Festigungsvermögen für dieses Material bieten.

Beide Konservierungsmethoden werden erneut durchgeführt, wie unter Kapitel 7.1.4 beschrieben.

Das Knochenstück 49 wird in einem Kasten kontrolliert getrocknet. Da es sich nicht um einen Kaustobiolithen handelt, soll seine Konservierung hier nicht weiter erläutert werden, weil dies nicht mehr zum Thema dieser Arbeit gehört.

8.3 Die Behandlung

8.3.1 Dokumentation vorher

Die Stücke wurden wie schon vorher bei den Versuchsproben gezeichnet, fotografiert, ausgemessen und gewogen. Dadurch soll auch hier eine objektive Auswertung der Konservierungsergebnisse möglich werden.

8.3.2 Anfertigung einer Kopie

Da der Erfolg der Konservierungsmethoden nicht vorausgesagt werden kann, wurden zur Sicherheit Kopien der Objekte hergestellt. Dadurch steht auch im Fall einer missglückten Konservierung noch ein Zeuge der ursprünglichen Form zur Verfügung.

Die Kopien konnten mit Silikonkautschuk hergestellt werden. Die Objekte wurden zur Hälfte in Lehm gebettet, wodurch die freie Seite abgegossen werden konnte. Der Lehm bildete dabei eine Feuchtigkeitsreserve, so dass die Stücke während der Abformung nicht austrocknen konnten. Auch bei der Abformung der zweiten Seite bestand keine Gefahr für die Objekte. Nun von beiden Seiten eingeschlossen, bildete der Silikonkautschuk eine luftdichte Verpackung. Deshalb konnte der Feuchtigkeitsgehalt der Stücke auch bei diesem Arbeitsschritt nicht verloren gehen.

Die Abformung ist unproblematisch, obschon es sich um nasses Material handelt. Damit alle Einzelheiten scharf abgeformt werden, sollte das Objekt nicht von einem Wasserfilm bedeckt sein, sondern man sollte es leicht abtupfen. Spalten in den Objekten müssen unbedingt mit Lehm verschlossen werden, da der Silikonkautschuk sonst eindringt und das Objekt bei der Ausformung beschädigt werden kann.

Nach dem Anfertigen der Form wurden für jedes Objekt zwei Kopien aus Gips und eine Kopie aus Epoxy Kunstharz hergestellt. Die Abformung hat keine Schäden auf den Objekten verursacht.

8.3.3 Behandlung

Die Behandlungen wurden wie bei den Versuchsstücken gemäss dem Beschrieb in Kapitel 7.1.4 durchgeführt. Dabei wurde die Steigerung der Konzentration der Bäder stets über das Gewicht des Bades überwacht, und durch Öffnen und Schliessen des Gefässes und Zugabe von PEG reguliert.

Nach der schonenden Trocknung im Kasten mit hoher Luftfeuchtigkeit wurden die Armringe mit einem Gemisch aus Alkohol und Wasser nachgereinigt, um überschüssiges PEG von der Oberfläche zu entfernen.

8.3.4 Dokumentation nachher

Die Stücke wurden erneut eingemessen, gewogen und fotografiert. Der Zustand nach der Konservierung wurde ausführlich beschrieben, wobei wieder auf Spaltenbildung, Fragilität,

Deformierung, Oberflächenbeschaffenheit, Farbe und Glanz geachtet wurde. Zusätzlich dienten hier noch die Kopien aus Gips und Kunstharz als Vergleich für mögliche Veränderungen nach der Konservierung.

8.4 Resultate und Auswertung

8.4.1 Kriterien

Es gelten die gleichen Kriterien wie unter 7.4.1 aufgelistet.

8.4.2 Vergleich der Masse

Die bei den archäologischen Armringfragmenten erreichte Dimensionstreuung entspricht sehr gut den Vorversuchen auf geologischem Vitrain. Wieder zeigt das mit PEG 1000 konservierte Stück die besten Werte. Die Masse weichen weniger als 1,5% von den vor der Konservierung aufgenommenen Massen ab, was genau den auf dem Probestück erzielten Resultaten entspricht. Beim Armreiffragment 36, das mit PEG 4000 konserviert wurde, weichen die Werte um weniger als 3% von den ursprünglichen Massen ab. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen der Vorversuche auf Vitrain.

Da es sich bei den Objekten um unterschiedliche Rohmaterialien handelt, ist aber hier ein direkter Vergleich der Methoden nicht zulässig. Der Sapropelit des Fragmentes 36 besteht aus grossen Mengen an Tonmineralien, die im wassergesättigten Objekt in geschwollenem Zustand vorliegen. Die Schrumpfung der Tonmineralien ist vermutlich die logische Erklärung für die schlechtere Dimensionstreuung beim Fragment 36. Man kann also nicht behaupten, dass die Tränkung mit PEG 4000 eine schlechtere Konservierungsmethode ist.

Insgesamt kann die Dimensionstreuung bei beiden Armreiffragmenten als gut bewertet werden. Bei beiden Objekten konnte nicht beobachtet werden, dass die natürliche Struktur des Materials einen Einfluss auf das Schrumpfungsverhalten hat. Die Abnahme der Masse war in allen Richtungen ähnlich.

Nebst den Massen wurde auch die Gewichtsabnahme nach der Konservierung dokumentiert. Gegenüber der Vorversuche, wo das Gewicht nach den Tränkungen mit PEG 4000 und PEG 1000 je fast identisch mit dem Nassgewicht war, nahmen hier die Werte um 5% bei PEG 4000 und 3,5% bei PEG 1000 ab. Da nicht untersucht wurde, wie gross der Wassergehalt der Stücke vor der Konservierung war, können diese Masse nicht für Aussagen zum Eindringverhalten der Kunstharze verwendet werden. Bei der Konservierung mit PEG 4000 kann aber gesagt werden, dass der Austausch des Wassers mit dem PEG nicht vollständig stattfand. Die Konzentration der Lösung im Bad wurde ja bis auf 100% gesteigert. Wäre der Austausch vollständig gelungen, hätte kein Gewichtsverlust stattfinden sollen. Entweder war die Behandlungsdauer zu kurz, oder das PEG konnte zu schlecht in kleinste Porenräume eindringen.

8.4.3 Vergleich sichtbarer Unterschiede

Die Stabilität kann für beide Armreiffragmente als gut bewertet werden. Sie zeigen eine kompakte Erscheinung und lassen sich problemlos handhaben. Insgesamt hat sich die Stabilität gegenüber dem nassen Zustand nicht verändert, soweit dies ohne Hilfsmittel beurteilt werden kann.

Bei beiden Armreiffragmenten konnte keine Deformierung festgestellt werden. Ausser durch die gleichmässige Abnahme der Masse in allen Richtungen wurde die Formstabilität auch durch den Vergleich der Kopien aus Kunstharz (vgl. 8.3.2) mit den Originalen überprüft.

Auf dem Armring 36 haben sich bestehende Spalten auf dem Armringrücken leicht geweitet, es handelt sich aber noch immer um feinste Haarrisse. Sie sind im Vergleich zum nassen Zustand jetzt besser sichtbar, da vorher der Wasserfilm eine Art optische Brücke bildete und die Spalten kaschierte. In einigen Spalten wird PEG als weisse Verfüllung leicht sichtbar. Spalten sind nur auf der Innenseite des Ringes und auf seinem Rücken sichtbar, also nur im Schichtverlauf des Materials. Sie sind jeweils sehr fein und zeigen eine leicht gewellte Struktur.

Armring 45 scheint vor wie nach der Konservierung frei von Spalten und Rissen. Jedoch ist auf dem Armringrücken ein glänzender Strich zu erkennen. Beim Reiben über diesen Strich kann festgestellt werden, dass es sich um PEG handelt, das austritt. Dies zeigt, dass hier ein Spalt vorhanden ist. Von Auge ist dieser kaum zu erkennen, da er sehr fein ist. Es könnte sich aber um einen bedenklichen Spalt handeln, da er scheinbar tief in das Material hinein greift.

Das Erscheinungsbild beider Armreiffragmente ist nach der Konservierung gefällig (vgl. Bild 58 und Bild 59). Armreif 36 zeigt einen schönen seidenmatten Schimmer, ist glatt und ästhetisch anzusehen. Die Bearbeitungsspuren sind deutlich sichtbar. Die Farbe kann als warmes Schwarz bezeichnet werden. Bei genauerer Betrachtung werden auch die vor der Konservierung beobachteten (vgl. 8.1.1), materialtypischen schwarzen und braunen Sprengel sichtbar. Bei der Berührung erscheint das Material leicht wachsig. Dennoch hat die Konservierung mit PEG 4000 nicht zu einer Verfälschung des Materialtyps oder der Oberflächenbearbeitung geführt.

Armreif 45 ist ebenfalls schön glatt und seidenmatt, jedoch weniger schimmernd als Fragment 36. Dies ist vielleicht als negativ zu beurteilen, da die Oberfläche vom Fragment 45 vermutlich stärker poliert wurde als 36. Dieses Stück dürfte also ein wenig mehr glänzen, um die Oberflächenbearbeitung besser zu verdeutlichen. Die Farbe erscheint tief schwarz, bei genauerer Betrachtung sind dunkelbraune Schlieren erkennbar, was zeigt, dass materialspezifische Strukturen trotz der Konservierung sichtbar geblieben sind. Zum Anfassen ist das Armringfragment 45 gegenüber 36 natürlicher, vielleicht als „steinig“ zu beschreiben.



Bild 58: Armreiffragment 36 nach der Behandlung



Bild 59: Armreiffragment 45 nach der Behandlung

8.4.4 Auswertung mit Computertomografie

Zur Auswertung des Erfolgs der Tränkung wurden die Armreiffragmente ein weiteres Mal im Computertomografen untersucht. Dichtemessungen wurden an denselben Stellen wie bei der Voruntersuchung vorgenommen.

Der Vergleich der Werte zeigt bei Fragment 36 eine regelmässige Zunahme der Hounsfield Dichte von ungefähr 70 Masseinheiten an vier Messpunkten. Auf dem Bild scheint das Objekt weiterhin regelmässig grau. Kein Unterschied ist festzustellen zwischen Kern und Randbereichen des Objekts. Somit kann man davon ausgehen, dass das Festigungsmittel in das Objekt eindringen konnte, und zwar bis in den Kern. Es fand keine Ansammlung an der Oberfläche statt. Die Zunahme der Bilddichte erklärt sich dadurch, dass PEG 4000 im festen Zustand ein spezifisches Gewicht von 1,20- 1,22 g/cm³ aufweist (HOECHST, 1992, S. 8), also dichter als Wasser ist.

Bei Fragment 45 stellt man eine Abnahme der Dichtewerte von null bis ca 25 Masseinheiten bei drei Messpunkten fest. Der vierte Messpunkt weicht völlig ab und zeigt eine Zunahme von 45 Masseinheiten. Da diese Messung am äussersten Ende des Objekts erfolgte, könnte sie auch Verpackungsmaterial mit einbezogen haben und deshalb verfälscht sein. Hier ist der Erfolg der Tränkung schwieriger zu beurteilen. Geht man von einer regelmässigen Abnahme der Dichte aus, könnte dies dadurch begründet sein, dass bei diesem Objekt die Konzentration des Tränkungsmediums nur auf 50%, und nicht wie bei Fragment 36 auf 100% gesteigert wurde. Deshalb wurde nur die Hälfte des Wassergehalts durch PEG ersetzt, der Rest ist verdunstet. Logischerweise bewirkt dies eine Dichteabnahme. Allerdings kann dadurch nicht bewiesen werden, dass das Tränkungsmedium wirklich eingedrungen ist, denn dafür müssten die Dichtewerte des unkonservierten trockenen Zustands vorliegen. Hingegen zeigen die Bilder, dass Randbereiche und Kern gleich aussehen. Falls das Produkt eingedrungen ist, was man durch die Vorversuche auf Vitrain und dem Vergleich mit 36 annehmen kann, so ist es regelmässig bis in den Kern gelangt.

Ziel der Aufnahmen mit dem CT war es auch, die innere Rissbildung zu beobachten. Die Auflösung der Bilder war aber zu gering, um die sehr feinen Spalten, die sich gebildet haben, sehen zu können.

9 Schlussfolgerung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Konservierung von kaustobiolithischen archäologischen Objekten. Diese Materialgruppe, dazu gehören ausser Gagat auch Sapropelit, Kännelkohle, Bogheadkohle, Ölschiefer, festes Bitumen, Lignit, Xylith, Pechkohle usw., ist, wie sich bei der Sichtung der Fachliteratur zeigt, schwierig zu konservieren. Sobald aus diesen Gesteinsarten hergestellte archäologische Gegenstände aus dem Boden entfernt werden und ohne Behandlung trocken gelassen werden, spalten und verziehen sie sich. Die Aussagekraft wird durch diesen Prozess stark vermindert, weshalb eine konservierende Behandlung auf dem noch erdfeuchten Fundstück vorgenommen werden muss. Durch die bis heute schlechte Kenntnis der Materialien und Abbauvorgänge, und durch eine geringe Erfahrung mit der Konservierung solcher Objekte besteht grosse Unsicherheit, welche Methoden und Produkte für Kaustobiolithe allgemein und für jedes Rohmaterial im speziellen angepasst sind.

Durch eine Literaturrecherche und durch eine Umfrage wurde deutlich, dass bisher vor allem Methoden der Konservierung von Nassholz oder von Fossilien auf kaustobiolithischen Objekten ausprobiert wurden. Dazu gehören Imprägnierungen mit Polyethylenglykol verschiedener Molekulargewichte oder mit unterschiedlichen Kunstharzen. Da es sich bei den Publikationen jeweils um Fallbeispiele handelt, fehlt ein grundlegender Vergleich der Methoden. Diese Arbeit hat zum Ziel, diese Lücke zu schliessen, damit für die künftige Behandlung solcher Objekte Informationen zur Wirksamkeit verschiedener Methoden zur Verfügung stehen.

Insgesamt wurden elf Methoden auf degradiertem geologischen Vitrain ausgetestet. Vitrain ist ein Kaustobiolith, der sich wie Gagat durch Inkohlung eines Holzstücks bildet, jedoch im Unterschied zu Gagat nicht mit Bitumen imprägniert wird. Das Teststück wurde nicht in seiner ursprünglichen Schicht gefunden, sondern in einem Fluss, weshalb es Abbauprozesse, ähnlich denen archäologischer Objekte erlebt hat. Auf dem zugeschnittenen Probestück wurden Trocknungs- und Konsolidierungsmethoden mit Produkten wie Polyethylenglykol PEG, Acrylharze und Vinylharze als Lösung oder als Emulsion, Kanadabalsam als natürliches Harz und Kieselsäureester als anorganisches Festigungsmittel ausprobiert. Nach vorher definierten Kriterien schnitten die Imprägnierungen mit PEG 1000 und PEG 4000 im Tauchverfahren bei Wärmezufuhr und Steigerung der Konzentration auf je 50 und 100% am besten ab. Diese Methoden konnten das Probematerial am effizientesten am Spalten, Verziehen und Schrumpfen hindern. Der Nachweis dieses Erfolges mit dem Elektronenmikroskop ist leider nicht gelungen.

Diese am besten bewerteten Methoden wurden auf feucht geborgenen archäologischen Armreiffragmenten aus Kaustobiolithen angewendet. Die Materialanalyse dieser beiden Fragmente zeigte, dass eines aus Sapropelit, das andere aus Kännelkohle besteht. Ersteres wurde mit PEG 4000, letzteres mit PEG 1000 gefestigt. Diese Behandlungen führten zu einem guten Resultat und konnten auch hier die Beschädigung durch die Trocknung verhindern. Die Auswertung mit

Computertomografie als zerstörungsfreie Methode zeigt über die Dichtezunahme, dass die Festigungsmittel gut in die Objekte eingedrungen sind.

Ziel dieser Arbeit war es, Konservierungsmethoden für erdfeuchte bis nasse archäologische Objekte aus Kaustobiolithen zu finden. Durch den Vergleich verschiedener Methoden und durch die möglichst objektive Auswertung stehen jetzt gewisse Informationen für den praktischen Umgang mit solchen Objekten zur Verfügung. Leider ist die Datenmenge nur klein, da jede Methode bloss einmal ausprobiert werden konnte, weshalb die Resultate höchstens Tendenzen aufzeigen. Es ist auch so, dass jede Methode, bei Veränderung von Parametern wie Konzentration, Dauer der Imprägnierung, verwendetes Lösemittel usw zu ganz anderen Resultaten führen könnte.

Es wird ersichtlich, dass diese Arbeit erst einen bescheidenen Anfang darstellt und noch viel mehr Forschung nötig ist, bis man die Fragen der Konservierung, des Materialaufbaus und der Degradierungsvorgänge von Kaustobiolithen abschliessend beantworten kann. Als unmittelbare Fortsetzung der hier vorliegenden Untersuchung müsste die Wirksamkeit der Methoden jetzt auf den verschiedenen Rohmaterialtypen ausgetestet werden, unter Berücksichtigung des Zerfallsgrades. Nebst den hier getesteten Methoden sollte möglicherweise in der Industrie nach weiteren Behandlungsmöglichkeiten gesucht werden. Nebst der Suche nach geeigneten Konservierungsmethoden müssten auch die hier zweitrangig behandelten Zerfallsursachen untersucht werden. Alterungstests, Vergleiche zwischen archäologischem und bergfrischem Kaustobiolithen mit Hilfe naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden, Tests der Materialempfindlichkeit auf Chemikalien und physikalische Einwirkungen könnten mögliche Forschungsansätze darstellen.

Obschon durch diese Arbeit viele Fragen unbeantwortet bleiben, hofft die Autorin, dass jetzt ein brauchbarer literarischer Überblick vorliegt, der den verschiedenen Fachleuten den Einstieg in diese komplizierte Materialgruppe erleichtert, und somit zu weiterer Forschung anregt. Unter anderem hat das Austesten von Konservierungsmethoden ja auch gezeigt, dass beinahe jede hier erprobte Methode eine Verbesserung gegenüber dem unkonservierten Stück darstellte. Dieses Ergebnis sollte für die Praxis ermutigend sein und die Angst vor dem Ausprobieren etwas mindern.

10 Verzeichnisse

10.1 Literaturverzeichnis

- Allason-Jones, Lindsay (im Druck) :
« Archaeotechnology Review. Jet and Allied Materials. » Unveröffentlicht. 1-22.
- Allason-Jones, Lindsay (2004) :
« Roman Jet and Shale. » In : *Gem and Jewellery news Vol. 13, No. 4*, 81-82.
- Andersen, B. W. (1980) :
Gem Testing. Ninth Edition. London Boston: Butterworths. 380-425.
- Bariand, Pierre/ Poirot, Jean-Paul (1985) :
Larousse des pierres précieuses. Paris: Librairie Larousse. 158-159.
- Beder, Domic/ Leperle, Frederic (im Druck):
« La molasse alsacienne dans la vallée de Delémont. » In : Office du patrimoine historique (Hg.) : *Paléontologie et Transjurane*. Porrentruy: Office du patrimoine historique.
- Becker, Damien/ Rochat, Martine (2003) :
« Trente millions d'années d'attente pour une restauration. » In : *Jurassica 13*, 37-39.
- Berner, Thomas/ Tietz, Olaf (2002) :
« Mit PEG konservierte Weichbraunkohle. Ein Kohleschauprofil aus dem Tagebau Berzdorf (Oberlausitz, Ostdeutschland). » In : *The Preparator 48 H. 2*, 77-85.
- BeyArs.com:
« Das grosse Kunstlexikon von P.W.Hartmann. » URL :
http://www.beyars.com/kunstlexikon/lexikon_a_1.html [Stand 30.06.2004]
- Bräker, Otto U./ Bill, Jakob (1979) :
« Zum derzeitigen Stand der Nassholzkonservierung. » In : *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte Band 36 Heft 2*, 97-145.
- Bullinger, Jérôme (im Druck) :
« Le jais » In : Bullinger, Jérôme/ Leesch, Denise/ Plumettaz, Nicole (Hg.) : *Premiers éléments pour l'analyse d'un habitat de plein air. Le site magdalénien de Monruz 1*. Saint-Blaise: Editions du Ruau (=Archéologie neuchâteloise 34). 158-165.
- Chavignier, Françoise (1990) :
« Intervention sur le terrain: le mobilier. » In : Berducou, Marie (Hg.) : *La conservation en archéologie*. Paris: Masson. 69-71.
- Childs, Robert E. (1995) :
« Pitch, tar, bitumen and asphalt ? A sticky problem. » In : Wright, Margot M./ Townsend, Joyce H. (Hg.) : *Resins ancient and modern. Pre-prints of the SSCR's 2nd Resins Conference Held at the Department of Zoology, University of Aberdeen, 13-14 September 1995*. Edinburgh: The Scottish Society for Conservation & Restoration. 111-113.
- Cronyn, Janet Margaret (1990):
The Element of Archaeological Conservation. London, New York: Routledge. 293-295
- Davies, Henrietta F. (1936) :
« The shale industries at Kimmeridge, Dorset. » In : *Archaeological Journal 93*, 200-219.

- Davis, Mary (1988) :
 « Consolidation of jet. » Museum of London Internal Conservation Report. 1-11.
- Davis, Mary (1990) :
 « A Preliminary Investigation into the Composition and Condition of Early Bronze Age Jet Artefacts from Scotland. » Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Durham. Seitenangabe.
- Davis, Mary (1993b) :
 « When Jet is not Jet. » In : Tennent, Norman H. (Hg.) : *Conservation Science in the U.K. Preprints of the Meeting held in Glasgow, May 1993*. London: James & James Science Publishers Ltd. 85-90.
- Davis, Mary (1993a) :
 « The Identification of Various Jet and Jet-like Materials used in the Early Bronze Age in Scotland. » In : *The Conservator* 17, 11-18.
- Davis, Mary/ Hunter, Fraser/ Livingstone, Alec (1995) :
 « The Corrosion, Conservation and Analysis of a Lead and Cannel Coal Necklace from the Early Bronze Age. » In : *Studies in Conservation* 40, 257-264.
- Davis, Mary/ Sheridan, Alison (1996) :
 « Ancient Jet- New Research. » In : Aldhouse- Green, Stephen (Hg.) : *Art, Ritual and Death in Prehistory*. Wales: National Museums & Galleries of Wales. Seitenangabe.
- Dietrich, R. V (2004) :
 « Jet. » URL : <http://www.cst.cmich.edu/users/dietr1rv/jet.htm> [Stand 30.09.2004]
- Dunning Thierstein, Cynthia (2005) :
 « Le Premier âge du Fer sur le versant méridional du Jura. Chronologie, typologie et rites funéraires. » Dissertation, Universität Genf. 1-223.
- Egloff, Michel (1995) :
 « Les figurines féminines magdaléniennes de Neuchâtel. » In : Delporte, Henri (Hg.) : *La dame de Brassempouy*: actes du Colloque de Brassempouy juillet 1994. Liège: Université de Liège, Service de préhistoire. 71-78.
- Encyclopaedia Britannica (2004) :
 « Coal. » Encyclopaedia Britannica Online. URL : <http://search.eb.com/eb/article?tocId=50671> [Stand 30.11.2004]
- Encyclopaedia Universalis (2002):
 « Fossiles et fossilisation. » « Bassins houillers. » « Charbon. » « Bitume. » In : *Encyclopaedia Universalis* 8.
- Eriksen, Berit Valentin (1991) :
 « Change and Continuity in a Prehistoric Hunter-Gatherer Society: A Study of Cultural Adaptation in the Late Glacial-Early Postglacial Southwestern Germany. » In : Müller-Beck, Hansjürgen (Hg.) : *Archaeologica Venatoria Band 12*. Tübingen: Verlag Archaeologia Venatoria Institut für Urgeschichte der Universität Tübingen (=Reihe). Seitenangabe.
- Failing, Jutta (1999) :
 « Trauer- und Gedenkschmuck des 19. Jahrhunderts-Trauerschmuck aus Jet. » In : *Nachrichten Heimatverein Rodheim-Bieber e.V. Nr. (1)*, 4-9.
- Felton, John (2004):
 « Whitby Jet. » URL : <http://hometown.aol.com/jfelton104/jet.htm> [Stand 02.12.2004]

- Flaig, W. (1968) :
 « Biochemical Factors in Coal Formation. » In : Murchison, Duncan/ Westoll, Stanley T. (Hg.) :
Coal and Coal-bearing Strata. Edinburgh and London: Oliver & Boyd. 19-29.
- Forstner-Billau, Robert (2004) :
 « Das verschollene Volk- Die Anasazi. » URL : <http://members.chello.at/robert.forstner-billau/indianer/anasazi/anas3.htm> [Stand 10.09.2005]
- Gammidge, Larissa (2004) :
 « Coal: an Introduction by Larissa Gammidge. » URL :
<http://www.newcastle.edu.au/discipline/geology/research/cfk/undp.htm> [Stand 05.11.2004]
- Grattan, D. W./ Clarke, R. W. (1987) :
 « Conservation of waterlogged wood. » In : Pearson, Colin (Hg.) : *Conservation of Marine Archaeological Objects*. London, Boston: Butterworths (=Butterworths Series in Conservation and Museology). 164- 191.
- Günther, Birgit (1981) :
Bestimmungstabellen für Edelsteine, synthetische Steine, Imitationen. Kirschweiler:
 Verlagsbuchhandlung Elisabeth Lenzen. 102-103.
- Hagendorn, A./ Stelzle-Hüglin, S./ Stegmüller, Chr. (2005) :
 « Basel BS, Martinsgasse 6 und 8 (2004/1). » In : *Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte Band 88*, 349-350.
- Haley Clarke, Jane (2005) :
 « Morning Glory Antiques and Jewelry. »
 URL: <http://www.morninggloryantiques.com/JewelChatJet.html> [Stand 10.09.2005]
- Hochuli, Stefan/ Niffeler, Urs/ Rychner, Valentin (Hg.) (1999) :
SPM III Bronzezeit. Basel: Schweizerische Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte (=SPM Die Schweiz vom Paläolithikum bis zum frühen Mittelalter). 294-296.
- Hoechst (1992):
Polyethylenglykole. Frankfurt am Main: Hoechst Aktiengesellschaft. 4-26.
- Hoffmann, Per/ Blanchette, Robert A. (1997) :
 « The Conservation of a Fossil Tree Trunk. » In : *Studies in Conservation* 42, 74-82.
- Höneisen, Markus/ Peyer, Sabine (1994) :
Schweizersbild- ein Jägerlager der Späteiszeit. Beiträge und Dokumente zur Ausgrabung vor 100 Jahren. Schaffhausen: Kantonsarchäologie (=Schaffhauser Archäologie 2). 119- 126.
- Horie, C.V./ 2. (1998) :
Materials for Conservation. Organic Consolidants, Adhesives and Coatings. Oxford, London:
 Butterworth-Heinemann (=Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology).
 92-117.
- Howie, Francis (1978) :
 « Storage Environment and the Conservation of Geological Material. » In : *The Conservator* 2,
 13-19.
- Howie, Francis (1995) :
 « Aspects of Conservation of Fossil Resins and Lignitic Materials. » In : Collins, Chris (Hg.) :
The Care and Conservation of Palaeontological Material. Oxford: Butterworth and Heinemann
 (=Series in Conservation and Museology). 47-52.

- Hunter, F. J. et al. (1993) :
 « The Scientific Identification of Archaeological Jet-like Artefacts. » In : *Archaeometry* 35; 1, 69-89.
- Hunter, Fraser/ Davis, Mary (1994) :
 « Early Bronze Age Lead- a Unique Necklace from Southeast Scotland. » In : *Antiquity* 68, 824-830.
- Jeberien, Alexandra (2000) :
 « Archäologischer Bernstein. Untersuchung verschiedener Festigungsmöglichkeiten. »
 Diplomarbeit, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. 1-99.
- Klaus, Wilhelm (1987) :
Einführung in die Paläobotanik. Fossile Pflanzenwelt und Rohstoffbildung. Wien: Franz
 Deuticke Verlagsgesellschaft m.b.H. 60-112.
- Koller, J./ Baumer, B. / Baumer, U. (1997) :
 « Die Untersuchungen von Bernstein, Bernsteinölen und Bernsteinlacken. » In : *Sonderheft
 Metalla* §1997, 85-102.
- Kremer Pigmente (2005) :
 « Primal AC 33. » URL : <http://kremer-pigmente.de/intl.catalog/75202> [Stand 31.01.2005]
- Kündig, R. et al (1997) :
Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Auflage. Verlagsort : Verlag (=Reihe). 408; 412-415.
- Kunstharze Hoechst Technisches Merkblatt. Mowiol.* (1990). Frankfurt am Main: Hoechst AG.
- Lambert, J. B./ Frye, J. S./ Jurkiewicz, A. (1992) :
 « The Provenance and Coal Rank of Jet by Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. » In : *Archaeometry* 34; 1, 121-128.
- Lawson, Andrew J. (1975) :
 « Shale and Jet Objects from Silchester. » In : *Archaeologia* 105, 241-275.
- Lehmann, Eberhard et al (2005) :
 « Massnahmen zur Holzfestigkeitserhöhung. Neutronenradiographie als Nachweis des Eindringverhaltens von Harzen. » In : *Restauro* 3, 194-199.
- Ligouis, Bertrand (1997) :
 « Organische Petrologie. » Vorlesung, Institut und Museum für Geologie und Paläontologie
 Universität Tübingen. 1-13.
- Ligouis, Bertrand (2000) :
 « Kohlenpetrographische Untersuchung an Funden aus kohlenstoffreichen organogenen Sedimenten aus der Heuneburg-Aussensiedlung bei Hunderingen an der Donau. » In : Kurz, Siegfried (Hg.) : *Die Heuneburg-Aussensiedlung. Befunde und Funde.* Stuttgart: Konrad Theiss Verlag (=Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg Band 72). 179-185.
- Ligouis, Bertrand (im Druck) :
 « Jais, lignite, charbon et autres matières organiques fossiles: application de la pétrologie organique à l'étude des éléments de parure et des fragments bruts. » In : Bullinger, Jérôme/ Leesch, Denise/ Plumettaz Nicole (Hg.) : *Premiers éléments pour l'analyse d'un habitat de plein air. Le site magdalénien de Monruz 1.* Saint-Blaise: Editions du Ruau (=Archéologie neuchâteloise 34). Annexe 3.

- Luckygemstones.com :
 « Jet. » URL : <http://www.luxkygemstones.com/jet-jewelry-black-mourning-gem.htm> [Stand 29.10.2004]
- Mauser, Florian (1970) :
Die Jungpaläolithische Höhlenstation Petersfels im Hegau.. Verlagsort : Verlag (=Badische Fundberichte, Sonderheft 13). 74-81; Tafel 96-99.
- Moore, L. R. (1968) :
 « Cannel Coals, Bogheads and Oil Shales. » In : Murchison, Duncan/ Westoll, Stanley T. (Hg.) : *Coal and Coal-bearing Strata*. Edinburgh and London: Oliver & Boyd. 19-29.
- Mowilith 30, 50, 60, 35/73-25%, DMC2.* (1999) Brüttsellen: Lascaux.
- Mowital. Polyvinylbutyral vom Feinsten.* (2003). Frankfurt am Main: Kuraray Specialities Europe GmbH.
- Muller, Helen (1987) :
Jet. London: Butterworths & Co (=Butterworths Gem Books). 1-16; 94-145.
- Müller, Felix/ Kaenel, Gilbert/ Lüscher, Geneviève (Hg.) (1999) :
SPM IV Eisenzeit. Basel: Schweizerische Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte (=SPM Die Schweiz vom Paläolithikum bis zum frühen Mittelalter). 199-201.
- Müller, Herbert (2003) :
 « Kännelkohle und ihre Bedeutung für Kultur und Bergbau. » In : *Saarpfalz, Blätter für Geschichte und Volkskunde, Nr. 79 der Schriftenreihe, 2003 (4)*, 28-39.
- Müller, Herbert (2004) :
 « Grube Heinitz. » URL : <http://www.heinitz.tnmssoft.com/grube.html> [Stand 21.09.2004]
- Newman, Andrew (1998) :
 « Pyrite Oxidation and Museum Collections : A Review of Theory and Conservation Treatments. » In : *The Geological Curator 6 (10)*, 363-371
- Oddy, W. A/ Lane, Hannah (1976) :
 « The Conservation of Waterlogged Shale. » In : *Studies in Conservation 21*, 63-66.
- Oschmann (2001):
 « Der Posidonienschiefer (Toarcium, Unterer Jura) von Dotternhausen. » URL : <http://servermac.geologie.uni-frankfurt.de/Staff/Homepages/Oschmann/Oschmann/Oberrhein-final/Oberrhein.html> [Stand 20.01.2005]
- Plenderleith, H. J. (1956) :
The Conservation of Antiquities and Works of Art: Treatment, Repair and Restoration. Oxford: University Press. 154-156.
- Pollard, A. M./ Bussell, G. D./ Baird, D. C. (1981) :
 « The Analytical Investigation of Early Bronze Age Jet and Jet-like Material From the Devizes Museum. » In : *Archaeometry 23; 2*, 139-167.
- Preuschoft-Güttler, Astrid (1995):
 « Untersuchungen zur Präzision des Begriffes Gagat im Magdalénien Südwestdeutschlands und der Schweiz. »Magisterarbeit, Geowissenschaftliche Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- Primal AC-337. Binder for Exterior Paints for Wood Preliminary Data Sheet.* (1996). Philadelphia: Rohm and Haas Company.

- Rathgen, Friedrich (1924) :
Die Konservierung von Altertumsfunden mit Berücksichtigung ethnografischer und kunsthandwerklicher Sammlungsgegenstände. 2. Auflage. Berlin und Leipzig: Verlag Walter de Gruyter & Co (=Handbücher der staatlichen Museen zu Berlin). 148-149.
- Riederer, Josef (1987) :
Archäologie und Chemie- Einblicke in die Vergangenheit. Berlin: Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz Rathgen Forschungslabor. 231-233.
- Rixon, A. E. (1976) :
Fossil Animal Remains. Their Preparation and Conservation. London: The Athlone Press. 22; 139-152.
- Rochna, Otto (1961) :
 « Zur Herkunft der Manchinger Sapropelit-Ringe. » In : *Germania* 39, 329-354.
- Rochna, Otto (1962) :
 « Hallstattzeitlicher Lignit- und Gagat-schmuck. Zur Verbreitung, Zeitstellung und Herkunft. » In : *Fundberichte aus Schwaben, Württembergischer Geschichts- und Altertumsverein*, neue Folge 16, 44-83.
- Rochna, Otto (1984) :
 « Das Tonschiefer- Sapropelit-, Gagat- und Wachsmaterial der Heuneburg. Materialbeschaffenheit und naturwissenschaftliche Untersuchungsergebnisse. » In : *Heuneburgstudien* 5, 91-94.
- Rudhardt, Paul (1919):
Les combustibles suisses et leur utilisation. Toubé- lignite, houille-anthracite. Genève: Sonor S. A.
- Sales, K. D. et al. (1987) :
 « Identification of Jet and Related Black Materials with ESR Spectroscopy. » In : *Archaeometry* 29; 1, 103-109.
- Schoch, Werner/ Ruckstuhl, Beatrice (2004) :
 « Dünnschliffuntersuchungen an Sapropelitarmringen. » In : Regierungsrat des Kantons Zug (Hg.) : *Die spätbronzezeitliche Ufersiedlungen von Zug-Sumpf Band 3/1 die Funde 1923-37*. Zug: Kantonales Museum für Urgeschichte Zug.
- Schumann, Walter (1991) :
Der neue BLV Steine- und Mineralienführer. Dritte durchgesehene Auflage. München: BLV Verlagsgesellschaft mbH. 8-35; 300-303; 338-371
- Sicherheitsdatenblatt Kanadabalsam für die Mikroskopie*. (2003). Darmstadt: Merck KGaA.
- Sicherheitsdatenblatt Primal AC-337 Emulsion*. (2002). Reinach: Christ Chemie.
- Sicherheitsdatenblatt SILRES BS OH 100*. (2005). München: Wacker-Chemie GmbH.
- Silres BS OH 100. Bautenschutzmittel*. (2003) München: Wacker-Chemie GmbH.
- Smith, A. H. V. (2005) :
 « Coal Microscopy in the Service of Archaeology. » In : *International Journal of Coal Geology* 62, 49-59.
- Smith, Herbert G. F. (1972) :
Gemstones. Fourteenth edition. London: Chapman and Hall Ltd. 502.

- Stach, E. et al. (1975/ 1982):
Stach's Textbook of Coal Petrology. Dritte Auflage. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.
- Taylor, G. H. et al. (Hg.) (1998):
Organic Petrology. Mit Beiträgen von Glick D. C. et al. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Bornträger.
- Teichmüller, M. (1992) :
 « Organic Petrology in the Service of Archaeology. » In : *International Journal of Coal Geology* 20, 1-21.
- Teichmüller, Marlies (1987) :
 « Organic Material and very low-grade Metamorphism. » In : Frey, Martin (Hg.) : *Low Temperature Metamorphism*. Glasgow, London: Blackie & Son Ltd. 114-161.
- Teichmüller, Marlies (1989):
 „ The Genesis of Coal from the Viewpoint of Coal Petrology.“ In: Lyons, P. C./ Alpern B. (Hg.):
Peat and Coal : Origin, Facies, and Depositional Models. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V. [Reprinted from the International Journal of Coal Geology, Vol. 12, No. 1-4].
- Tietz, Olaf (2003) :
 « Bergung, Konservierung und Rekonstruktion eines 8,6m langen fossilen Sumpfyypressenstammes. » In : *The Preparator* 49 H.1, 11-25.
- Trusted, Marjorie (1996) :
Spanish Sculpture. A Catalogue of the Collection in the Victoria and Albert Museum. London: Victoria and Albert Museum. 142-156
- Unger, Achim (1990) :
Holzkonservierung. Schutz und Festigung von Holzobjekten. 2. Auflage. München: Callwey. 15-17; 71-134.
- University of Bristol (2005):
 « The Posidonienschiefer. Posidonia Oil Shale. » URL :
<http://paleo.gly.bris.ac.uk/Paleofiles/Lagerstatten/posidonia> [Stand 20.01.2005]
- Watkinson, David (1987) :
First Aid for Finds. Second edition. Hertford Herts: Rescue the British Archaeological Trust. 22-26; 51.
- Watts, Siobhan/ Pollard, Mark A. (1998) :
 « Identifying Archaeological Jet and Jet-like Artifacts Using FTIR. » URL :
www.irug.org/documents/contents.pdf [Stand 30.09.2004]
- Watts, S./ Pollard, A.M./ Wolff, G.A. (1999) :
 « The Organic Geochemistry of Jet: Pyrolysis-gas Chromatography/ Mass Spectrometry (Py-GCMS) Applied to Identifying Jet and Similar Black Lithic Materials- Preliminary Results. » In :
Journal of Archaeological Science, 26, 923-933.
- Webster, Robert (1975) :
Gems. Their Sources, Description and Identification. 3. Auflage. London-Boston: Butterworths. 516-518; 516-565;580-582.
- Weller, Manfred/ Wert, Charles (1993) :
 « The Fossil Hydrocarbon Jet. » In : *Die Geowissenschaften* 11.Jahrg. Nr. 9, 319-325.
- Whitby Literary & Philosophical Society (2003) :
 « Whitby Museum FAQ about Jet. » URL : <http://www.durain.demon.co.uk/jet/index.htm> [Stand 02.12.2004]

Wihr, Rolf (1986) :
Restaurierung von Steindenkmälern. Ein Handbuch für Restauratoren, Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. 2. Auflage. München: Verlag Callwey. 112-116.

3sat online (2002) :
« Pechsschwarze Eleganz. Edler Jett-Schmuck ist wieder en vogue. » URL :
<http://www.3sat.de/tips/mode/39858/> [Stand 29.09.2004]

10.2 Bilderverzeichnis

Bild 1: Kaustobiolithperle, durch die Trocknung auseinandergesprengt.	1
Bild 2: Perle nach der Restaurierung. Die Einzelteile passen nicht aufeinander, es bleiben Spalten sichtbar.	1
Bild 3: Verwendete Rohmaterialien, alle Angaben (100% entspricht 482 Objekten)	9
Bild 4: Verwendete Rohmaterialien, nur analysierte Objekte (100% entspricht 58 Objekten)	9
Bild 5: Wildpferdgravierung, Gynäkomorphen Anhänger, Perlen und doppelt durchbohrte Anhänger vom Petersfels (PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 3f)	11
Bild 6: Steinzeitliches Amulett in der Form der Larve der Dasselfliege aus Gagat, gefunden in Deutschland (MULLER, 1987, S. 94)	12
Bild 7: Bronzezeitliche Halskette aus Gagat mit Abstandhalterplatten, gefunden in Mount Stuart, Isle of Bute (DAVIS/ SHERIDAN, 1996, S. 18)	13
Bild 8: Armringe der Hallstattzeit (links) und Latènezeit (rechts) (MÜLLER/ KAENEL/ LÜSCHER, 1999, S. 201)	14
Bild 9: Verbreitung von Xylithringen in der Hallstattzeit (ROCHNA, 1962, S. 47)	14
Bild 10: Verbreitung der Sapropelitringle in der Latènezeit. (Punkte: Grab oder Gäberfeld mit einem/ mehreren Ringen. Dreieck: Siedlungsfunde.) (ROCHNA, 1961, S. 331)	14
Bild 11: Römische Halskette mit Medaillon, gefunden in Deutschland (MULLER, 1987, S. 96)	15
Bild 13: Römische Gagatanhänger mit dem Kopf der Medusa (MULLER, 1987, S. 96)	15
Bild 14: Mittelalterliches Gagatkreuz mit Silber, Deutschland 16. Jh. (MULLER, 1987, S. 99)	17
Bild 16: Rosenkranz aus Schwäbisch Gmünd mit Silberfiligran und Gagatperlen (MULLER, 1987, S. 98)	17
Bild 15: Higas aus Gagat, mit geschnitztem Kreuz (MULLER, 1987, S. 107)	17
Bild 19: Der Heilige Jakobus aus Gagat, 16. Jh. (MULLER, 1987, S. 105)	17
Bild 18: Viktorianischer Gagatschmuck, sogenannte Tropfenkette (HALEY CLARKE, 2005)	19
Bild 19: Viktorianische Lady mit Gagatschmuck (HALEY CLARKE, 2005)	19
Bild 19: Zuniindianer beim Bohren von Gagat (MULLER, 1987, S. 115)	20
Bild 21: Pueblofrosch aus Pechkohle mit Türkiseinlagen (FORSTNER-BILLAU, 2004)	20
Bild 22: Spezielles Silexwerkzeug für die Bearbeitung auf der Drehbank (DAVIES, 1936, S. 207)	21
Bild 24: Gagatwerkstatt von William Wright in Whitby 1890 (MULLER, 1987, S. 42)	22
Bild 23: J. W. Barker arbeitet am bleiernen Schleifrad (MULLER, 1987, S. 57)	23
Bild 27: Schnitzwerkzeug und Musterbuch für Broschen (MULLER, 1987, S. 56)	23

Bild 26: Beispiel eines marinen oxischen und anoxischen Lebensraumes (OSCHMANN, 2004)	27
Bild 26: Inkohlungsreihe (LIGOUIS, 1997)	28
Bild 28: Entwicklung der Bestandteile mit fortschreitender Inkohlung (LIGOUIS, 1997)	29
Bild 29: Pyrit Framboid (TAYLOR et al., 1998, S. 265)	35
Bild 30: Gliederung der Erdgeschichte (SCHUHMAN, 1991, S. 339)	40
Bild 31: Kohlevorkommen der Schweiz (KÜNDIG et al., 1997, S. 408)	42
Bild 32: Aufschlüsse des Posidonienschiefers in der schwäbischen Alb (UNIVERSITY OF BRISTOL, 2005)	43
Bild 33: Geografie Europas während des Toarciums. Im Bereich des Schelfbeckens bildete sich der Ölschiefer des Toarciums. (OSCHMANN, 2001)	44
Bild 34: Strukturelle Molekülmodelle von Kohlen mit geringem Inkohlungsgrad. Die aromatischen Einheiten sind schraffiert. Die Moleküle zeigen keine Ordnung. (TAYLOR et al., 1998, S. 115)	48
Bild 35: Strukturelle Molekülmodelle von stark inkohlten Kohlen, mit mehr aromatischen Einheiten (schraffiert) und mit wenigen Heteroatomen (schwarze Punkte). Die Moleküle sind fast parallel eingereiht. (TAYLOR et al., 1998, S. 115)	48
Bild 36: Einige biologische Moleküle (LIGOUIS, 1997)	48
Bild 38: Perlen aus 'Soft Jet', mit typischen Spalten, die kurz nach der Bearbeitung entstehen (Muller, 1987, S. 4)	54
Bild 39: Mikroskopaufnahme des Probematerials. Es sind verschiedene Arten an Spalten erkennbar.	70
Bild 40: Mikroskopaufnahme des Probematerials. Pyrit ist in grossen Mengen vorhanden.	70
Bild 41: Zersägtes Probestück Vitrain, Nr. G28	71
Bild 42: Zeichnerische Dokumentation der Versuchsstücke	71
Bild 43: Zerstörung des Probestücks G28/18 durch die Trocknung (ca 1:1)	72
Bild 44: Prozentuale Dimensions- und Gewichtsveränderungen durch die Trocknung bei Stück G28/18	73
Bild 45: Probestücke in den Behältern für die Behandlung	74
Bild 46: Dimensionstreue	75
Bild 47: Die Probestücke im nassen (links) und im konservierten (rechts) Zustand. Die besten Resultate zeigen PEG 4000 und Peg 1000.	76
Bild 48: G28/3 unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die ursprünglichen Holzzellen werden als liegende Achten sichtbar.	79
Bild 49: G28/3 unter dem Rasterelektronenmikroskop. Es sind zwei gegeneinander stossende Holzzellen sichtbar, die stark komprimiert und vergelt sind.	79
Bild 50: Armreiffragment 36 im nassen Zustand, vor der Behandlung	81
Bild 51: Armreiffragment 45 im nassen Zustand, vor der Behandlung	81
Bild 52: Gefässfragment 49 im nassen Zustand, vor der Behandlung	81
Bild 53: Mikroskopieaufnahme einer Probe von Armreiffragment 36. Die kleinen weissen Punkte sind Pyrite.	84

Bild 54: Mikroskopieaufnahme unter Fluoreszenz einer Probe von Armreiffragment 36. Gelb sichtbar ist Alginit.	84
Bild 53: Mikroskopieaufnahme einer Probe von Armreiffragment 45. Die weissen Flecken sind Pyrite.	84
Bild 54: Mikroskopieaufnahme unter Fluoreszenz einer Probe von Armreiffragment 45. Gelb sichtbar ist Alginit, die feinen beigen Linien sind Sporinite.	84
Bild 56: Mikroskopieaufnahme einer Probe von Gefässfragment 49. Es handelt sich um Knochengewebe.	84
Bild 57: Mikroskopieaufnahme unter Fluoreszenz einer Probe von Gefässfragment 49.	84
Bild 59: Limnische und paralische Kohlevorkommen (KLAUS, 1987, S. 97)	85
Bild 59: Armreiffragment 36 nach der Behandlung	91
Bild 60: Armreiffragment 45 nach der Behandlung	91

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Artikel zur Konservierung von Kaustobiolithen	7
Tabelle 2: In der Umfrage erwähnte Konservierungsverfahren	10
Tabelle 3: Erhaltung und Umwandlung organischer Materie im Zusammenhang mit dem Vorhandensein von Sauerstoff (nach STACH, 1982, S. 35; PREUSCHOFT-GÜTTLER, 1995, S. 33)	26
Tabelle 4: Mazeralgruppen und ihre Eigenschaften (nach GAMMIDGE, 2004)	32
Tabelle 5: Mazerale und ihre Charakteristiken (TEICHMÜLLER, 1987, S. 115)	32
Tabelle 6: Lithotypen der Humuskohlen und der Sapropelkohlen (nach Taylor et al., 1998, S. 276)	33
Tabelle 7: Mineralische Bestandteile von Kohlen (nach STACH, 1982, S. 123)	34
Tabelle 8: Kohlevorkommen der Schweiz (nach KÜNDIG et al., 1997, S.413ff; RUDHARDT, 1919, 25ff)	41
Tabelle 9: Elementare Zusammensetzung (nach SCHUHMANN, 1991, S. 300; WERT/ WELLER, 1993, S. 322)	47
Tabelle 10: Mohshärte (nach SCHUHMANN, 1991, S. 22)	49
Tabelle 12: Ausgewählte Konservierungsmethoden für die Testreihe	63

11 Anhang

Fragenbogen Umfrage (auf deutsch)	105
Angeschriebene Verbände für die Umfrage	107
Institutionen, die an der Umfrage teilgenommen haben	107
Auswertung der Antworten der Umfragen	108
Verwendete Produkte	109
Verwendete Geräte	109
Trocknung des Probestückes G28/18	110
Versuchsreihe auf G28: Dimensions- und Gewichtsveränderungen	112
Versuchsreihe auf G28: Beschrieb nach der Konservierung	113
Objekte: Dimensions- und Gewichtsveränderungen	114
Objekte: Beschrieb nach der Konservierung	115
Geologisches Probenmaterial (Auszug Datenbank)	117
Archäologisches Material (Auszug Datenbank)	119
Kohlenpetrografische Analyse: Zusammenfassende Tabellen	120
Kohlenpetrografische Analyse: Bilder	124
Computertomografie: Bilder	125
Computertomografie: Hounsfield Dichte vor und nach der Konservierung der Objekte	126
Elektronenmikroskop: Bilder	127
Energiedispersive Röntgenanalytik: Spektren	128

Fragenbogen Umfrage (auf deutsch)

Das Projekt: Objekte aus Gagat, Lignit, Pechkohle, Kännelkohle oder ähnlichem Material sind schwierig zu konservieren. Sie zerbröckeln, sobald sie an der Luft trocknen. Im Rahmen meiner Diplomarbeit möchte ich dieses Problem untersuchen, und versuchen Lösungsansätze für die konservierende Behandlung zu finden. Dabei wären mir Ihre Erfahrungen mit Gagat eine sehr grosse Hilfe!

Ziel der Umfrage: Informationen erhalten darüber, welche konservierenden Behandlungen in der Schweiz und im Ausland auf Gagatobjekten angewendet wurden, und mit welchem Erfolg.

Institution (Name und Adresse, evtl email und Telefon):

Person und Funktion:

Land:

1. Besitzt Ihre Institution Objekte aus Gagat oder ähnlichen Materialien¹? Ja Nein
(bzw hat Ihre Institution solche Objekte behandelt?)

a) Wieviele insgesamt? (ungefähre Anzahl)

b) Welche Art Objekte? (ungefähre Anzahl)

Schmuckstücke
unbearbeitetes Rohmaterial
Weiteres

Gebrauchsgegenstände
Schnitzabfälle

c) Aus welcher Zeit? (ungefähre Anzahl)

Steinzeit
Eisenzeit
Mittelalter

Bronzezeit
Antike
jünger als Mittelalter

d) Aus welchem Rohmaterial? (ungefähre Anzahl, bitte auch Art der Bestimmung nennen)

Gagat²
Braunkohle⁴
Weiteres⁶

Sapropelkohle³
Steinkohle⁵
Nicht bekannt

Bestimmungsmethoden

2. In welchem Zustand sind die Objekte? (ungefähre Anzahl)

Gut konserviert, stabil
Fragil

Oberflächlich beschädigt
Zerbröckelt

a) Wie waren die Fundbedingungen?

Grabungsfund

Nassfund

b) Gibt es offensichtliche Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Objekte mit:

deren Alter
deren Bearbeitung

deren Rohmaterial
deren Bodenlagerung

Bitte präzisieren:

11.1.1 3. Welche konservierenden Behandlungen wurden bei fundfrischem Gagat angewendet?

Keine
Volltränkung
Reinigung

Festigung der Oberfläche
kontrollierte Trocknung
nicht bekannt

a) Wie sind die Objekte aufbewahrt?

Ohne besondere Massnahmen
Im Wasser

Klimatisierter Raum
In Vitrine (Ausstellung)

4. Welche Produkte und Apparate wurden verwendet?

Für die Volltränkung
Für die Oberflächenfestigung
Für die kontrollierte Trocknung

Für Klebungen
Für die Reinigung

a) Resultate, Erfolge, Misserfolge?

b) Beobachtungen von Unverträglichkeiten? (zB mit gewissen Lösungsmitteln?)

c) Wie ist die Langzeitstabilität? (Behandlung vor ca. wie vielen Jahren?)

11.1.2 5. Kommentare:

Vielen Dank, dass Sie an meiner Umfrage teil genommen haben. Wenn Sie weitere Hinweise, Literaturangaben, nicht publizierte Berichte über durchgeführte Testreihen oder wichtige Kontakte haben, bin ich natürlich sehr froh, wenn sie mich benachrichtigen. Ganz besonders wertvoll für mich wäre Probematerial, auf dem ich Testreihen durchführen könnte.

Viele liebe Grüsse

Sabine Brechbühl

Sabine Brechbühl, Grand-Rue 7, CH-2000 Neuchâtel, sabine.brechbuhl@he-arc.ch
(0041) 32/ 710 17 58

Haute école d'arts appliqués HE-Arc, Haute école spécialisée HES-SO, Conservation restauration,
Objets archéologiques et ethnographiques, Rue de la paix 60, CH-2300 La Chaux-de-Fonds

¹ Gagat ist ein geologisch präziser Begriff, wird aber in der Archäologie für verschiedene Rohstoffe verwendet, da diese sich stark ähneln und ohne Analysen schlecht auseinander zu halten sind. Es handelt sich vor allem um verschiedene Kohlearten, oder aber um Imitate aus Glas, Horn, Holz, Kunststoff usw., wenn es sich um jüngere Objekte handelt.

² Nach geologischer Definition ist Gagat inkohltes und bitumengetränktes Holz

³ Sapropelkohlen, auch Kännelkohlen genannt, sind aus Sporen, Algen und Pollen entstanden.

⁴ Lignit ist das Synonym von Braunkohle. Braunkohle entsteht aus organischen Resten, wobei eine Anreicherung an Kohlenstoff und eine Abnahme von Sauerstoff und Wasserstoff statt findet (sogenannte Inkohlung).

⁵ Entsteht wie Braunkohle, der Prozess der Inkohlung ist aber weiter vorgeschritten. Steinkohle hat also einen höheren Kohlenstoffgehalt als Braunkohle

⁶ Es wurden auch Ölschiefer, Onyx, Obsidian oder andere schwarze Gesteinsarten verwendet, in neuerer Zeit auch Imitate aus Holz, Horn, Kunststoff, Glas, etc.

Angeschriebene Verbände für die Umfrage

Zielgruppe:	Verbände:	Verschickt durch :
Konservatoren Restauratoren	SKR (Schweiz AKREA (Frankreich))	Valentin Boissonnas Valentin Boissonnas
Kantonsarchäologen	Verband scheizerischer Kantonsarchäologen	Cyntia Dunning
Museen	VMS/ ICOM (Schweiz)	Joseph Bruelisauer

Institutionen, die an der Umfrage teilgenommen haben

Institution	Kanton oder Land	Funktion der Person, die den Fragebogen ausgefüllt hat
Amt für Archäologie	TG	Leiter Sammlung
Service archéologique cantonal	FR	Responsable laboratoire de conservation-restauration
Römerstadt Augst	BL	Konservatorin-Restauratorin
Museum für Urgeschichte	ZG	Museumsleiter
Musée de Normandie	France	Restauratrice d'objets archéologiques
Materia viva, (atelier)	France	Directrice
Naturhistorisches Museum Basel	BL	Konservator Mineralogie
Musée Schwab	BE	Direktorin
Historisches Museum Bern	BE	Wissenschaftli. Assistentin Ur- und Frühgeschichte
Kantonsarchäologie	Schaffhausen	Kantonsarchäologe

Auswertung der Antworten der Umfragen

Frage	TG	FR	BL	Zug	F 1	F 2	BL	BE	BE	SH	TOT	%
1a Anzahl insgesamt	45	57	20	13	100	20	37	10	80	100	482	100
b Schmuckstücke	42	35	20	13	90	x	9	10	80	x	299	62.03319502
unbearbeitetes Rohmaterial	3						28			x	31	6.43153527
weiteres		22									22	4.564315353
Gebrauchsgegenstände					10	x					10	2.074688797
Schnitzabfälle										x	0	0
c Steinzeit	3								x	100	103	21.36929461
Eisenzeit	4	41			x	x		10	x		55	11.41078838
Mittelalter											0	0
Bronzezeit	31	1		11	x	x			x		43	8.921161826
Antike	7	9	20		x						36	7.468879668
jünger als Mittelalter						x					0	0
nicht bestimmt, anderes		6		2			37				45	9.336099585
d Gagat	35		10	11		x	13		x		69	14.3153527
Lignit/ Braunkohle	4	54	1		100	x	19		x		178	36.92946058
Weiteres		1									1	0.20746888
Sapropelkohle	6	2	9	2			5		x		24	4.979253112
Steinkohle											0	0
nicht bekannt								10		100	110	22.82157676
	Petro			Dünn								
2 gut konserviert, stabil	27	x	17	x		x	13	10	x	x	67	13.90041494
Fragil	3	x			100	x				x	103	21.36929461
oberflächlich beschädigt	15	x	1				14		x	x	30	6.22406639
zerbröckelt		x	2	x			10			x	12	2.489626556
a Grabungsfund	x	x	x		x	x	x			x	7	
Nassfund		x		x	x						3	
b Alter		x									1	
Bearbeitung						x					1	
Rohmaterial		x	x			x					3	
Bodenlagerung		x								x	2	
3 Keine			x				x			x	3	
Volltränkung		x				x					2	
Reinigung	x	x			x						3	
Festigung der Oberfläche		x								x	2	
kontrollierte Trocknung		x			x						2	
nicht bekannt			x	x					x	x	4	
a Ohne Massnahmen				x						x	2	
Im Wasser									x		1	
Klimatisierter Raum	x				x		x	x	x		5	
Vitrine	x		x							x	3	

4 Volltränkung	PEG 400	Primal	
Festigung der Oberfläche	P 72		
kontrollierte Trocknung	serre	serre	
Klebung	nitrocell	P72	
Reinigung	eau	eau	

Verwendete Produkte

PEG	Polyethylenglycol 4000, 1000 und 200, Höchst Lieferant: Omya, Postfach 32, 4665 Oftringen
Primal	Acrylemulsion, Rohm and Haas Lieferant: Christ Chemie AG, Kagenstrasse 17, CH-4153 Reinach
Mowiol	Polyvinylalkohol Hoechst Lieferant: Plüss-Staufer AG, 4665 Oftringen
Mowital	Polyvinylbutyral, Kuraray Specialities Europe KSE Lieferant: Omya, Postfach 32, 4665 Oftringen
Mowilith	Polyvinylacetat, Lascaux Lieferant: Alois K. Diethelm AG, Lascaux Farbenfabrik, Zürichstrasse 42, CH-8306 Brüttisellen
Silres BS OH 100	Kieselsäureester, Wacker Lieferant: Wacker-Chemie GmbH, Hanns-Seidel-Platz 4, 81737 München
Kanadabalsam	Kanadabalsam, Wacker Lieferant: VWR International AG, Lerzenstrasse 16/18, 8953 Dietikon
Silikonkautschuk	Elastosil M4601 A und B (Härter), Wacker Lieferant: AMEBA, Schirmer Joseph, Immengasse 21/ Lothringerstr. 6, 4004 Basel
Epoxydharz	Araldit RENLAM M-1 und REN HY 956 (Härter), Ciba Lieferant: Astonirit AG, Kobiboden, 8840 Einsiedeln

Verwendete Geräte

Gefriertrocknungsanlage	Gebaut: 1996, Adolf Kühner AG, Birsfelden Inox Kammer: Länge 150cm, Durchmesser 64cm, Volumen ca 0,5m ³ Kondensator: Christ Alpha 1-4, Kapazität max. 4kg Pumpen: Balzer Duo 016B 16m ³ und Leybold Trivac BD25B 25m ³ Gefrierschrank: Harris SLT-13V-40, 127 x 59 x 48cm
-------------------------	---

Trocknung des Probestückes G28/18

Tabelle der während der Trocknung aufgenommenen Daten. Das Stück wird jeweils während des Arbeitstages bei Raumklima getrocknet und dokumentiert (Photo und Daten), abends wieder „luftdicht“ eingepackt. Da das Stück bei Nacht nicht überwacht werden kann, wird die Trocknung nur bei Tage durchgeführt.

16.2.05: ERSTER TAG

Zeit	Gewicht in g	Länge in cm	Breite li in cm	Breite re in cm	Höhe li in cm	Höhe re in cm	°T in °C	RH in %
9h00	3.55	2.68	1.16	1.13	0.82	0.90	23	42.5
9h30	3.51	2.69	1.15	1.13	0.80	0.89	23	42.5
10h00	3.44	2.70	1.15	1.13	0.80	0.99	23	42.5
10h30	3.40	2.70	1.14	1.12	0.80	1.06	23.5	42.5
11h00	3.34	2.70	1.14	1.12	0.79	1.17	23.5	42
11h30	3.29	2.67	1.12	1.11	0.79	1.15	23.5	42
12h00	3.24	2.65	1.12	1.10	0.77	1.16	23.5	42
12h30	3.20	2.65	1.11	1.10	0.77	1.15	23.5	42
13h00	3.17	2.62	1.10	1.09	0.77	1.20	23.5	42
13h30	3.15	2.60	1.09	1.09	0.76	1.25	23.5	41
14h00	3.10	2.59	1.08	1.09	0.75	1.27	24	41.5
14h30	3.06	2.57	1.07	1.07	0.75	1.31	24	42
15h00	3.03	2.55	1.07	1.07	0.74	1.30	24	42.5
15h30	3.00	2.54	1.06	1.06	0.74	1.31	24	42.5
16h00	2.97	2.52	1.06	1.06	0.74	1.31	24	42.5
16h30	2.94	2.51	1.05	1.05	0.73	1.31	24	42.5
17h00	2.93	2.50	1.05	1.05	0.72	1.29	24	41

21.2.05 : ZWEITER TAG

9h00	2.91	2.50	1.05	1.04	0.72	1,17	23	42
9h30	2.90	2,49	1,05	1.04	0.72	1.18	23.5	44.5
10h00	2.87	2.49	1.04	1.03	0.71	1.19	23.5	43
10h30	2.84	2.48	1.03	1.03	0.71	1.20	23	43
11h00	2.83	2.48	1.03	1.03	0.71	1.18	23.5	43
11h30	2.81	2.45	1.03	1.03	0.71	1.19	23.5	43
12h00	2.81	2.45	1.03	1.03	0.70	1.18	23.5	43
12h30	2.79	2.44	1.02	1.02	0.70	1.19	23.5	41.5
13h00	2.78	2.44	1.03	1.01	0.70	1.17	23.5	43
13h30	2.77	2.44	1.02	1.02	0.70	1.16	23.5	41.5
14h00	2.77	2.43	1.03	1.02	0.70	1.13	23.5	43
14h30	2.75	2.43	1.02	1.02	0.70	1.14	23.5	42
15h00	2.74	2.42	1.01	1.01	0.70	1.13	23.5	43
15h30	2.74	2.42	1.01	1.01	0.70	1.13	23.5	43
16h00	2.74	2.43	1.02	1.01	0.70	1.12	23.5	43
16h30	2.74	2.43	1.01	1.01	0.70	1.12	23.5	41
17h00	2.73	2.42	1.02	1.01	0.70	1.11	23.5	42.5

22.2.05 : DRITTER TAG

12h00	2.68	2.41	1.01	1.00	0.70	1.08	23.5	42.5
17h00	2.66	2.39	1.01	1.00	0.69	1.04	23.5	42.5

23.2.05 : VIERTER TAG

17h00	2.64	2.39	1.01	1.00	0.69	1.04	23.5	42
-------	------	------	------	------	------	------	------	----

3.3.05 : FÜNFTER TAG (getrocknet 2.3.05 von 14h00-17h00, dann eingepackt ; am 3.3.05 getrocknet von 8h00 bis 15h00)

15h00	2.59	2.35	1.00	0.99	0.68	1.1	24	32
-------	------	------	------	------	------	-----	----	----

4.3.05 : SECHSTER TAG (ganze Nacht getrocknet)

9h00	2.58	2.36	1.00	0.99	0.68	1.1	23	38
-------------	------	------	------	------	------	-----	----	----

DARRTROCKNUNG (fast 3 Tage und Nächte im Ofen)

9h00	2.23	(2.25)	(0.96)	(0.96)	-	-	66	<10 (streifen)
-------------	------	--------	--------	--------	---	---	----	-------------------

Kommentare:

Fünfter und sechster Tag: die Luftfeuchtigkeit im Labor ist um ca 10% gesunken, da es einen Kurzschluss im System gab.

Mit dem Spalten des Objektes fielen Kristalle heraus. Das Objekt musste zum Fotografieren, wägen, messen etc gehandhabt werden, wodurch jeweils kleinste Stücke der Kristalle als Staub verloren gingen. Dadurch ist die Messung des Gewichts nicht 100% exakt.

Versuchsreihe auf G28: Dimensions- und Gewichtsveränderungen

Probe Nr	Länge			Breite Links			Breite Rechts			Höhe links			Höhe rechts			Gewicht		
	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%
G28/1	2.8			1.07			1.07			0.82			1.15			3.55		
G28/2	2.79	2.47	11.5	1.09	0.92	15.6	1.1	0.94	14.5	0.76	0.74	2.6	1.13	1.15*		3.76	2.33	38.0
G28/3	2.79	2.72	2.5	1.08	1.05	2.8	1.06	1.05	0.9	0.81	0.82	-1.2	1.04	1.04	0	3.64	3.64	0.0
G28/4	2.8	2.76	1.4	1.12	1.11	0.9	1.12	1.12	0.0	0.91	0.93	-2.2	1	1	0	3.82	3.85	-0.8
G28/5	2.88	2.54	11.8	1.12	1.02	8.9	1.13	1.05	7.1	0.89	0.85	4.5	0.99	0.91	8.1	3.98	3.17	20.4
G28/6	2.81	2.45	12.8	1.08	0.99	8.3	1.08	1.01	6.5	0.97	0.86	11.3	0.41	0.35	14.6	3.5	2.54	27.4
G28/7	2.85	2.44	14.4	1.1	0.95	13.6	1.09	0.98	10.1	0.9	0.83*		0.81	0.80*		3.56	2.59	27.2
G28/8	2.89	2.56	11.4	1.06	0.95	10.4	1.09	0.98	10.1	0.8	0.71	11.3	0.88	0.79	10.2	3.44	2.56	25.6
G28/9	2.87	2.52	12.2	1.04	0.93	10.6	1.07	0.96	10.3	0.79	0.76	3.8	0.92	0.83	9.8	3.53	2.58	26.9
G28/10	2.87	2.6	9.4	1.08	0.8	25.9	1.13	1.02	9.7	0.85	0.97	-14.1	0.83	0.76	8.4	3.59	2.74	23.7
G28/11	2.84	2.51	11.6	1.08	0.99	8.3	1.18	1.06	10.2	0.66	0.62	6.1	0.79	0.78	1.7	3.61	2.58	28.5
G28/12	2.84	2.48	12.7	1.22	1.07	12.3	1.25	1.12	10.4	0.67	0.57	14.9	0.79	0.7	11.4	3.47	2.5	28.0
G28/13	2.82			1.17			1.2			0.71			0.86			3.74		
G28/14	2.88			1.1			1.12			0.7			0.96			3.66		
G28/15	2.76			1.15			1.15			0.7			0.93			4.21		
G28/16	2.74			1.19			1.12			0.62			1			4.04		
G28/17	2.72			1.15			1.15			0.68			1.05			4.05		
G28/18	2.68	2.36	11.9	1.16	1	13.8	1.13	0.99	12.4	0.82	0.68	17.1	0.9	1.1	-22.2	3.6	2.58	28.3

*nicht genau messbar

Versuchsreihe auf G28: Beschrieb nach der Konservierung

	Spalten	Fragilität	Deformierung	Oberfläche	Farbe
G28/2	Netz an Spalten in alle Richtungen	Brüchig, in mehrere Fragmente zerbrochen, Kristalle und Sinter fallen ab	kaum	Sehr matt, spröde Erscheinung	Schwarz
G28/3	FI.1: Eine schräg verlaufende Spalte, nicht den Kristallen folgend, nicht verfüllt FI2: keine	Kompakt, manipulierbar	Vor allem FI.3; konkav verformt	Wachsige Erscheinung	Regelmässig schwarz
G28/4	Keine	Kompakt, manipulierbar	Vor allem FI3; konkav verformt (weniger stark als G28/3)	Inhomogen	Braune und schwarze Stellen, matt und glanz
G28/5	FI1: Eine grosse Spalte, 1mm weit, den Kristallen folgend, weitere feine Risse FI2: keine FI3: drei feine Risse	Kristalle und Sinter fallen ab	Kaum	„natürlich“, holzig	Homogen, schwarz, matt
G28/6	FI1: zwei grosse Risse, mehr als 1mm weit, den Kristallen folgend, weitere feine, einer ist vertikal FI2: zwei in Längsrichtung, gross FI3: gross, horizontal und vertikal	Kristalle und Sinter fallen ab,	Wenig, am meisten FI.3	Weisse Schlieren	Dunkelbraun, inhomogen, glänzend und matt
G28/7	FI1: den Kristallen folgende Spalten, durchgehend FI2: keine FI3: bestehender Spalt ist nun durchgehend und weiter	In vier Fragmenten, Kristalle und Sinter fallen ab	Kaum (schlecht messbar, da fragmentiert)	Homogen, seidenmatt	Braunschwarz gebändert
G28/8	FI1: ca 10 feine, waagrechte Risse, den Kristallen folgend, ca 5 Haarrisse senkrecht (je oben und unten) FI2: wenige feine netzartige Risse FI3: bestehender Riss jetzt gross, 3 extrem feine Risschen	Kristalle und Sinter fallen ab, sonst kompakt (vor allem der Sinter fällt weg)	Kaum	Schimmert, glänzende Stellen (vermutl. Harz ausgetreten)	Sattes, homogenes schwarz

G28/9	F11: ca 6 grosse, waagrechte Risse, ca 10 extrafeine Risschen in der Matrix F12: Netz aus kaum sichtbaren feinen Risschen F13: 5 waagrechte, diverser Grösse, 2 senkrechte, kurz	Kristalle und Sinter fallen ab, sonst stabil	Kaum	Matt, mit glänzenden Stellen (vermutl. Harz ausgetreten)	Schwarz
G28/10	F11: zwei grosse Spalten, mehrere kleine und kurze, den Kristallen folgend F12: ein feiner Riss, waagrecht F13: zwei grosse, 3 kleine, waagrecht	Kristalle und Sinter fallen ab	Kaum	Sehr matt	Grauschwarz
G28/11	F11: zwei grosse, den Kristallen folgend, vier feine, waagrechte, ein schräger, sieben senkrechte, unterschiedlich kurz	Kristalle und Sinter fallen ab, sonst stabil	Kaum	Sehr matt, Holzstruktur sichtbar	Braun und schwarz gebändert
G28/12	F11: Spalten bei Kristallen, kurze feine Spalten an der Unterseite (horizontal) F12: zwei feine, in Faserrichtung F13: drei horizontale feine an der Unterseite	Solid, Kristalle und Sinter fallen ab	Kaum	Sehr matt, Holzstruktur sichtbar, homogen	schwarz

Objekte: Dimensions- und Gewichtsveränderungen

Probe Nr	Länge			Breite Links			Breite Rechts			Höhe links			Höhe rechts			Gewicht		
	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%	vor	nach	%
436	4.8	4.72	1.67	0.85	0.83	2.4	0.8	0.79	1.25	0.84	0.82	2.4	0.87	0.85	2.3	3.43	3.26	4.96
445	2.95	2.93	0.7	1.03	1.03	0	1	1.01	-1	0.8	0.79	1.25	0.77	0.77	0	2.59	2.5	3.47
449	2.98	2.91	2.3	2.11	2.11	0	2.69	2.64	1.9	1.24	1.24	0	1.32	1.3	1.5	8.57	8.23	3.97

Objekte: Beschrieb nach der Konservierung

	Spalten	Fragilität	Deformierung	Oberfläche	Farbe
436	<p>Bestehende Spalten auf der Rückseite des Objekts haben sich leicht geweitet, es handelt sich aber immer noch um feinste Haarrisse. Sie sind jetzt besser sichtbar, nicht nur weil sie sich geweitet haben, sondern auch weil sie vorher durch den Wasserfilm besser kaschiert waren. Zum Teil sind die Spalten weiss verfüllt, es handelt sich um das PEG. F11 ist absolut glatt, weist keine Spalten auf, auf der gegenüberliegenden Seite hat sich ein bestehender Spalt geweitet.</p> <p>Die Innenseite des Ringes weist wenige Spalten auf, die sich nicht geweitet haben.</p> <p>Alle Spalten folgen der Schichtung des Materials, sie sind gewellt und immer sehr fein</p>	Kompakt, gut zu handhaben, bei normaler Handhabung nicht zerbrechlich	nein	Ästhetisch, glatt, seidenmatt, schöner Schimmer. Glatt zu berühren, leicht wachsig	Warmes schwarz auf den ersten Blick, von nah: sehr fein schwarz und braun gesprenkelt
445	<p>Das Material schein frei von Spalten und Rissen, jedoch ist in der Mitte des Stückes in Richtung schichtverlauf zu sehen, dass PEG austritt (Glänzender Strich). Es ist von blossen Auge kaum ein Spalt zu erkennen, es ist aber einer vorhanden. Obwohl extrem fein, ist dieser Spalt bedenklich, da er tief in das Material hineinzugreifen schient, vielleicht sogar durchgehend ist</p>	Abgesehen von der Spalte kompakt und gut zu handhaben. Bei einem Schlag könnte der Spalt aber zum Bruch des Ringes führen	nein	Schön glatt, homogen, seidenmatt, weniger schimmernd als 436	Tiefes Schwarz, nicht ganz homogen, dunkelbräunliche Schlieren

449	Seite mit dem Wulst mit Rundung: Bestehende Spalten haben sich leicht geweitet, alle anderen Seiten scheinen keine Spalten aufzuweisen	Sehr dicht und kompakt, gut zu handhaben, bei normaler Handhabung nicht zerbrechlich	nein	Die Wulstseite: ist sachte glänzend, darauf eine Art Kruste, halbdurchsichtig, olivbraun. Die beiden seitlichen Bruchstellen sehen aus wie Rohgagat, seidenmatt, glatt, grauschwarz und plastikartige Konsistenz. Die restlichen Seiten sind matt dumpf, scheinen graubraun überzogen. Alle Seiten weisen die schon beschriebenen Krusten auf	Schwarz, zuweilen grau überzogen
-----	---	--	------	---	----------------------------------

Geologisches Probenmaterial (Auszug Datenbank)

Nr.	Art der Probe	Bezeichnung	Geologische Bezeichn.	Inventarnr.	Fundort	Fundstelle
G1	Geologische Probe	Kännelkohle	Kännelkohle	MB 4578	England	
G2	Geologische Probe	Asphalt (Btiumen)	Trinidad-Asphalt	keine	Asphaltsee von Trinidad	
G3	Geologische Probe	Blätterkohle, Papierkohle	Dysodil	7763	Siebengebirge Deutschland	
G4	Geologische Probe	Steinkohle	Steinkohle	MB 4564	Saarbrücken	
G5	Geologische Probe	?	Ichthyolschiefer	keine	Meride, Tessin	
G6	Geologische Probe	Pechkohle (Braunkohle)	Pechkohle (Braunkohle)	4527	Belmont, Lutry, Westschweiz	
G7	Geologische Probe	Ölschiefer	Ölschiefer	keine	Autun, France, Massif Central	
G8	Geologische Probe	Braunkohle	Braunkohle	A2835	Blapbach, Emmental BE	
G9	Geologische Probe	Sapropelit	Sapropelit	keine	Gondiswil, Grube "Heinmann"?	
G10	Geologische Probe	Torf	Torf		Münchenbuchsee	
G11	Geologische Probe	Anthrazit	Anthrazit	5387	La Mure, Isère, France	
G12	Geologische Probe	Steinkohle	Steinkohle	4559	St. Etienne, France	
G13	Geologische Probe	Gagat	Gagat (Steinkohle)	4577	Reutligen, Württemberg, Posidonienschiefer	
G14	Geologische Probe	Kännelkohle	Kännelkohle	4574	nicht sicher: Autun oder Belgische Grenze	
G15	Geologische Probe	Steinkohle	Steinkohle (Glanz- und Mattkohle)	keine	England	
G16	Geologische Probe	Mooreiche	Mooreiche			
G17	Geologische Probe	Gagat			USA	
G18	Geologische Probe	Mooreiche				
G19	Geologische Probe	Steinkohle	Steinkohle, fast Anthrazit	WS30531	NEAT Lötschbergtunnel	3053m ab Nordportal
G20	Geologische Probe	Fossiles Holz	Fossiles Holz		Ardèche, lac Volcanique, "St. Bazile"	
G21	Geologische Probe	Anthrazit	Anthrazit	E37	Verbier	
G22	Geologische Probe	?	?	Kübler 199	Le Locle	
G23	Geologische Probe	Asphalte	Asphalte	25/10	Val de Travers	
G24	Geologische Probe	Bituminöser Schiefer	Bituminöser Schiefer		Monte San Giorgio, Lugano	
G25	Geologische Probe	Asphalte	Asphalte	59 1.50	Val de Travers	
G26	Geologische Probe	?	?	5	Le Locle	
G27	Geologische Probe	?	?	5	Le Locle	
G28	Geologische Probe	Lignit	Lignit		Birs	
G29	Geologische Probe	Xylit	Braunkohlexylit (Glyptostroboxylon rudolphii)	200400/25	Berzdorf	
G30	Geologische Probe	Xylit	Braunkohlexylit (Taxodioxylon germanicum)	20.04.00/32	Berzdorf	
G31	Geologische Probe	Xylit	Braunkohlexylit (Juniperoxylon pachyderma)	270803/7	Nochten	

Gesammelt von	Bemerkungen	Erhalten von	Institution	Datum	Verwendung für
		Herr Hoffman	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Experimentation
	Datiert April 1937, rezentes Alter	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
Coll. Simon	vom Tertiär	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Karbon	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Trias	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Tertiär Molasse	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Permisch	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Tertiär Molasse, Bericht von S. Leuenerberger 1992 "Die Blapbachkohle"	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
Eduard Gerber 1918	Quartär, Kopie des Archivzettels in Kurrentschrift	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
Eduard Gerber, 9.6.1945	Quartär	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Karbon	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Karbon	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Jura, Lias Epsilon	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
Gesch. Rothenbach	Permien	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
	Karbon	Herr Hoffmann	Naturhistorisches Museum Bern	25.1.05	Anschauungsmaterial
		Herr Schüpbach, Walkringen		17.1.05	Anschauungsmaterial
		Mathias Seifert	AD Graubünden	21.1.05	Anschauungsmaterial
		Max Hilfiker	Bolliger Furniere AG	14.1.05	Anschauungsmaterial
	Bergfrisch	Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
	8 Mio Jahre alt.	Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
		Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
	Öhningien	Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
Zweidler		Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
Föllmi's		Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
Zweidler		Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
Portman's	Öhningien	Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
Kübler	Öhningien, 'Metaleu'	Martin Burkhard	Geologisches Institut Uni NE	14.1.05	Anschauungsmaterial
Pierre Bigler, 26.9.91	Nass aufbewahrt	Beat Hug	Laténium		Festigungsversuche; zerschnitten in 18 Probestücke
		Ulrike Rothenhäusler (M. Dolezych)	Schweizerisches Landesmuseum	2.12.04	Anschauungsmaterial
		Ulrike Rothenhäusler (M. Dolezych)	Schweizerisches Landesmuseum	2.12.04	Anschauungsmaterial
		Ulrike Rothenhäusler (M. Dolezych)	Schweizerisches Landesmuseum	2.12.04	Anschauungsmaterial

Archäologisches Material (Auszug Datenbank)

Nr.	Art der Probe	Bezeichnung	Archäologische Bezeichn.	Grabung	Datierung
A1	Archäologische Probe	Fragment	Fragment	Vill-Tom	Hallstatt D3 (env. 500 v.Chr.)
A2	Archäologische Probe	Armreiffragment, Lignit	Armreiffragment, Lignit 2004/1.436	Martinsgasse 6+8,	
A3	Archäologische Probe	Armreiffragment, Lignit	Armreiffragment, Lignit 2004/1.445. FK 101725	Martinsgasse 6+8	
A4	Archäologische Probe	Gefässfragment	Gefässfragment, Lignit, 2004/1.449 FK 101743	Martinsgasse 6+8	
A5	Archäologische Probe	Perle, Lignit	Perle, Lignit	Petit-Guinard à Creuzier-le Vieux, Allier France	

Informationen	Erhalten von	Institution	Datum	Verwendung
Boden heute: neutral oder basisch, Zustand: trocken	Gianna Reginelli	Laténium	21.1.05	Untersuchung
3 Lignitarmreife, direkt ab Grabung feucht aufbewahrt (zunächst mit feuchter Erde, im HMB mit entionisiertem Wasser und 5% IMS) für Transport in PP Folie und feuchtem Japanpapier eingewickelt.	Barbara Ihrig	historisches Museum Basel	24.1.05	Anwendung
3 Lignitarmreife, direkt ab Grabung feucht aufbewahrt (zunächst mit feuchter Erde, im HMB mit entionisiertem Wasser und 5% IMS) für Transport in PP Folie und feuchtem Japanpapier eingewickelt.	Barbara Ihrig	Historisches Museum Basel	24.1.05	Anwendung
3 Lignitarmreife, direkt ab Grabung feucht aufbewahrt (zunächst mit feuchter Erde, im HMB mit entionisiertem Wasser und 5% IMS) für Transport in PP Folie und feuchtem Japanpapier eingewickelt.	Barbara Ihrig	Historisches Museum Basel	24.1.05	Anwendung
Labo Chauvière, "Graon", ausgetrocknet, in Schichten aufgespalten	Beat Hug	Laténium		Restaurierung

Kohlenpetrografische Analyse: Zusammenfassende Tabellen

Station	Basel, Matrinsgasse	Basel, Matrinsgasse		
Numéro de laboratoire	2004/1.445	2004/1.436		
Type de matériel	KÄNNELKOHLE	Sapropelit		
EXAMEN MACROSCOPIQUE	Taille			
	Couleur	Schwarz- schwarzbraun	Heterogen, gesprenkelt, bräunlich schwarz	
	Éclat	Abgetrocknet : seidematt- matt	Abgetrocknet : sehr matt	
	Cassure	Unregelmässig	Stufenartiger Bruch, unregelmässig	
	Dureté (échelle de Mohs)	-		
	Trace sur le papier	-		
	Structure	à l'oeil nu	Vgl. Photos	Schichtung erkennbar
		sous la binoculaire	Vermischte braune und schwarze Streifen	Sehr heterogen, weisse, rote und braune Sprengel, bzw. Einheiten. Schichtung sehr gut sichtbar
	Fissuration		In der Schichtung verlaufende, feine Risse, Innen und Aussen am Armreif	
	Homogénéité	Ja	Nein, fein heterogen	
Particularités		Weisser Punkt in der polierten Oberfläche, vielleicht ein Zoolith ? Gesprenkelter Aspekt		
EXAMEN MICROSCOPIQUE	Type de préparation	Polierter Anschliff	Polierter Anschliff	
	Structure	Mikroschichtung, sichtbar schon unter Weisslicht	Keine Gewebestruktur, sondern Mikroschichtung, gröbere Schichtung an einigen Stellen, Die Struktur ist sehr gut sichtbar im Weisslicht, in Fluoreszenz viel schlechter.	
	Fissuration	Sehr geringe Rissbildung, einige Risse am Rand	Ausgedehnt, in Schichtrichtung, eher kurze Risse mit unregelmässigen Kanten, senkrechte und treppenartige Risse mit glattem Rand	
	Pores	Scheinbar keine vorhanden, submikroskopisch	In der Masse : keine oder kaum. An der Oberfläche : durch das Herauslösen von Karbonaten entstandene Poren	
	Macéraux	Huminite/ Vitrinite	Vitrodetrinit	Vitrodetrinite, sehr selten
		Liptinite	Liptodetrinit, detritischer Resinit, als isolierte Körper, Bituminite Grundmasse, reich an Mikrinit (weisse Körner), hoher Anteil an Sporinit (Pollern und Sporen), Tellalginit (botryococcus)	Bituminite, an manchen Stellen sehr pur, macht die Grundmasse aus, ist Hauptbestandteil der org. Materie des Sediments. Tellalginit (Tasmanalgen), Amalginit (dünnwandige Algen), Liptodetrinit, Sporinit selten.
Inertinite		Fusinite, Semifusinite, Secrinite, Inertodetrinit	Semifusinit, Secretinit, Micrinit (kleinmassige Aggregate), Komprimiertes Fusinitgewebe, zerstückelt, Intertodetrinit	

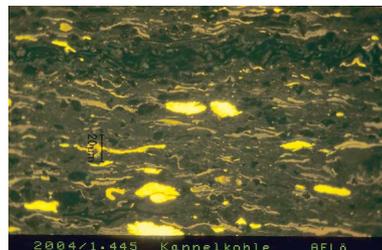
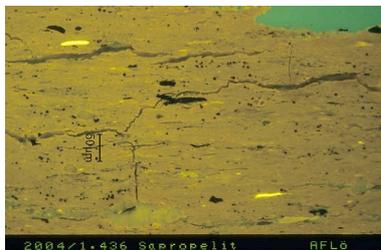
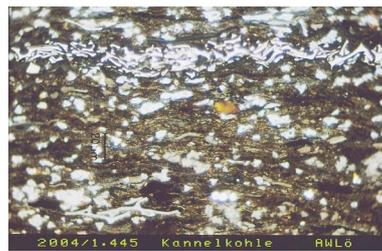
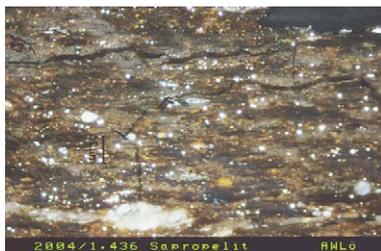
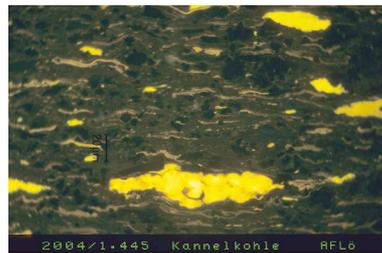
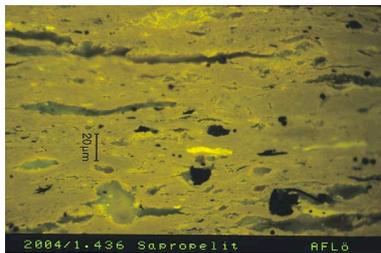
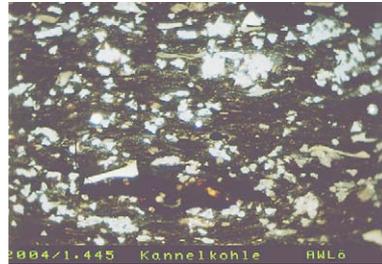
Minéraux		Pyrite, wenige framboide, wenige Einzelkristalle, viele Karbonatkristalle, in Bändern, Metalloxide ?	Grundmasse : Mkkristalline Karbonate, Karbonatlinse (von Mikroorganismen ?), Tonmineralien, fein verteilt, alles fein miteinander vermischt Pyrit : Mkkristallin, framboid, sehr häufig, regelmässig verteilt, wenig verwittert, möglicherweise einige Quarzkörner
Pouvoir réflecteur aléatoire (huminite/vitrinite)	Rr (%)	-	
	n	-	
	s	-	
Fluorescence		Reiche Fluoreszenz, Grundmasse dunkel (braungrün), Sporinit braun, div. Intensität, Tellalginit starke gelbe Fluoreszenz, Resinit gelb oder braun, Liptodetrinit sehr variable	Grundmasse : homogene Fl. Der organisch mineralischen Grundmasse, senfgelbe Farbe, sehr homogene Farbe und starke homogene Intensität. Algen : hell, grünlich, intensiv, Pollen : etwas gelber, braungelblich, mittlere Intensität
Degré d'homogénéisation /bituminisation		Sehr heterogen, sehr detritisch/ Bituminisierung schwierig zu sehen, da Bituminit Grundmasse	Weislicht : sehr heterogen, Fl. Sehr homogene Erscheinung/ Bituminisierung schwierig zu erkennen, da Bituminit Grundmasse, kein Exsudat
Particularités		Fein detritischer Charakter, organominerales Material, reich an organischer Materie, reich an detritischen und liptinitischen Substanzen	Zooclasten, kalkische Schalen, Zooresten, kapselförmig, nicht bestimmt, möglicherweise phosphatische Zooclaste → Fischreste ? Tasmanalgen, starke Spaltenbildung
Détermination		KÄNNELKOHLE, aber reich an Algen	SAPROPELIT

EXAMEN MACROSCOPIQUE	Station	Birs	
	Numéro de laboratoire	G28	
	Type de matériel	Geologische Probe	
	Taille		
	Couleur	Schwarz, Rostfarben auf der Oberfläche	
	Éclat	Halbglanz bis glanz	
	Cassure	Muschelig	
	Dureté (échelle de Mohs)	-	
	Trace sur le papier	-	
	Structure	à l'oeil nu	Streifen in einer Richtung
		sous la binoculaire	Faserig, holzkohlenähnlich
	Fissuration	Trocken : offene Spalten, viele kleine Einheiten	
	Homogénéité	Homogene Farbe, homogene Bruchflächen	
Particularités	Rostfarbene Oberfläche, matte alte Oberflächen im Gegensatz zu Glanz frischer Bruchflächen, brüchig		
EXAMEN MICROSCOPIQUE	Type de préparation	Poliertes Anschliff	
	Structure	Holzstruktur gut erhalten, deutlich erkennbar, Kompaktion= das gesamte Holzgewebe ist zusammengedrückt	
	Fissuration	Stark, ausgeprägt, verschiedene Arten von Rissen, 1-10µm, einige folgen der Gewebestruktur, andere durchqueren diese. Keine mineralischen Verfüllungen.	
	Pores	Submikroskopische Porosität	
	Macéraux	Huminite/ Vitrinite	Corpohuminit, Ulminit
		Liptinite	Exsudatinit, stark gelb fluoreszierend
		Inertinite	Keine

	Minéraux	Sehr viele Pyrite, kommen in 1mm grossen Banden vor, Kristalle ca 1µm gross, Framboide 6-14µm	
	Pouvoir réflecteur aléatoire (huminite/vitrinite)	Rr (%)	-
		n	-
		s	-
	Fluorescence	Sehr schwach, dunkelbraun	
	Degré d'homogénéisation /bituminisation	Mittlere Homogenisierung, da Gewebestruktur noch sichtbar/ keine Bituminisierung	
	Particularités	Pseudomorphose partiell im Pyrit, Vorkommen von Öl (Exsudat)	
Détermination		KÄNNELKOHLE, aber reich an Algen	

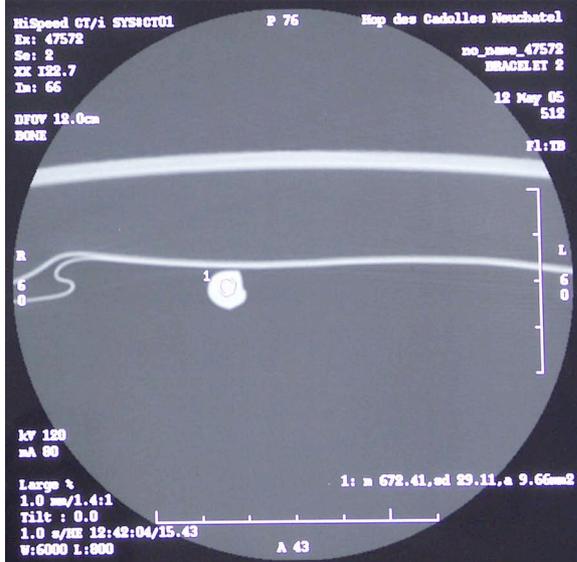
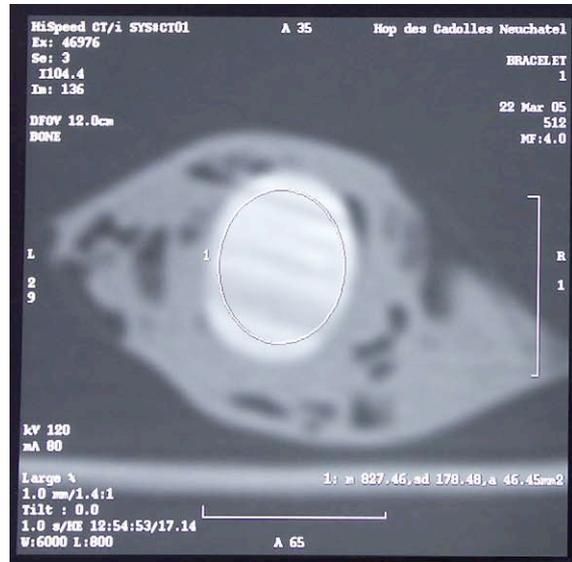
Kohlenpetrografische Analyse: Bilder

Links: Armreif 2004/1.436. Mitte: Armreif 2004/1.445. Rechts: Probematerial G28. AWLÖ= Auflicht, Weisslicht, Ölimmersion. AFLÖ= Auflicht, Fluoreszenz, Ölimmersion. Materialbeschriebe siehe Tabellen.

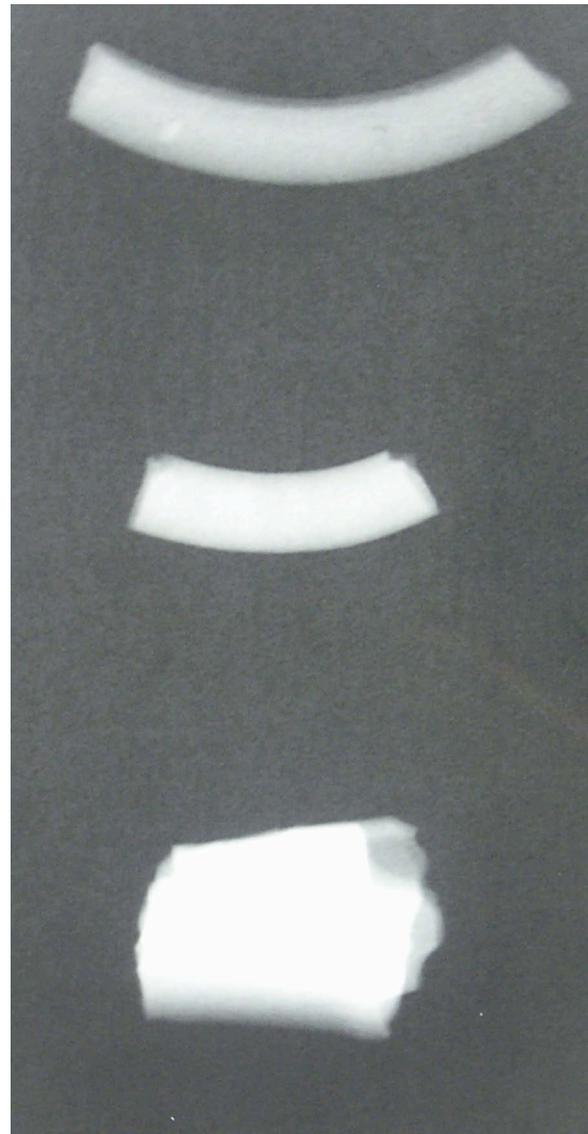
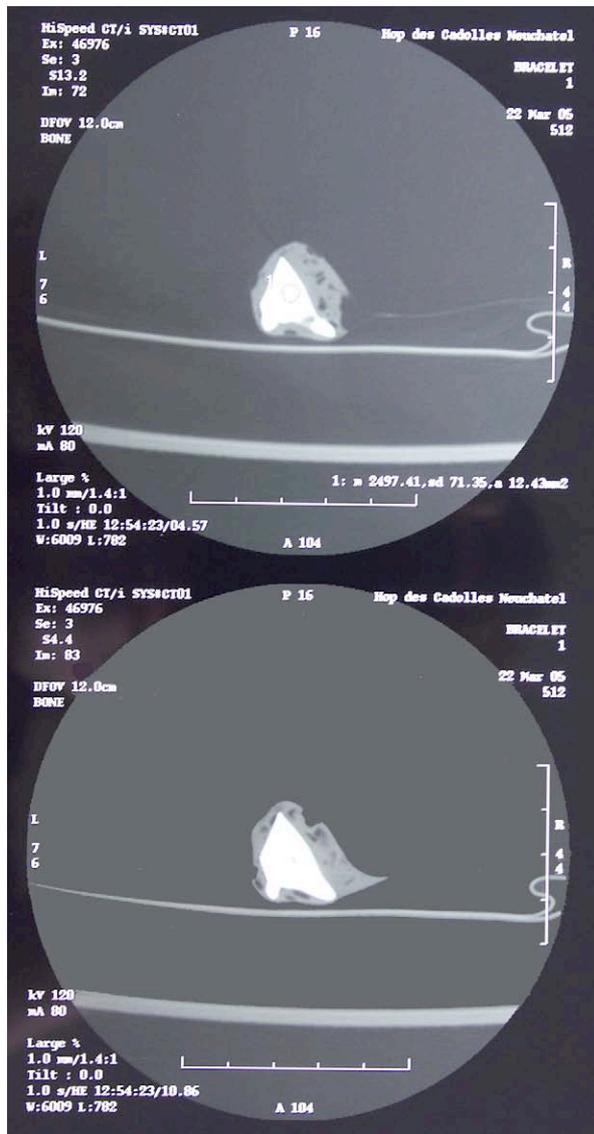


Computertomografie: Bilder

Links Armreiffragment 36, rechts Armreiffragment 45. Die Bilder oben zeigen den Zustand vor der Konservierung (feuchte Verpackung), die Bilder unten den Zustand nach der Konservierung. Die Kreise lokalisieren die Dichtemessungen, der Wert ist jeweils unten links angegeben.



Links Objekt 49 vor der Konservierung. Oberes Bild mit Dichtemessung, unteres Bild mit sichtbaren Spalten. Bild rechts zeigt alle drei Objekte, die durch die unterschiedliche Dichte der Materialien verschiedene Helligkeitswerte zeigen.



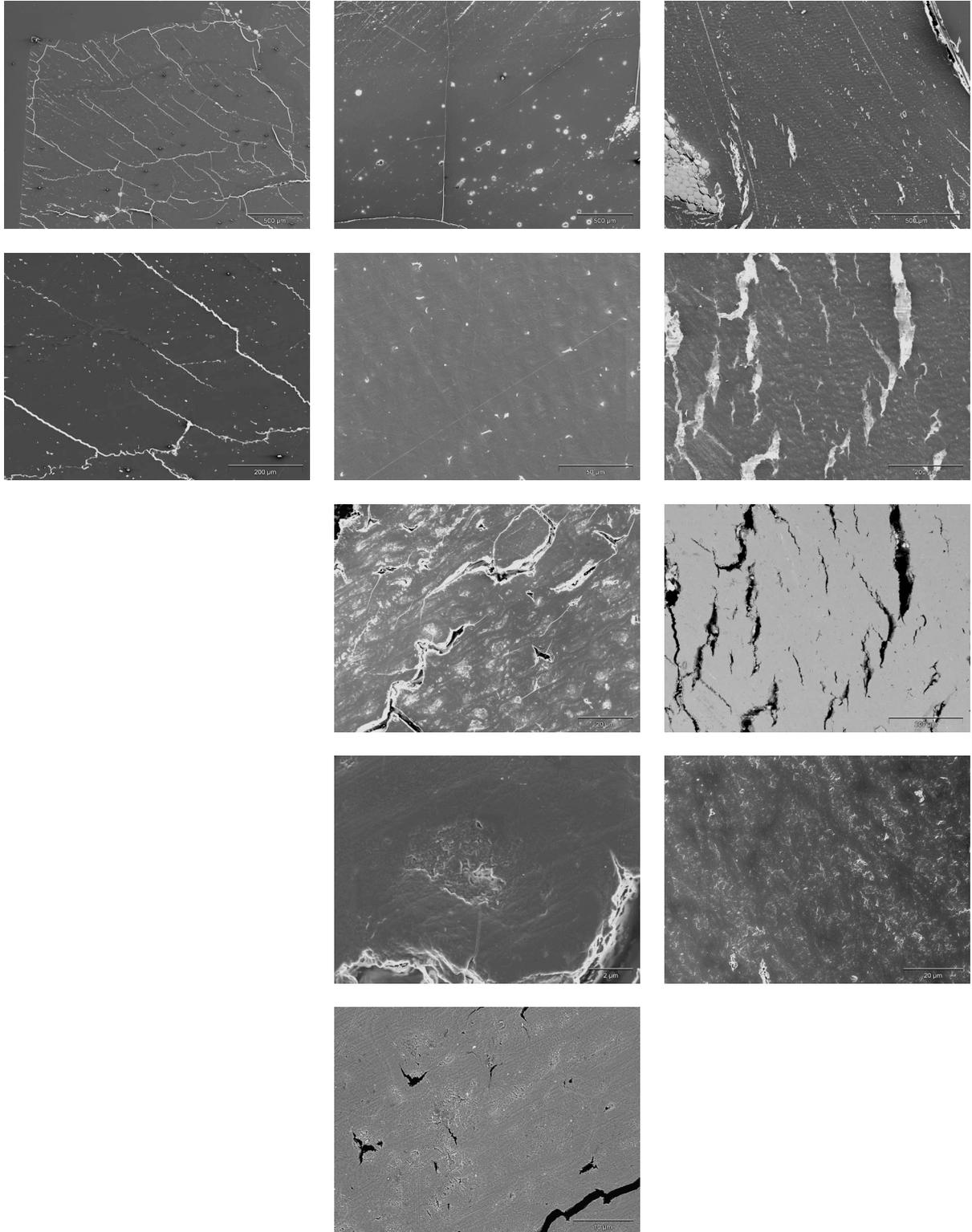
Computertomografie: Hounsfield Dichte vor und nach der Konservierung der Objekte

	Vorher	Nachher	Ab-/Zunahme
445	903.39	879.97	-23.42
	865.62	864.99	-0.63
	827.46	804.49	-22.97
	836.42	882.75	46.33
436	611.53	678.67	67.14
	599.35	671.58	72.23
	602.88	672.41	69.53
	598.36	652.15	53.79

Elektronenmikroskop: Bilder

Die Proben wurden eingegossen und poliert, die Präparate anschliessend mit Kohlenstoff bedampft, um sie leitend zu machen.

Links: G28/2 Gefriertrocknung. Mitte: G28/3 PEG 4000. Rechts: G28/4 PEG 1000. Die Bilder mit den dunkel abgebildeten Spalten wurden im Backscattermodus aufgenommen.

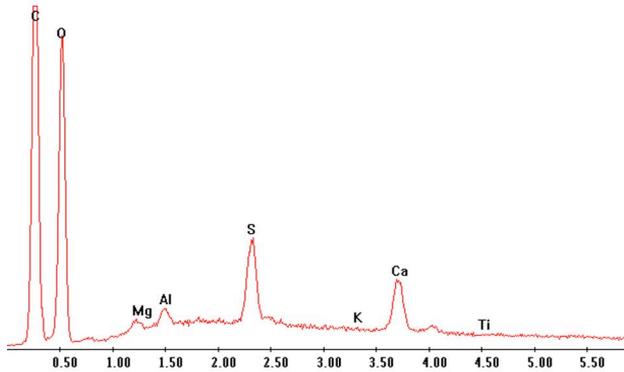


Energiedispersive Röntgenanalytik: Spektren

Oben: G28/2 Gefriertrocknung. Zeigt die elementare Zusammensetzung des Materials ohne eingeführtes Produkt. Mitte: G28/3 PEG 4000. Unten: G28/4 PEG 1000.

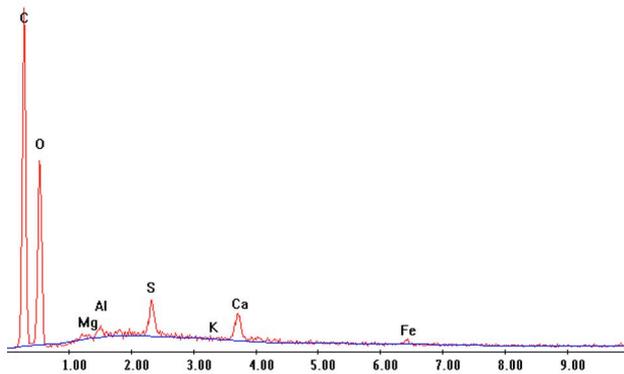
D:\Archive\Users\Sabine\G28_2\Nullspektrum.spc

Label A: Nullprobe Struktur 20KV Spot 5



D:\Archive\Users\Sabine\G28_3\Mitte.spc

Label A: Mitte 20KV Spot 5



D:\Archive\Users\Sabine\G28_4\Detail1 Struktur.spc

Label A: Detail1 Struktur 20KV Spot 4

