

Geologischer Überblick zur Kupferschieferlagerstätte

von Dipl.-Mineraloge Dr. rer. nat. Gerhard Knitzschke

1.	Vorbemerkung	13
2.	Geographie, Geologie und Tektonik	13
3.	Hydrogeologie und Gasführung	14
4.	Lagerstättenhorizont	18
4.1.	Lithologie und Paläogeographie.....	18
4.2.	Erzmineralisation	21
4.3.	Metallführung und Metallbilanz	26
4.4.	Metallogenese.....	29
4.5.	Kluftgebundene Mineralisationen - „Mansfelder Rücken“.....	31
4.6.	Sekundärminerale.....	35
4.7.	Fossilien	35

Es würde für den Bergmann ungemein wichtig seyn, wenn ihn der Geognost nach sicheren Prinzipien zur Aufsuchung der reichhaltigsten Schieferen leiten könnte, allein wir müssen bekennen, dass auch hierinnen unser Wissen noch sehr unvollständig ist.

Freiesleben, 1815

I. Geologischer Überblick zur Kupferschieferlagerstätte

1. Vorbemerkung

Der Kupferschiefer an der Basis des mitteleuropäischen marinen Oberperm ist als horizontbeständiges Sediment auf einer Fläche von mehr als 600.000 km² bekannt. Aber nur an einigen Stellen ist es zu bauwürdigen Metallkonzentrationen gekommen, so daß man von wirtschaftlich verwertbaren Lagerstätten sprechen kann. Es handelt sich um folgende Lagerstättenareale:

- Richelsdorfer Gebirge (Mulden von Solz-Sontra und Ronshausen-Höhnebach),
- Südöstliches Harzvorland (Gebiet von Mansfeld-Eisleben-Sangerhausen),
- Struktur Mulkwitz bei Spremberg,
- Innersudetische Mulde (Gebiet von Boleslawiec) und
- Subsudetische Monokline (Gebiet von Lubin).

Im Gesamtverbreitungsgebiet des Kupferschiefers in Deutschland sind nennenswerte Buntmetallanreicherungen nur in einem bis zu 150 km breiten Saum am Südrand des Zechsteinbeckens vorhanden. Am Nordrand des Beckens wurden an der Zechsteinbasis bisher nur verschieden intensiv rotgefärbte Gesteine mit fehlender bis spurenhafter Kupfermineralisation nachgewiesen. In zentralen Beckenteilen, in Topbereichen der Grundgebirgsschwellen und unmittelbar am Beckenrand ist der Kupferschiefer buntmetallarm.

Nachstehende Ausführungen beziehen sich auf das Lagerstättenareal Mansfeld - Eisleben - Sangerhausen, in welchem viele Jahrhunderte lang Kupferschiefer abgebaut wurde.

2. Geographie, Geologie und Tektonik

Die Kupferschieferlagerstätte wird morphologisch durch die Ausläufer des Harzes, durch die Halle-Hettstedter Gebirgsbrücke, durch den Hornburger Sattel, vom Kyffhäusergebirge sowie durch die Höhenzüge der Schmücke und der Hohen Schrecke begrenzt (Abbildung 1). Die Höhenlage der Geländeoberfläche im Lagerstättengebiet schwankt zwischen 120 m und 300 m über NN.

Der am Harzrand, am Hornburger Sattel, an der Halle-Hettstedter Gebirgsbrücke und am Kyffhäuser zu Tage ausstreichende Kupferschiefer fällt mit 3° bis 8° nach Süden bzw. Südosten ein und wird dann von mehrere 100 m mächtigen Karbonat-, Sulfat- und Chloridgesteinen des Zechsteins, Sand-, Ton- und Kalksteinen der Trias sowie Sanden und Schottern des Tertiärs und Quartärs überlagert.

Die gesamte Schichtenfolge über dem Kupferschiefer kann Mächtigkeiten bis zu 1.000 m erreichen. Die stark variierende Mächtigkeit der Tafelsedimente des Zechsteins wird in erster Linie durch die variable Mächtigkeit des Steinsalzes hervorgerufen. Zum Teil sind dafür primäre fazielle Differenzierungen verantwortlich, und teilweise ist dies das Ergebnis von Subrosionsvorgängen. Der den Erzhorizont begrenzende Teilbereich des Perms ist in der Tabelle 1 detailliert aufgeführt.

Die Lagerungsverhältnisse der Gesteine im Lagerstättenareal sind durch eine Unzahl von Bruchstörungen, die vorzugsweise NW-SO und teilweise NO-SW verlaufen und das Gebiet intensiv zer-

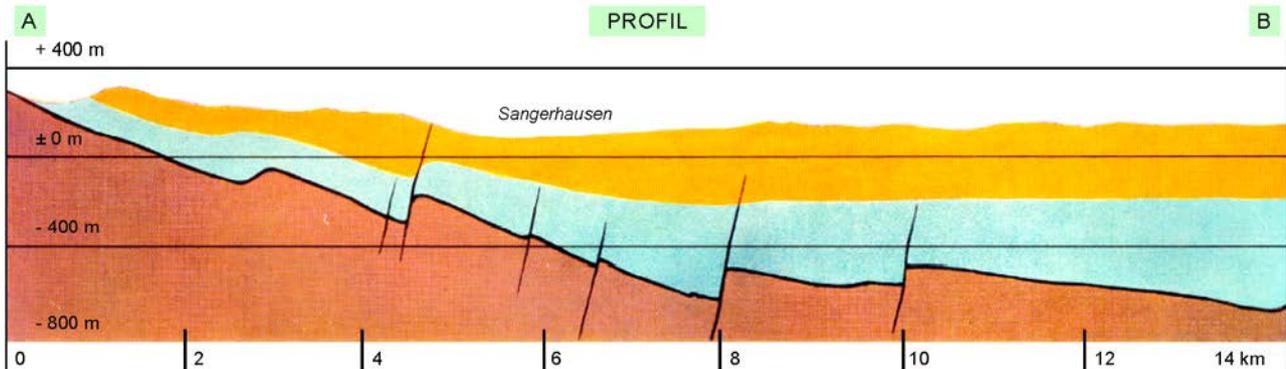
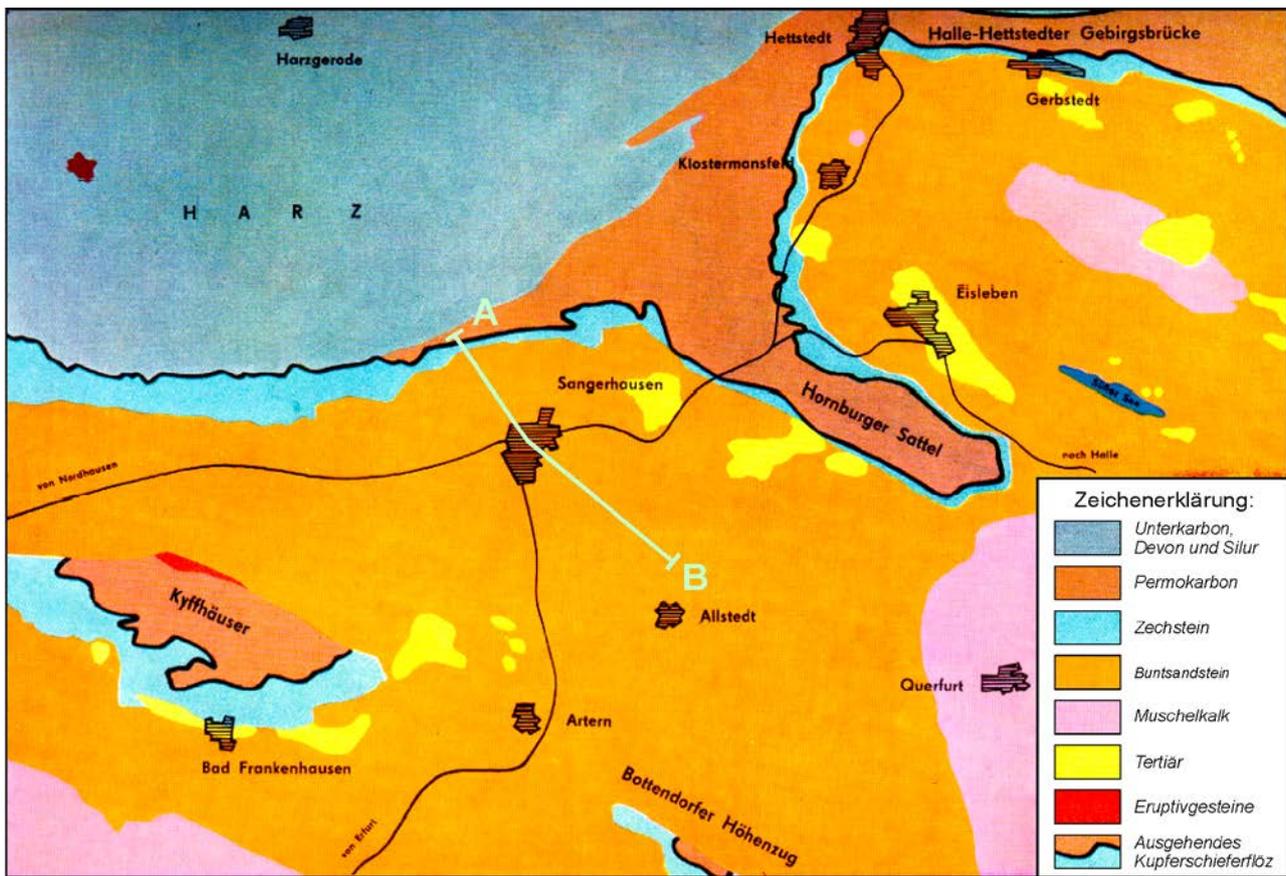


Abbildung 1: Geologische Übersicht SE - Harzvorland

stückeln, gekennzeichnet. Die Sprunghöhen variieren von wenigen Zentimetern bis über 1.000 m. Insgesamt handelt es sich um mehrere, in ihrer Größenordnung unterschiedliche, ungefähr abstandsgleiche Leisten-schollen, deren einzelne Bausteine gekippt und tordiert sind (Abbildung 2). Die markantesten, den Bergbau zum Teil stark beeinträchtigenden Bruchstörungen sind die Zimmermannschächter, Freieslebensschächter und Martinsschächter in der Mansfelder Mulde sowie die Butterberg und Nienstedter im Sangerhäuser Revier.

3. Hydrogeologie und Gasführung

Innerhalb des Kupferschieferbergbaus sind bezüglich der hydrogeologischen Verhältnisse gravierende Unterschiede festzustellen. Der Bereich hydrogeologisch gefährdeter Grubenfelder liegt generell zwischen

dem Ausgehenden des Kupferschiefers an der Tagesoberfläche und dem subterranean Ausstrich des Staßfurtsteinsalzes, während Baufelder unter mächtigerem Steinsalz bzw. weitab von dessen Verbreitungsgrenze als ungefährdet angesehen werden.

Perm	Schichtenfolge	Mächtigkeit (m)
Zechstein 1	Oberer Werraanhydrit	20,0 bis 30,0
	Werrasteinsalz bzw. Salzäquivalent	0 bis 12,0
	Unterer Werraanhydrit	0,3 bis 1,2
	Zechsteinkalk	30,0 bis 35,0
	Kupferschiefer	2,5 bis 6,5
	Sandstein bzw. Zechsteinkonglomerat	0,3 bis 0,4
		0 bis 16,0
Oberrotliegendes	Konglomerat, Sandstein Schiefertone	1,0 bis 4,0
		bis 100 mächtig

Tabelle 1: Der den Erzhorizont begrenzende Teilbereich des Perms

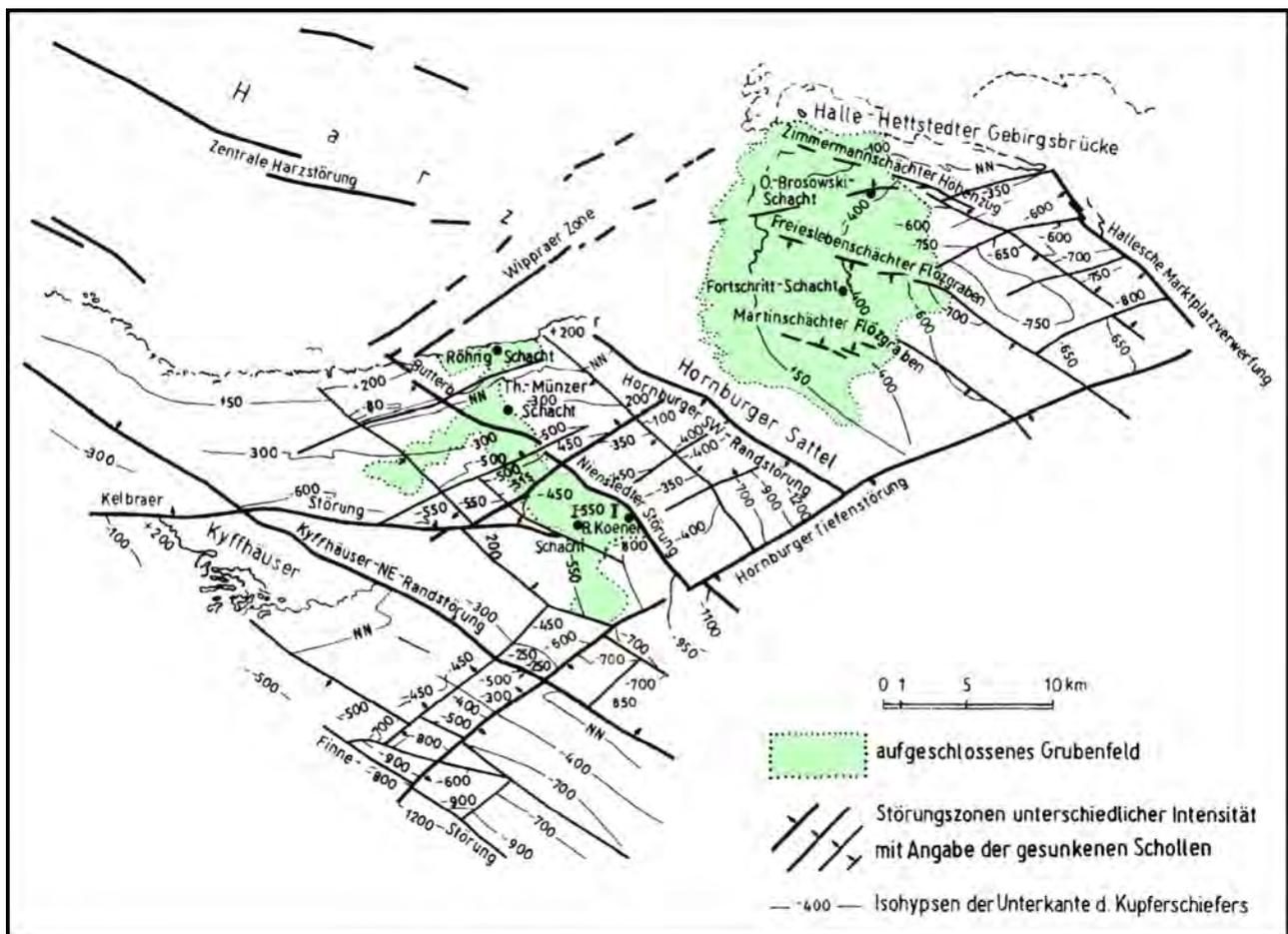


Abbildung 2: Subsalinare Schollengliederung zwischen Hallescher Marktplatzverwerfung und Finnestörung

Innerhalb des gefährdeten Areal sind die extrem verkarstete Zone am Ausgehenden des Kupferschiefers und die Zonen des Steinsalzausstrichs (Na 2 und/oder Na 1) hervorzuheben. Verdeutlicht wird dies allein schon durch die Verteilung der Zuflußmenge, von der im Sangerhäuser Revier 1980 etwa 63 % am Ausgehenden als Süßwasser anfallen und etwa 24 % als konzentrierte Salzlösungen (über 150 g/t gelöste Stoffe) an die Steinsalzverbreitungsgrenzen gebunden sind. Nach 1985 veränderten sich diese Zahlen bei erheblich steigenden Zuflüssen auf etwa 20 % Süßwasser und 80 % Salzwasser. Zwischen beiden Bereichen liegt eine Übergangszone mit weitestgehend intaktem Zechsteingebirge, in dem tektonische Elemente bzw. die durch sie entstandene Klüftung des Gebirges die Wasserzirkulation bewirken und der Rest der Wässer anfällt.

Damit ist gleichzeitig gesagt, daß die Wasserbewegung im wesentlichen vom Ausgehenden her in Richtung des Fallens der Schichten erfolgt. Gleichzeitig sind am Ausgehenden, aber auch an den Steinsalzverbreitungsgrenzen Wasserbewegungen im Streichen der Schichten bzw. entlang der Verbreitungsgrenzen bekannt. Lokal und regional gesehen kommt also neben den lateralen und vertikalen Faziesgrenzen bezüglich der Verkarstung besonders der Tektonik Bedeutung zu.

Es zeigt sich, daß neben den markanten Erscheinungen der Verkarstung, wie Höhlen (Schlotten) und Solquellen, auch in Bohrlöchern nachgewiesene Wasserführung im Zechstein sich in tektonisch besonders beanspruchten Bereichen konzentriert. Die mit der Tagesoberfläche in Verbindung stehenden und für die Gruben gefährlichen Wässer aus Offenen Systemen weisen ein relativ weites Mineralisationsspektrum auf. Es reicht von CaSO₄-reichem Süßwasser bis zur gesättigten NaCl-Lauge. Daneben sind ungefährliche CaCl₂/MgCl₂-reiche Wässer bekannt, die Geschlossenen Systemen zugeordnet werden und vor allem an Kluftspeicher gebunden sind. Beide Typen unterscheiden sich nach dem bisherigen Kenntnisstand im wesentlichen durch die in der Tabelle 2 aufgeführten Komponenten.

	Offenes System	Geschlossenes System
Dichte [g/cm ³]	1,000 bis 1,202	>1,202
pH	6,9 bis 7,7	<5,7
MgCl ₂ [g/l]	0,1 bis 1,0	<10,0
NaCl [g/l]	0 bis 312,0	<200,0
KCl [g/l]	0 bis 0,1	>1,0
CaCl ₂ [g/l]	0 bis 1,0	>75,0
CaSO ₄ [g/l]	2,0 bis 4,8	0
Br [g/l]	0,001 bis 0,05	>1,0
Li [mg/l]	0,005 bis 0,53	150
Sr [mg/l]	4,0 bis 40	440
Alter	rezent	Tertiär
Tritium	vorhanden	nicht vorhanden
H ₂ S	vorhanden	nicht vorhanden
N ₂	nicht vorhanden	vorhanden
	Gefahr von Wasser-einbrüchen	keine Gefahr von Wasser-einbrüchen

Tabelle 2: Einstufung der Wässer nach ihrem Gefährdungsgrad

Große zusammenhängend abgebaute Flächen sind Voraussetzung für die Herstellung hydraulischer Verbindungen zwischen Wasserleitern im Hangenden und Grubenbau. Erfahrungsgemäß tritt dies bei einer abgebauten Fläche von etwa 100.000 m² ein. Da kaum Abbauabteilungen bestehen, die geringere Flächengrößen erreichen, ist grundsätzlich in hydrogeologisch gefährdeten Bereichen überall mit Wasserzuflüssen zu rechnen.

Sind Zuflüsse aufgetreten, besteht bezüglich ihrer Lage innerhalb der Abbauabteilungen und der Zuflußmenge in gewissen Grenzen die Möglichkeit, durch Abbau- und VerhauLinienführung auf sie Einfluß zu nehmen. Andererseits wirken diesbezügliche Fehler fast immer zuflußfördernd, besonders wenn sie in Bereichen erfolgen, die aus hydrogeologischer Sicht Schwächezonen darstellen.

Die im Kupferschieferbergbau auftretenden Gase können nach Art der Gaseinlagerung im Gebirge grundsätzlich in Vorkommen freier Gase (methan- und stickstoffreich) und Vorkommen mineralgebundener Gase (vorwiegend stickstoffreich) unterschieden werden.

Die freien Gase befinden sich frei beweglich hauptsächlich auf Kluftspeichern und untergeordnet im Speichervolumen poröser Gesteine oder sekundär in durch gebirgsmechanische Beanspruchung gebildeten Hohlräumen.

Das Auftreten hochgespannter Gase aus Klüften bzw. anderen Hohlräumen wird als „Bläser“ bezeichnet. Kennzeichnend für Bläser ist, daß sie plötzlich unter kräftiger Geräuschbildung bei der Bohrarbeit bzw. nach der Sprengarbeit festgestellt werden. Meist ist ihre Blasdauer kurz und beträgt nur einige Sekunden bis Minuten. Bläser sind bisher überwiegend bei Auffahrungen im Liegenden als Stickstoffbläser aufgetreten.

Die meisten im Kupferschieferbergbau festgestellten Ansammlungen von Gasen sind auf nahezu druckloses Auftreten von freien Gasen aus tektonischen Spalten und Klüften bzw. gebirgsmechanisch bedingten Spaltensystemen zurückzuführen. Diese als „Gasexhalation“ oder „Aushauchung“ bezeichnete Austrittsform unterscheidet sich von den Bläsern vor allem durch die in der Zeiteinheit freigesetzte Gasmenge. Sie ist u. a. auf den starken Drosseleffekt der sich aufgrund von Abbauwirkungen allmählich öffnenden Verbindungswege zurückzuführen.

Plötzliche Ausbrüche von Gas und Gestein - „Gasausbrüche“ - sind vorwiegend aus dem Liegenden des Kupferschiefers bekannt. Bei diesen Gasen handelt es sich, wie schon erwähnt, um mineralgebundene bzw. in Porenhohlräumen im Gesteinsverband eingelagerte Gase, die fast ausschließlich aus Stickstoff bestehen. Gasausbrüche sind bisher fast immer an einem etwa 20 m mächtigen Sandsteinhorizont des Oberkarbons (*Stefan*) gebunden gewesen. Wenige kleine Ausbrüche (<1 m³ Auswurfhohlraum) sind auch aus dem Bereich Flöz-Zechsteinkalk bekannt. Alle bisher bekannt gewordenen Ausbrüche erfolgten bei der Sprengarbeit.

Die Hauptmenge der in den Abwetterströmen festgestellten brennbaren Gase wird durch „Ausgasung“ freigesetzt. Diese Austrittsform unterscheidet sich von der Gasexhalation vor allem dadurch, daß der Gasaustritt großflächig auftritt und nicht konzentriert aus einem Bohrloch oder einer Kluft erfolgt. Die wichtigsten Gasarten sind Inertgase mit vorwiegend Stickstoffanteil, brennbare Gase mit vorwiegend Methananteil und Schwefelwasserstoff als toxisches, natürliches Gas. Die dargelegte Unterteilung der Gasaustritte nach ihrer

Intensität in Bläser, Exhalationen, Ausbrüche und Ausgasungen erweist sich speziell für die Einschätzung der Schlagwettergefahr als günstigste Gliederung.

4. Lagerstättenhorizont

4.1. Lithologie und Paläogeographie

Die Unterlage des Kupferschiefers wird von Konglomeraten, Sandsteinen und Schluffsteinen gebildet. Die sandige Fazies weist dabei eine Besonderheit auf. Auf engstem Raum kann die im allgemeinen zwischen 20 cm und 2 m variierende Mächtigkeit bis zu 15 m anwachsen. Früher wurden diese Sandbarren als „Dünen“ angesehen. Nach neueren sedimentpetrographischen Untersuchungen handelt es sich jedoch um Schelfsande.

Der Kupferschiefer ist ein feinkörniger, feinschichtiger, kohlige Bestandteile führender Tonmergel bis Mergelstein. Sein Gefüge wird durch die Verteilung der Karbonate, Tonminerale, klastischen Bestandteile und kohligem Substanz bestimmt. Schichtung und Bitumenführung des Kupferschiefers nehmen mit fortschreitender Sedimentation ab. Die Korngrößen der gesteinsbildenden Minerale (100 µm bis 200 µm) sowie der Karbonatanteil nehmen nach dem Hangenden hin zu.

Das Kupferschieferflöz im Lagerstättengebiet Sangerhausen-Mansfeld wird nach Farbe, Härte und mikroskopischem Gefügebefund in die Flözlagen (vom Liegenden zum Hangenden) Feine Lette, Grobe Lette, Kammschale, Schieferkopf und Schwarze Berge untergliedert.

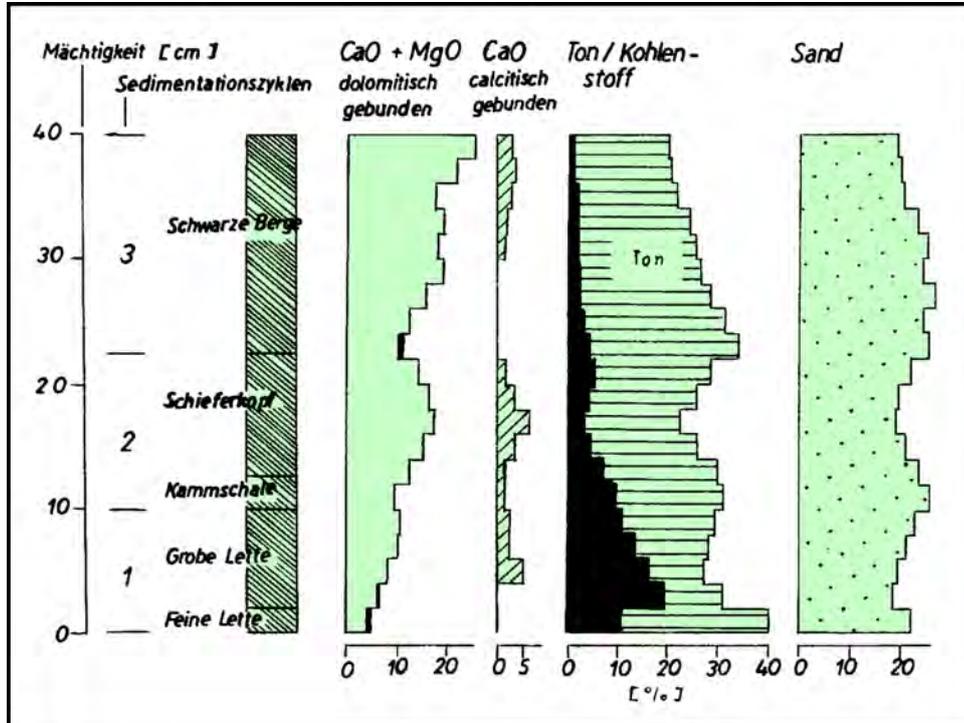


Abbildung 3: Mineralisationszyklen im Kupferschiefer

Chemische Untersuchungen und petrographische Typisierung ergaben für den Kupferschiefer des Lagerstättengebietes, daß im Normalprofil (vom Liegenden zum Hangenden) die petrographische Zusammen-

setzung von stark kohlig-bituminösen, karbonathaltigen Tonsteinen und Tonmergelsteinen in schwach bis mäßig kohlig-bituminöse Tonmergelsteine und Mergelsteine übergeht. Die Sedimentation des Kupferschiefers verlief in drei Sedimentationszyklen, die jeweils mit Dolomit- und Ton-Reichtum beginnen und mit Calcitmineralisation enden (Abbildung 3). Sie entsprechen epirogenen Senkungs- und Hebungs-Abläufen.

Der den Kupferschiefer überlagernde 3 m bis 6 m mächtige Zechsteinkalk kann im Lagerstättengebiet in fünf Zonen bzw. sieben Sedimentationszyklen unterteilt werden (Abbildung 4).

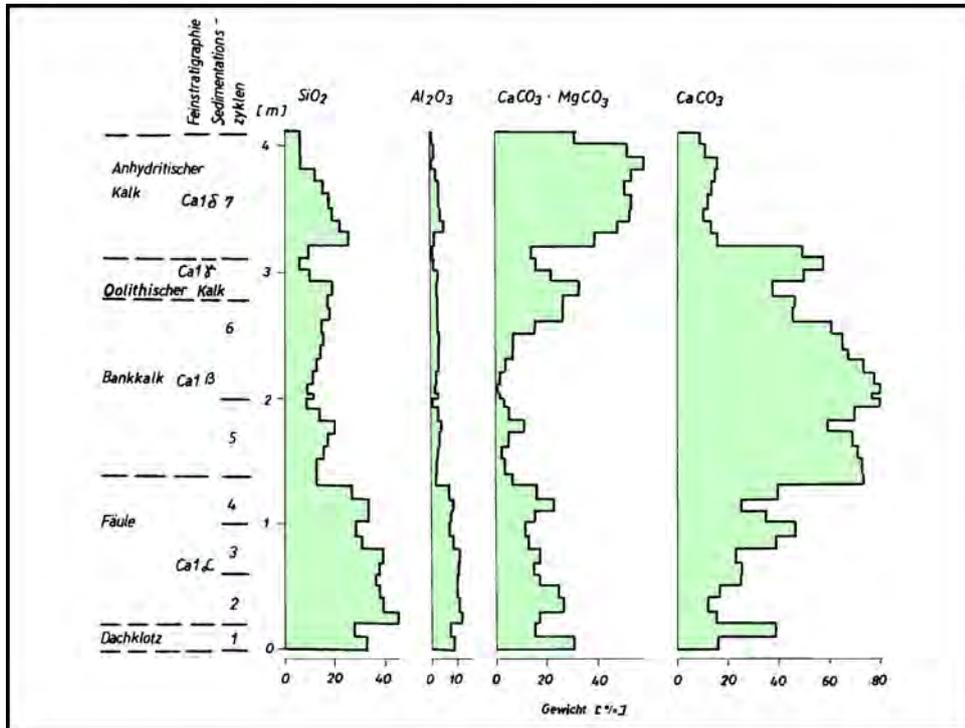


Abbildung 4: Mineralisationszyklen im Zechsteinkalk

Letztere widerspiegeln analog zum Kupferschiefer epirogene Hebungs- und Senkungsabläufe. Die Petrographie des Zechsteinkalks schwankt sowohl vertikal als auch lateral vom sandig-tonigen Kalkmergelstein bis zum schwach verunreinigten Kalkstein.

Für das Kupferschieferflöz läßt sich eine eindeutige lineare Korrelierbarkeit des Grundchemismus bzw. der Lithologie des Erzes mit der Druckfestigkeit nachweisen (Abbildung 5).

Es liegt eine positive lineare Korrelation zwischen Karbonatgehalt und Druckfestigkeit vor, während zwischen Tongehalt und Druckfestigkeit eine negative lineare Korrelation nachweisbar ist. Dagegen verhält sich die Sandkomponente indifferent. Entsprechend der festgestellten Gesetzmäßigkeit liegen ausgeprägte Druckfestigkeitsminima somit an den Zyklenbasen, d. h. im Übergangsbereich Feine Lette - Grobe Lette, in der Kammschale und in den Hangenden 4 cm des Schieferkopfes.

Die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Lithologie und Druckfestigkeitsverteilung im Kupferschieferflöz ist auch der Schlüssel zur Klärung des Problems der Bildung von Scheidungsflächen. Die Scheidungsbildung erleichterte nicht nur die Gewinnung mit Keilhau und Abbauhammer, sondern stellt auch ein wesentliches Erschwernis für die qualitätsgerechte Kupferschiefergewinnung dar.

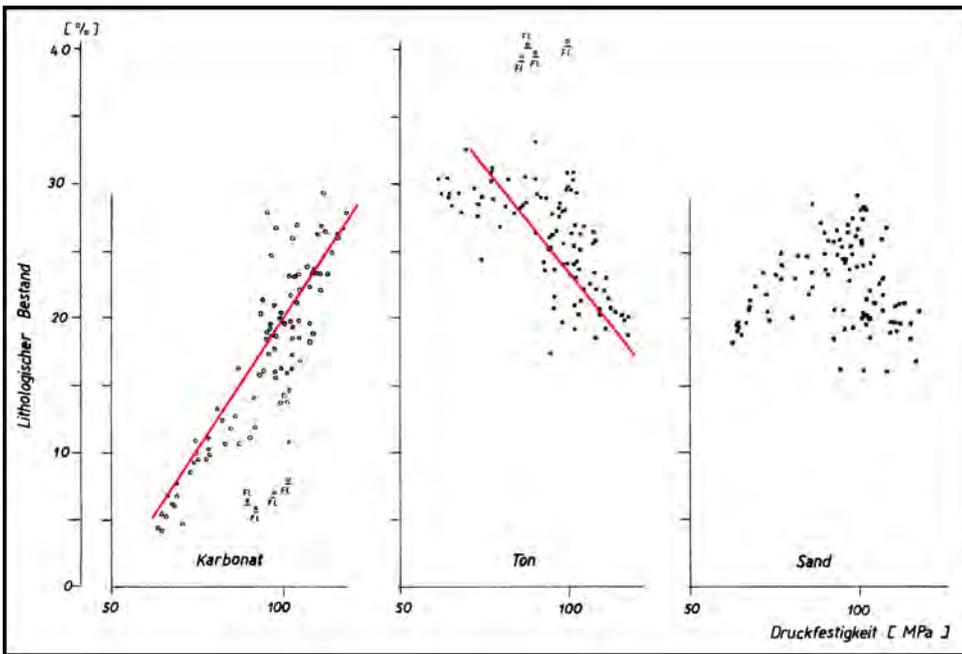


Abbildung 5: Druckfestigkeit und Lithologie des Kupferschiefers

Sie beeinflusst insbesondere Erzverluste und Erzverdünnung beim Abbau in Pfeilerbereichen, wenn Scheidungsflächen innerhalb der vererzten bauwürdigen Mächtigkeiten auftreten und das Anhaften der Liegend- bzw. Hangendpartie des Bauwürdigen am unbauwürdigen Liegenden bzw. Hangenden verursachen. Derartige Scheidungen oder Löseflächen treten insbesondere an der Oberkante der Feinen Lette, im Bereich der Kammschale und in den Hangenden 4 cm des Schieferkopfes auf. Ihre Lage deckt sich prinzipiell mit den ermittelten Druckfestigkeitsminima, die ihrerseits mit den petrographisch-geochemischen Zyklenbasen identisch sind (vgl. Abbildung 6).

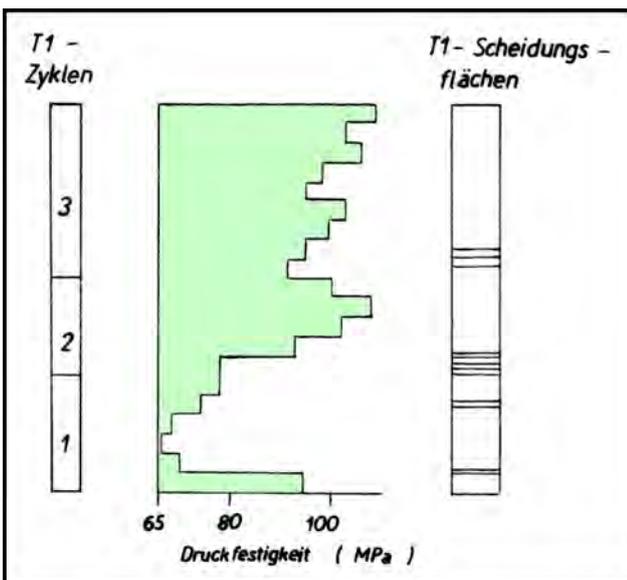


Abbildung 6: Druckfestigkeit und Scheidungsflächen

4.2. Erzmineralisation

Im Kupferschiefer sowie seinem unmittelbaren Liegenden und Hangenden sind folgende sulfidische Erzminerale in wechselnden Mengen enthalten:

Bornit (Buntkupferkies)	Cu_5FeS_4	Covellin (Kupferindig)	CuS
Chalkopyrit (Kupferkies)	CuFeS_2	Tennantit (Fahlerz)	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Neodigenit	Cu_9S_5	Idait	Cu_5FeS_6
Tetraedrit (Fahlerz)	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	Sphalerit (Zinkblende)	ZnS
Gediegenes Silber	Ag	Pyrit (Schwefelkies)	FeS_2
Galenit (Bleiglanz)	PbS	Markasit	FeS_2
Chalkosin (Kupferglanz)	Cu_2S		

Untergeordnet bzw. lediglich in Spuren treten noch auf:

Pyrrhotin (Magnetkies)	FeS	Linneit (Kobaltkies)	Co_3S_4
Arsenopyrit (Arsenkies)	FeAsS	Millerit (Haarkies)	NiS
Enargit	Cu_3AsS	Bravoit (Nickelpyrit)	$(\text{Ni,Fe,Co})\text{S}_2$
Stromeyerit	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Ag}_2\text{S}$		

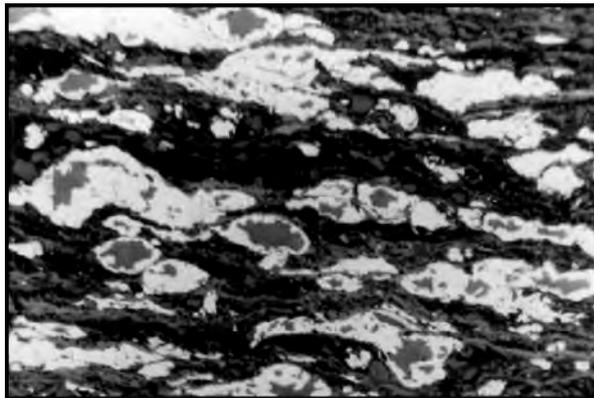


Abbildung 7: „Erzspeise“ mit Chalkopyrit als Erzmineral. Calcit wird durch Chalkopyrit verdrängt.

Grobe Lette, Vergr. 110 x

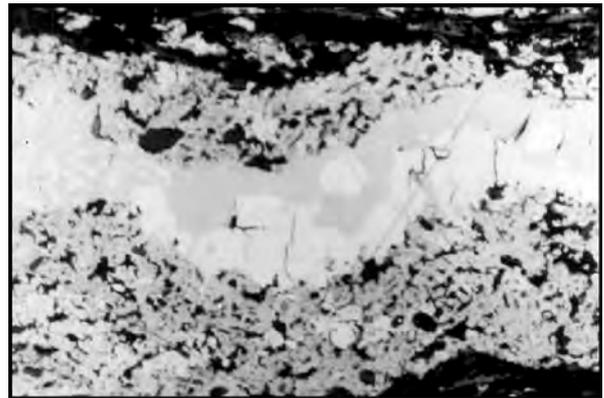


Abbildung 8: Chalkosin-Bornit-Lineal mit beidseitig jüngerer Abscheidung von Bornit und Chalkosin.

Grobe Lette, Vergr. 110 x

In Rote Fäule-Zonen der Lagerstätte enthält der Kupferschiefer noch die oxydischen Erzminerale Hämatit (Eisenglanz, Roteisenstein) Fe_2O_3 und Magnetit Fe_3O_4 .

Alle Erzminerale treten in Form von Körnchen, Flasern und Linsen auf, die in erzeichen Flözlagen die sogenannten „Erzspeise“ bilden und sich in das Schichtgefüge des Wirtsgesteins einfügen (Abbildung 7).

Ihre durchschnittlichen Korngrößen betragen 20 μm bis 70 μm , erreichen aber auch zuweilen 200 μm bis 300 μm . Neben den o. g. Erzformen verdienen noch Erzlineale und Erzbohnen bzw. -hicken besondere Beachtung (Abbildung 8; Abbildung 9).

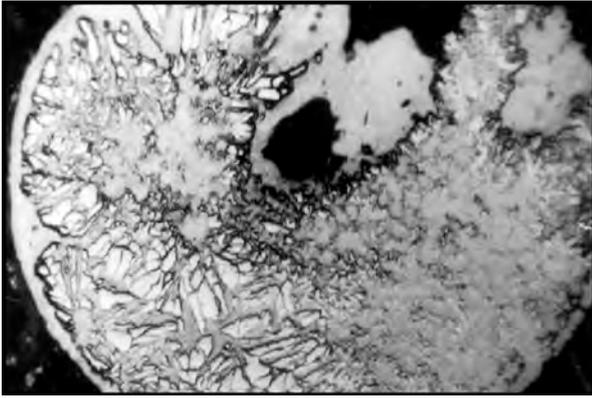


Abbildung 9: Kugelige Hieke aus Chalkosin und Pyrit. Der Pyrit wird durch den Chalkosin verdrängt.
Kammschale, Vergr. 250 x

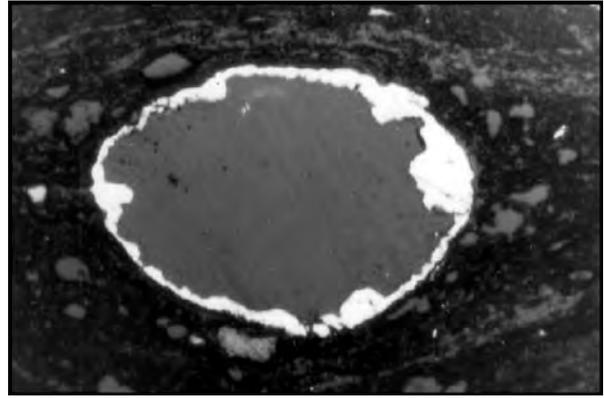


Abbildung 10: „Kugelcalcit“, der von Chalkopyrit korrodiert wird.
Grobe Lette, Vergr. 250x

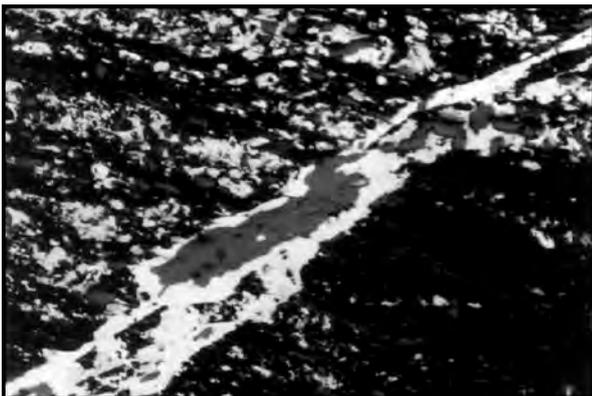


Abbildung 11: Schräg zur Schichtung des Schiefers verlaufendes Trum aus Chalkosin, Bornit und Calcit mit verwerfendem Charakter.
Grobe Lette, Vergr. 65 x

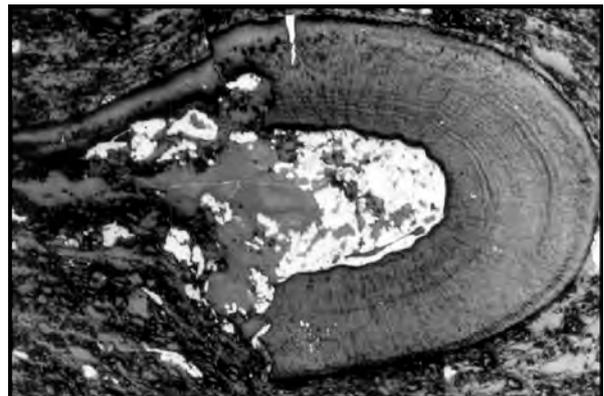


Abbildung 12: Erdpecheinschluß von Chalkopyrit flankiert.
Grobe Lette, Vergr. 65 x

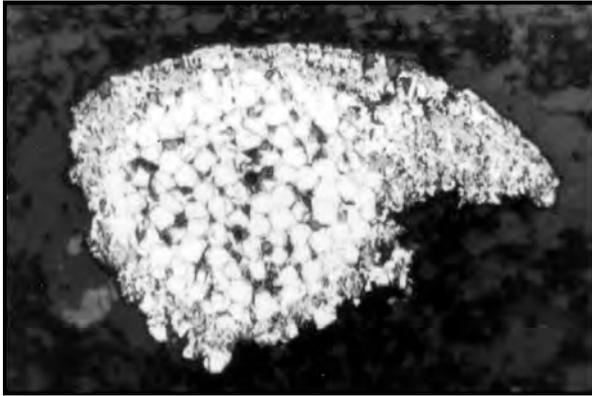


Abbildung 13: Feinkörnige Pyritkiee, deren Kern sich aus einer Vielzahl von Pyritkriställchen aufbaut.

Dachklotz, Vergr. 250 x

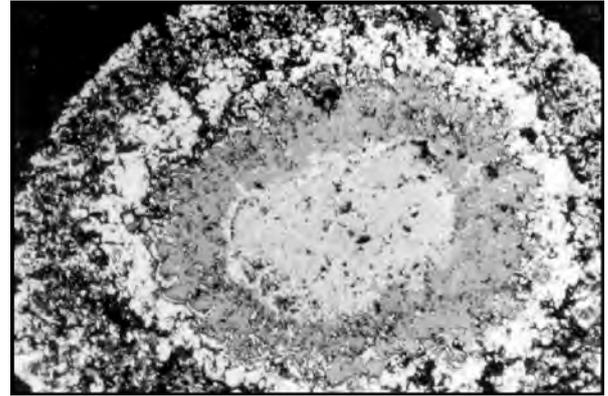


Abbildung 14: Hieke aus vier Generationen Pyrit und Sphalerit.

Dachklotz, Vergr. 65 x

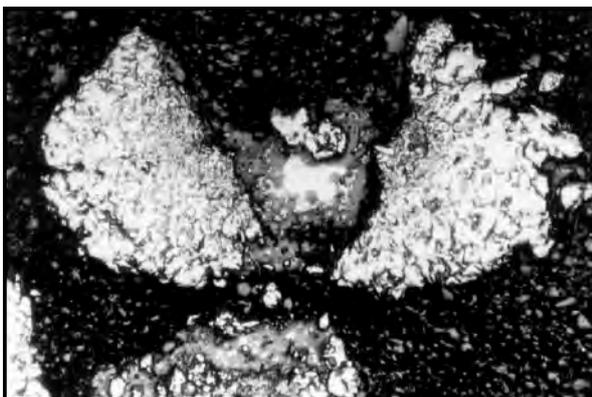


Abbildung 15: Während der Diagenese zerbrochene Pyritkiee. Im Druckbereich wurden sekundär Galenit und Sphalerit abgeschieden.

Dachklotz, Vergr. 110 x

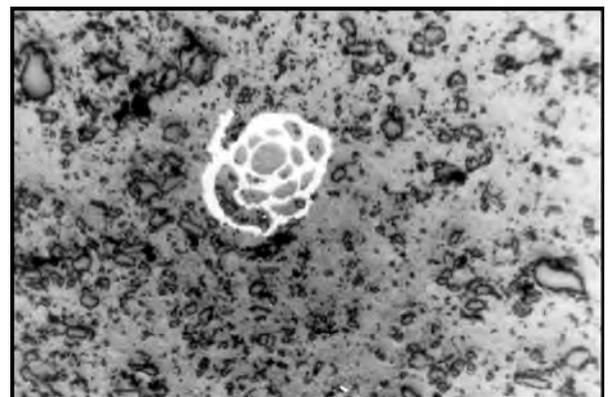


Abbildung 16: Mit Bornit vererzte Foraminifere.

Dachklotz, Vergr. 110 x

Neben Erzmineralverwachsungen lassen sich noch vielfache Verdrängungserscheinungen von Organodetritus und rekristallisierten Karbonaten durch Buntmetallsulfide nachweisen (Abbildung 10).

Der in den unteren Flözlagen vorliegende Pyrit tritt vorwiegend in Form von 1 µm bis 10 µm großen kugeligen Gebilden, den vererzten Bakterien, auf. Nach Love, der die Mikrofossilien aus den Kieskügelchen des Kupferschiefers isolierte, gehören diese vorwiegend der Gattung „Pyritosphaera barbaria“ an.

Sekundäre Erzmineralabscheidung auf Schrumpfungsrissen von Erdpechhicken und auf schräg oder senkrecht zur Schichtung des Schiefers verlaufenden Spalten haben für die Gesamterzföhrung des Flözes keinerlei Bedeutung (Abbildung 11; Abbildung 12).

Im unmittelbaren Hangenden des Kupferschiefers sind die Erzkieen in den vielfältigsten Formen ausgebildet und können Korngrößen von 500 µm bis 20.000 µm erreichen (Abbildung 13; Abbildung 14).

Häufig sind Zeichen der Beeinflussung durch tektonische Vorgänge im Mikrobereich zu erkennen (Abbildung 15).

Vereinzelt können im Dachklotz auch vererzte Fossilien (Foraminiferen) beobachtet werden (Abbildung 16).

Die im Kupferschiefer auftretenden Erzminerale lassen sich in zehn Erzmineralparagenesen zusammenfassen, wobei dem im Abschnitt 4.4. beschriebenen „zoning der Metalle“ ein noch diffizileres „zoning der Erzmineralparagenesen“ entspricht (Abbildung 17).

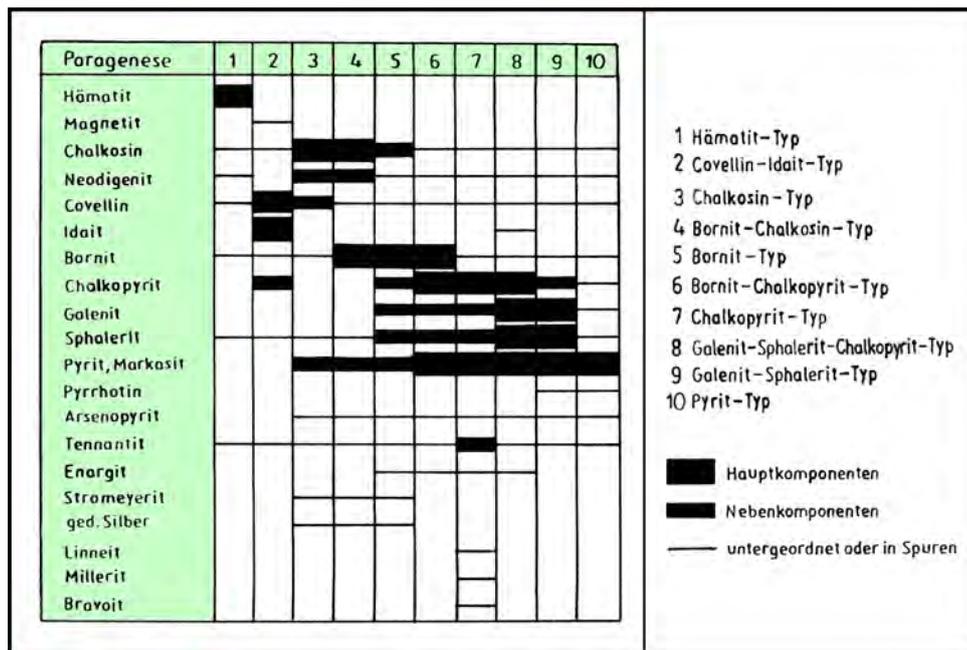


Abbildung 17: Erzminerale und Erzmineralparagenesen des Kupferschiefers

Der Hämatittyp (Paragenese 1) liegt auf und am Rand von Schwellen, die im Kupferschiefermeer wirksam waren. Am Rand der Paragenese 1, d. h. an den Schwellenrändern, liegen Säume mit den Paragenesen 2 bis 6 des Kupfervererzungstyps. Auf und am Rand von Grundgebirgsschwellen und an den Beckenrändern sind zum Teil die Paragenesen 5, 6, 7 und 10 vorhanden, von denen die Paragenese 7 am häufigsten ist. Die Paragenesen 8 und 9 sind typisch für relativ landnahe Tröge, während die Paragenese 10 in den becken tiefsten Teilen dominiert.

Entsprechend der Verteilung der Kupfererzminerale im Kupferschiefer sowie seinen unmittelbaren liegenden und hangenden Gesteinen und der damit verbundenen Bau- und Schmelzwürdigkeit wurden beim Abbau des Erzes die Erzsorten Kupferschiefererz, Hangenderz mit den Erzarten Fäule und Dachklotz (Gute Berge) sowie Sanderz unterschieden. Kupferschiefererz war immer das Haupterz, während das Hangenderz nur in bestimmten Lagerstättenarealen in die Gewinnung einbezogen wurde und die Basizität des Erzes spürbar verbesserte. Sanderz erlangte infolge zu geringer Verbreitung in der Lagerstätte, einer zu aufwendigen Abbautechnologie und der negativen Auswirkungen im Schmelzprozeß keine größere Bedeutung. Die wichtigsten geologischen Kenndaten des Erzes für den Abbau und die Verhüttung sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Geologischer Überblick zur Kupferschieferlagerstätte

	Sym- bol	Name	La- gen- Nr.	Beschreibung	Mäch- tigkeit (cm)	Dichte (g/cm ³)	Schlacken- zähigkeits- kennziffer*	Farbe des Gesteins- pulvers (nach <i>Lipsia</i>)	Druck- festig- keit (kg/ cm ²)	Spaltbar- keit Schiefe- rung	Begrenzung, Unterschei- dungsmerk- male des anstehenden Gesteins	Unter- scheidbar- keit im kleinstük- kigen Haufwerk
Zechsteinkalk (Ca ₁)	Ca _{1α2}	Fäule	9 8 7	Kalkmergelstein mit sichel- und fiederförmigen Anhydriteinlagerungen	140	2,72		grauweiß	1.466	schlecht		sehr gut
	Ca _{1α1} (siehe Blatt)	Dachklotz	6	Kalkstein mit Pyritbohnen und Anhydriten	20	2,75	0,74	weißgrau	1.525	schlecht	Farbwechsel	sehr gut
Kupfer- schiefer (T ₁)	T _{1ε}	Schwarze Berge	5	Mergel und Tonmergel, schwach bis mäßig kohlenstoffhaltig, im oberen Teil meist „graue Lage“	15	2,70	0,40	hellgrau	1.133	mäßig bis schlecht		gut
	T _{1δ}	Schiefer- kopf	4	Mergel mit Tonmergel, stark kohlenstoffhaltig	11	2,58	0,39	grau	836	gut bis mäßig	Farbunter- schied	mäßig
	T _{1γ}	Kamm- schale	3	Tonmergel bis Mergel, stark kohlenstoffhaltig	3	2,45	0,33	dunkel- grau	790	sehr gut	grobe Naht	nein
	T _{1β}	Grobe Lette	2	sandig-kalkiger Ton bis Tonmergel, stark kohlenstoffhaltig	6	2,39	0,33	grau- schwarz	664	sehr gut	feine Naht	nein
	T _{1α}	Feine Lette	1	verunreinigter bis sandiger, stark kohlenstoffhaltiger Ton	2	2,48	0,33	grau- schwarz	590	sehr gut	Hiekennaht	nein
Zechstein- konglomerat oder Weißlie- gendes	Z ₁ C oder Z ₁ S	Hornbank oder Tresse	1		2	2,60	0,19	grau		sehr schlecht	Farbwechsel, Korngröße	sehr gut

Tabelle 3: Wichtigste geologische Kenndaten des Erzes für den Abbau und die Verhüttung

* $(\text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$

4.3. Metallführung und Metallbilanz

Element	Streubereich (ppm)		Element	Streubereich (ppm)	
	von	bis		von	bis
Ag	1,6	1.800,0	Nb	13,0	75,0
As	2,5	2.000,0	Ni	42,0	1.200,0
Au	0,021	7,27	Pb	90,0	22.000,0
Be	2,0	10,0	Rb	120,0	267,0
Bi	2,0	3,0	Re	0,24	27,3
Ce	52,0	105,0	Sb	1,0	66,8
Cd	5,0	120,0	Sc	9,8	20,6
Co	21,0	1.750,0	Se	11,4	163,0
Cr	67,0	336,0	Sm	4,1	9,7
Cs	15,5	37,4	Sr	50,0	280,0
Cu	20,0	200.000,0	Ta	0,92	1,97
Eu	0,78	2,11	Tb	0,61	1,57
Fe	12.800,0	77.900,0	Te	1,0	6,0
Ga	10,0	44,0	Ti	3.400,0	5.800,0
Ge	8,0	14,5	Th	8,7	17,2
Hf	2,9	8,5	Tl	1,0	79,0
Hg	0,1	5,0	U	6,8	673,0
La	29,2	71,1	V	200,0	3.700,0
Li	57,0	108,0	Y	33,0	286,0
Lu	0,3	0,55	Yb	2,2	3,6
Mn	310,0	3.000,0	Zn	87,0	41.000,0
Mo	11,0	731,0	Zr	160,0	320,0

Tabelle 4: Streubereich der im Kupferschiefer quantitativ ermittelten Metalle

Neben den wirtschaftlich bedeutendsten Metallen Kupfer und Silber enthält der Kupferschiefer noch eine Vielzahl von Metallen. Dabei ist die Metallführung sehr absetzig, d. h. nur in bestimmten, zum Teil eng begrenzten Gebieten, erreicht die Kupferkonzentration Bau- und Schmelzwürdigkeit. Daraus ergibt sich, daß die Kenntnis der Metallführung, der Gesetzmäßigkeit der Metallverteilung, der Entstehung bau- und schmelzwürdiger Kupferschieferareale sowie der Herkunft der Metalle zu den unerläßlichen Voraussetzungen für einen erfolgreichen Kupferschieferbergbau in allen Zeitepochen zählen. Ein diesbezüglich erreichter Kenntniszuwachs in den letzten vier Jahrzehnten der Lagerstättennutzung - u. a. erfolgte eine Erweiterung der quantitativ im Kupferschiefer bestimmten Elemente auf 52 - ermöglicht die nachstehende Darlegung und Interpretation. In der Tabelle 4 sind die Streubereiche der im Kupferschiefer quantitativ bestimmten Metalle zusammengestellt.

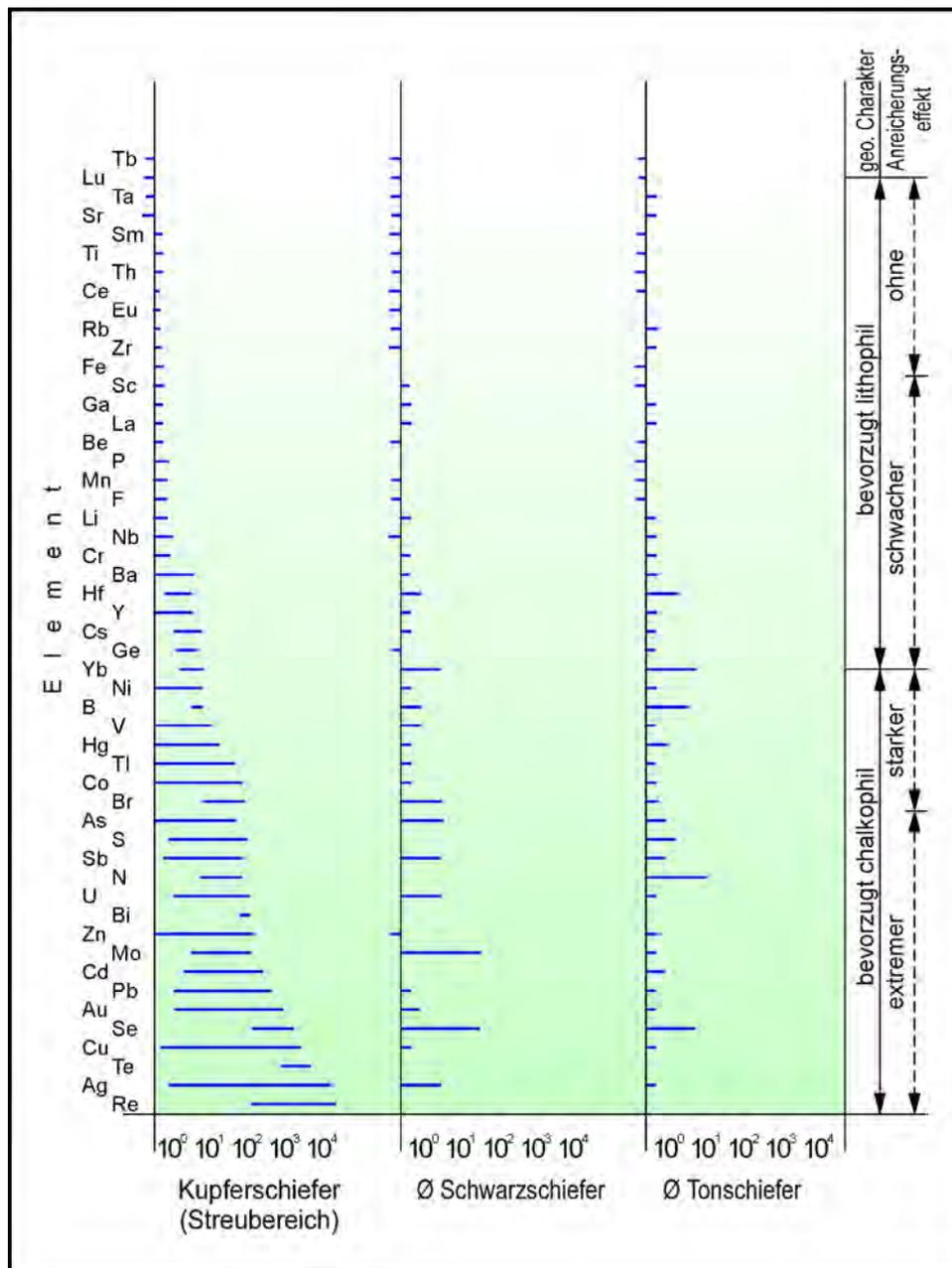


Tabelle 5: Anreicherungskoeffizienten, bezogen auf Clarke-Werte

Ein Vergleich der Metallgehalte im Kupferschiefer zur Clarke-Zahl (= durchschnittliche Elementverteilung in der Erdkruste) bzw. auch für den dem Kupferschiefer analogen Gesteinen Schwarzschiefer und Tonschiefer zeigt, daß im Kupferschiefer Metalle mit bevorzugt chalkophilem Charakter extrem bzw. stark angereichert sind und Metalle mit bevorzugt lithophilem Charakter nur schwache bzw. keine Anreicherung zeigen (Tabelle 5).

Neben Kupfer, Silber, Blei und Zink sind weitere Metalle entsprechend der Clarke-Zahl im Kupferschiefer auf das 100- bis 10.000fache angereichert, von denen z. B. Kobalt, Nickel, Vanadium, Molybdän, Gold, Selen, Rhenium, Kadmium, Tallium und Germanium im Hüttenprozeß zeitweilig gewonnen wurden. Die Durchschnittsgehalte dieser Metalle sowie von Tellur, Arsen, Antimon, Quecksilber und Wismut sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Flözlage	Metalle (ppm)													
	V	Mo	Ni	Co	Se	Re	Cd	Tl	Ge	Te	As	Sb	Hg	Bi
Schwarze Berge	141	73	61	28	8	21	8	6	8	3	74	10	3	3
Schieferkopf	315	119	78	46	20	21	20	7	8	3	87	11	3	2
Kammschale	751	253	111	86	34	22	29	15	8	3	146	12	3	2
Grobe Lette	814	308	140	144	48	21	34	13	9	5	327	20	3	2
Feine Lette	877	251	147	159	48	21	18	20	9	3	855	44	3	2
Fördererz	420	150	90	70	25	21	16	10	8	3	170	16	3	2

Tabelle 6: Quantitative Angaben zu Metallen in den einzelnen Flözlagen des Kupferschiefers und im Fördererz

t-Bereich	Metall	Mansfeld (t)	Sangerhausen (t)	Gesamt (t)
> 1.000.000	Kupfer	2.211.000	1.541.000	3.752.000
1.000.000 -100.000	Blei	534.000	219.000	753.000
	Zink	445.000	209.000	654.000
100.000 -10.000	Vanadium	37.000	28.000	65.000
	Arsen	15.000	12.000	27.000
	Molybdän	13.000	10.000	23.000
	Silber	12.200	8.100	20.300
	Nickel	8.000	6.000	14.000
	Kobalt	6.000	5.000	11.000
10.000 - 1.000	Selen	2.200	1.700	3.900
	Rhenium	1.900	1.400	3.300
	Antimon	1.400	1.100	2.500
	Kadmium	1.400	1.100	2.500
	Thallium	900	700	1.600
	Germanium	800	500	1.300
1.000 - 100	Tellur	300	200	500
	Quecksilber	200	100	300
	Wismut	200	100	300
< 100	Gold	2,8	2,9	4,8

Tabelle 7: Metallmengen in der Kupferschieferlagerstätte Mansfeld/Sangerhausen vor Beginn des Bergbaus

Für die o. g. Metalle wurden u. a. anhand von Fördermengen von 1200 bis 1990, Restvorräten nach Beendigung des Bergbaus im Jahre 1990, tausenden Analysen in Flözlagen- und Fördererzproben für eine Fläche von 191 km² (Vorratsabgrenzung entsprechend den Konditionen 8 kg/m² bis 10 kg/m² Kupfer) die Metallmengen im Kupferschieferflöz, wie sie vor Beginn des Bergbaus vorgelegen haben, ermittelt und in Tabelle 7 zusammengestellt.

Der Gesamtmetallinhalt in der Kupferschieferlagerstätte von 5.336.000 t verdeutlicht den fast einmaligen Charakter des Kupferschiefererzes im Rahmen der Erzlagerstätten der Welt.

4.4. Metallogenese

Als unerläßliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Kupferschieferbergbau mußte auch der Kenntnisstand zur Metallherkunft und -abscheidung ständig erweitert werden.

Über die Möglichkeiten der Metallherkunft und -abscheidung während und nach der Verfestigung des Kupferschiefers gab es bereits Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts erste Hypothesen und Theorien, die bis zum Ende des Kupferschieferbergbaus laufend ergänzt und präzisiert wurden.

Als Synthese der geologischen Bestandsaufnahme der Mineral- und Metallogenie sowie der Lithologie und Paläogeographie des Kupferschiefers im gesamten Südtteil der ehemaligen DDR und anhand von physikochemischen Modellversuchen von *Krauskopf* (1955, 1956) und *Garrels* (1960) entwickelten *Rentzsch*, *Knitzschke*, *Jung*, *Gerlach* u. a. (1960 bis 1980) fundierte Vorstellungen bezüglich der früh- bis spätdiagenetischen Erzbildung in der Lagerstätte. Sie betrachten die vorliegenden Metallfaziesgürtel als Ergebnis eines mehrphasigen Metallogeneseprozesses, wobei die wichtigsten Phasen sind:

- Syntsedimentär schwache Buntmetallsulfidvererzung im reduzierenden, sapropelitischen Fällungsmilieu während der Sedimentation des Kupferschiefers.
- Herausbildung eines paläohydrologischen Zirkulationssystems, das oxidierende metallhaltige Lösungen aus dem Liegenden des Kupferschiefers mobilisierte. Diese Lösungen stiegen in Schwellenbereichen des Kupferschieferbeckens auf. Bei ihrer Reaktion mit dem Kupferschiefersediment wurden die hier vorhandenen primären Metallsulfide durch Oxidation zerstört. Bei der seitlichen und vertikalen Ausbreitung der Lösungen wurden diese durch organogene und sulfidische Bestandteile des Kupferschiefers reduziert, und es bildete sich, von den Aufstiegszentren der oxidierenden Lösungen ausgehend, ein Redoxpotentialgefälle aus, wobei der Gehalt an Fällungsagentien (Sulfidschwefel, organischer Kohlenstoff) mit zunehmender Entfernung von Oxidationsgebieten zunimmt.
- Die so entstandenen spezifischen Fällungsbedingungen bewirkten entsprechend der unterschiedlichen Löslichkeit der Metallsulfide deren regional differenzierte zementative Fällung in Form der Metallisationsgürtel mit der bekannten horizontalen und vertikalen Abfolge Rote Fäule – Kupfergürtel – Blei-/Zinkgürtel. Mit der Bildung dieser Metallgürtel war auch die Anreicherung bestimmter weiterer Metalle verbunden (Tabelle 8).

Redoxpotential	positiv	→	schwach negativ			→	stärker negativ				
Metallfazies	Rote Fäule		Kupfergürtel				Blei	–	Zink	–	Gürtel
mögliches Präzipitat	Fe ₂ O ₃		Cu ₂ S	Cu ₃ FeS ₄	CuFeS ₂		PbS	–	ZnS	–	FeS ₂
Differenzierung des Zonings der Hauptmetalle	Fe ³⁺		Se	Cu	Cu		Pb	–	Zn	–	Fe ²⁺
			Au	Ag	Fe ²⁺		Tl		Cd		
			U		Ni		As				
				Co	Sb						
							V				
							Mo				

Tabelle 8: Wechselbeziehungen zwischen Metallfazies und Eh-Wert

Das Fällungsmaximum von Gold, Selen und Uran am unmittelbaren Rand der Oxidationsvertaubungen charakterisiert die Fixierung dieser Metalle bei neutralen Redoxpotentialen unter Sulfidschwefelmangel. Diese Elemente sind adsorptiv und metallorganisch an die hier stark inkohlten organischen Substanzen des Kupferschiefers gebunden.

Das horizontal anschließende Anreicherungsmaximum des Kupfers liegt generell im Bereich schwach negativer Redoxpotentiale. Es ist erzmineralfaziell und auch bezüglich der ausgewiesenen Fällungsmaxima der Neben- und Spurenmetalle differenziert. Unmittelbar flankierend im Übergangsbereich zur Oxidationszone liegt zunächst das Fällungsmaximum von Kupfer und Silber, wobei als Hauptmineral Chalkosin, d. h. eisenfreies Kupfersulfid, auftritt. Die Anreicherung des Silbers erfolgt hier durch isomorphe Substitution von Kupfer in den Kupfersulfiden oder durch Zementation von Silber auf Kupfersulfiden.

Weiter schließt sich eine Zone an, in der ein Fällungsmaximum von Kupfer-Eisen-II-Sulfiden vorliegt, die bereits in stärker reduzierendem Milieu gebildet wurden. Diese Zone entspricht auch dem Bereich maximaler Anreicherung von Nickel und Kobalt, die durch isomorphe Substitution von Ferroeisen in den Kupfer-Eisensulfiden angereichert wurden.

Die geologische Position der Kupferanreicherungszone ist der Übergangsbereich zwischen Schwellenlage mit Oxidationsfazies und Beckenbereich mit stark reduzierenden Bedingungen. In dieser Zone dominiert der substitutionelle Einbau von Spurenelementen in die Kupferminerale bei metallogenetischen Umlagerungsvorgängen.

In der Beckenfazies wurden unter stark reduzierenden Bedingungen in Gegenwart relativ hoher Sulfidschwefelkonzentrationen und hoher Anteile an organogenen, reduzierend wirkenden Substanzen Blei-Zink-Eisensulfide fixiert. In dieser Zone liegen die Anreicherungsmaxima von Thallium, Arsen, Antimon, Vanadium und Kadmium.

Auf die Anreicherung der Spurenmetalle nehmen hier unterschiedliche Wirkungsmechanismen Einfluß. Die Anreicherung von Spurenmetallen durch isomorphe Substitution von Hauptmetallen in Sulfidmineralen wurde bei Thallium (für Blei im Galenit) und Cadmium (für Zink im Sphalerit) nachgewiesen. Arsen und Antimon treten als selbständige Minerale (Tennantit/Tetraedrit) auf, während Vanadium und Molybdän bevorzugt adsorptive Bindungen mit organischen Bestandteilen wie Bitumina eingehen.

Die hier erläuterten Bindungsverhältnisse wurden bereits in mehreren Arbeiten durch den Nachweis korrelativer Beziehungen zwischen den entsprechenden Leit- und Spurenelementen untermauert.

Die letzte Präzisierung der bisherigen Hypothesen und Theorien der Lagerstättenbildung erfolgte schließlich durch *Rentzsch, Franke und Friedrich* (1997). Sie vertreten die Auffassung, daß die lokalen Kupferanreicherungen an der Zechsteinbasis, die Gegenstand des klassischen Kupferbergbaus von Mansfeld und Sangerhausen, Richelsdorf und einiger weiterer kleinerer Bergbaureviere waren, durch spätdiagenetische Metallmobilisation zu erklären sind. Diese entwickelten sich durch Zirkulation niedrigthermaler sauerstoffführender Brines an der Zechsteinbasis im Umfeld großer Sockelstörungen.

Für die aufsteigenden Brines diente der Kupferschiefer mit seiner bakteriellen H₂S-Produktion als Reduktionsbarriere und Stauhorizont.

Die Zonalität der Metallverteilung wird durch den Unterschuß der Sulfidionen während der Metallabscheidung in den Phasen der Diagenese und den daraus resultierenden unterschiedlichen Entfernungen des Transports der Metallionen durch die metallhaltigen Na-Ca-Cl-Brines verursacht.

4.5. Kluftgebundene Mineralisationen - „Mansfelder Rücken“

Die neuesten Ergebnisse zu kluftgebundenen Mineralisationen in der Kupferschieferlagerstätte beschreibt *Gerlach* (1992). Er charakterisiert die kluftgebundenen mesozoischen Mineralisationen in bestimmten Störungszonen, den sog. Mansfelder Rücken, als stockwerkstypische, herdferne, hydrothermale Bildungen mit intensiver topomineralischer Überprägung und ordnet sie in das Gesamtbild des hydrothermalen mesozoischen Mineralisationszyklus ein. Altersbestimmungen an kluftgebundenen Galeniten ergaben ein Pb/Pb-Modellalter zwischen 140 bis 190 Mio Jahren.

Im Süd- und Zentralteil der Mansfelder Mulde sind die kluftgebundenen Mineralisationen intensiver und differenzierter als im Sangerhäuser Revier. Die mineralisierten Gänge weisen im Kupferschiefer und Zechsteinkalk Mächtigkeiten von 1 cm bis 30 cm auf, wobei der Hauptteil der Erzminerale in der Nähe des Kupferschieferkontaktes zur Abscheidung kam.

Einige der im Lagerstättenbereich auftretenden Minerale im Erzhorizont und in den „Mansfelder Rücken“.

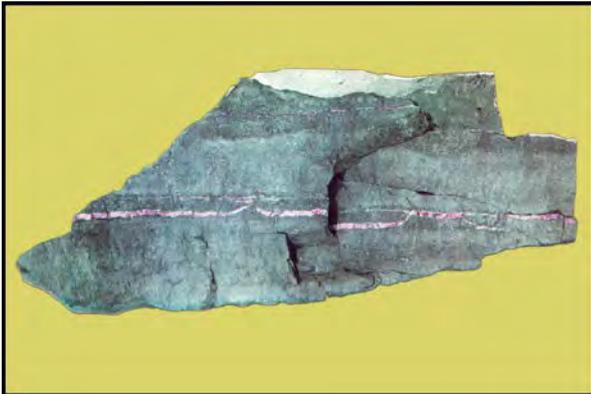


Abbildung 18: Erzstufe mit Buntkupferkies-Lineal



Abbildung 19: Gediegen Silber als „Silberblech“ mit den Schuppen eines Körperabschnittes von einem *Palaeoniscum freieslebeni*



Abbildung 20: Gediegen Silber als „Silberlöckchen“ auf Kupferschiefer



Abbildung 21: Buntkupferkies mit Kalkspat (= Rückenparagenese)



Abbildung 22: Kupferkies mit Kalkspat (= Rückenparagenese)

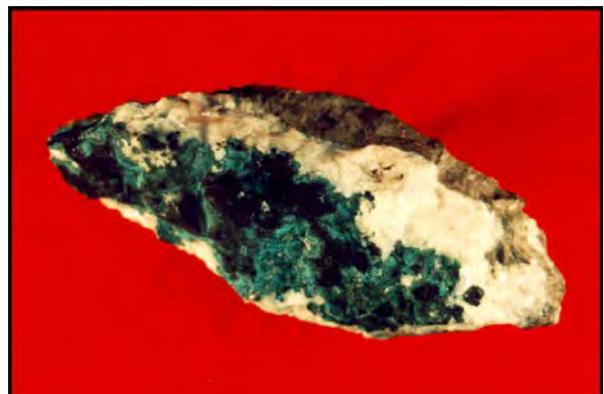


Abbildung 23: Kupferglanz, Kupferindig, Malachit und Azurit mit Kalkspat (= Rückenparagenese)



Abbildung 24: Rotnickelkies mit Schwerspat (= Rückenparagenese)



Abbildung 25: Nickelblüte auf Rotnickelkies mit Schwerspat (= Rückenparagenese)

Einige der im Lagerstättenbereich auftretenden Sekundärminerale in natürlichen und künstlichen Hohlräumen.



Abbildung 26: Gipskristalle (glasklar-weiß-durchscheinend)



Abbildung 27: Gipskristalle (hellbraun)



Abbildung 28: Gipskristalle (grün)



Abbildung 29: Calcitsinter „Vogelnest“

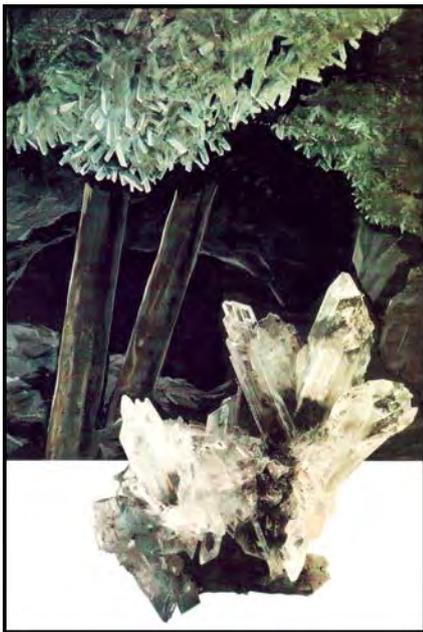


Abbildung 30: Rezente Gipskristalle in natürlichen Hohlräumen („Schlotten“)

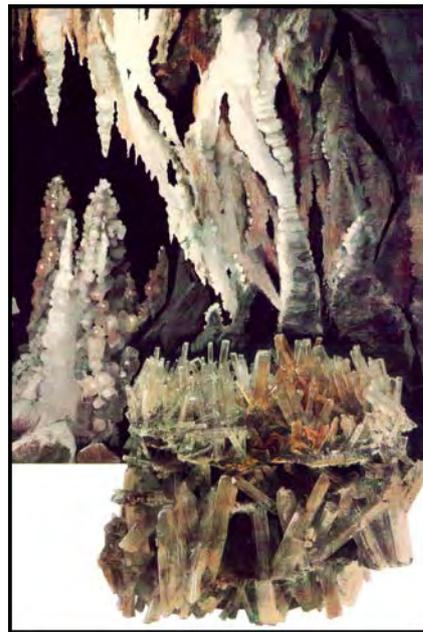


Abbildung 31: Rezente Steinsalzbildungen und Gipskristalle in künstlichen Hohlräumen („Strecken“)

Von den von *Gerlach* nachgewiesenen, vier Mineralisationsfolgen zugeordneten, kluftgebundenen Mineralen sollen hier nur die am häufigsten auftretenden Minerale aufgeführt werden:

Gangarten

Calcit (Kalkspat)	CaCO_3	Anhydrit	CaSO_4
Ankerit	$\text{CaFe}[\text{CO}_3]_2$	Quarz	SiO_2
Baryt (Schwerspat)	BaSO_4		

Erzminerale

Markasit	FeS_2	Millerit (Haarkies)	NiS
Chalkopyrit (Kupferkies)	CuFeS_2	Nickelin (Rotnickelkies)	NiAs
Bornit (Buntkupferferkies)	Cu_5FeS_4	Chloanthit (Weißnickelkies)	$(\text{Ni},\text{Co})\text{As}_3$
Chalkosin (Kupferglanz)	Cu_2S	Skutterudit (Speiskobalt)	$(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_3$
Digenit	Cu_9S_5	Safflorit	CoAs_2
Neodigenit	Cu_9S_5	Maucherit	Ni_4As_3
Betehtinit	$6(\text{Cu},\text{Fe})_2\text{S} \cdot \text{PbS}$	Ged. Wismut	Bi
Tennantit (Fahlerz)	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_3$	Uraninit (Pechblende)	UO_2
Ged. Silber	Ag	Molybdänit (Molybdänglanz)	MoS_2
Galenit (Bleiglanz)	PbS	Castaingit	$\text{CuS} \cdot 2\text{MoS}_2$
Sphalerit (Zinkblende)	ZnS		

4.6. Sekundärminerale

Die im wesentlichen als Spaltenfüllung, in Schlotten, in abgeworfenen Grubenbauen und auf Halde auftretenden Sekundärminerale sind in Tabelle 9 zusammengestellt:

		Spalten	Schlotten	Strecken	Halde
Sintercalcit	CaCO ₃			☐	
Aragonit	CaCO ₃	☐			
Gips	CaSO ₄ ·2H ₂ O	☐	☐	☐	☐
Marienglas	CaSO ₄ ·2H ₂ O	☐	☐		
Goethit (Nadeleisenerz)	FeOOH	☐		☐	☐
Limonit (Brauneisenerz)	FeOOH	☐		☐	☐
Chalkosin (Kupferglanz)	Cu ₂ S	☐			
Covellin (Kupferindig)	CuS	☐			
Malachit	Cu ₂ [(OH) ₂ /CO ₃]	☐		☐	☐
Azurit	Cu ₃ [OH/CO ₃] ₂	☐		☐	☐
Cuprit (Rotkupfererz)	Cu ₂ O	☐			
Gediegen Silber	Ag	☐			
Annabergit (Nickelblüte)	Ni ₃ [AsO ₄]·8H ₂ O	☐		☐	☐
Erythrin (Kobaltblüte)	Co ₃ [AsO ₄]·8H ₂ O	☐		☐	☐
Halit (Steinsalz)	NaCl			☐	

Tabelle 9: Übersicht über das Auftreten der Sekundärminerale

Bei Mineraliensammlern sind insbesondere die zum Teil sehr schönen Gipskristalle in Form glasklarer, weißer, hell- bis rostbrauner, schwarzer und selten auch grüner Aggregate beliebt und begehrenswert. Die schönsten Gipskristalle stammen dabei teils aus den Schlotten des Hohenthal-Schachtes (Hans-Seidel-Schacht), die 1908 angeschossen wurden, teils stammen sie aus den Schlotten des Paul-Schachtes (Otto-Brosowski-Schacht), die vor ca. 60 Jahren aufgefunden wurden. Besonders erwähnenswert sind bei den glasklaren Aggregaten die sog. Schwalbenschwanzwillinge. Die Bildung der Gipskristalle ist durch Ausscheidung im Wasser erfolgt. Salzwasser begünstigt die Kristallisation, da es primär vorhandenen Anhydrit und Gips schneller auflöst, und nach genügender Sättigung scheidet sich dann der Gips in Form von Kristallen ab.

Marienglas (=reinsten Gips), welches man in Schlotten und zuweilen als Spaltenausfüllung an Rücken findet, ist dadurch entstanden, daß Wasser in Spalten eingedrungen ist, bei Berührung mit den Anhydritschichten an Spaltenrändern diesen in Gips verwandelte, ihn dann auflöste und später als reinsten Gips wieder ausschied, wodurch sich auch die Durchsichtigkeit des Marienglases erklärt.

4.7. Fossilien

In der Zechsteinzeit drang ein flaches Meer aus dem Bereich der heutigen Nordsee nach Mitteleuropa vor und überflutete weite Teile Deutschlands, Polens, Dänemarks, der Niederlande und Englands. Zu den Basissedimenten dieses Zechsteinmeeres gehört auch der Kupferschiefer. Er entstand als Faulschlamm-Bildung in einem schlecht durchlüfteten Meer, das reich an Schwefelwasserstoff war. Bedingt durch den

Schwefelwasserstoffgehalt einerseits und den Sauerstoffmangel andererseits gingen die in diesem Meer vorhandenen Lebewesen, vor allem Fische und die in das Meer eingespülten oder eingewehten Pflanzen, zugrunde. Die abgestorbenen Lebewesen und Pflanzen sanken auf den Meeresboden und wurden dort im Schlamm eingebettet. Seine heutige Form erhielt der Kupferschiefer, einschließlich seiner Fossilabdrücke, dann durch die Verfestigung des Faulschlammes in den nachfolgenden geologischen Perioden durch die Druckwirkungen seiner hangenden Schichten.

Seit Beginn des Bergbaus stießen die Bergleute beim Abbau des Kupferschiefers auf Pflanzen- und Tierabdrücke. Lange bevor geologische und metallogenetische Fragen - z. B. im Hinblick auf die Genese des Kupferschiefers und die Herkunft der Metalle - eine wesentliche Rolle spielten, gaben diese Abdrücke Anlaß zu Diskussionen und haben die Aufmerksamkeit der Gelehrten auf sich gelenkt.

Nach *Haubold/Schaumburg* (1985) gingen zu Luthers Zeiten die Meinungen dahingehend auseinander, ob die Fossilien entweder Naturspiele bzw. Formungen der Berggeister oder Reste der Sintflut seien. Luther selbst vertrat letztere Ansicht und sprach von abgedruckten Hölzern, verschiedenen Arten Fischen und anderen Tieren.

Agricola und *Gessner* haben bereits 1546 bzw. 1565 über den häufigsten Kupferschieferfisch (*Palaeoniscus*) berichtet. Im 18. Jahrhundert setzte sich die naturwissenschaftliche Deutung zunehmend durch, wie es beispielsweise *Büttner* (1711) formuliert, in dem er „Zeichen und Zeugen der Sündfluth ... bei dem Lichte natürlicher Weisheit betrachtet“.

Einige der im Lagerstättenbereich im Erzhorizont gefundenen Fischabdrücke mit Darstellung ihres vermutlichen ehemaligen Aussehens.

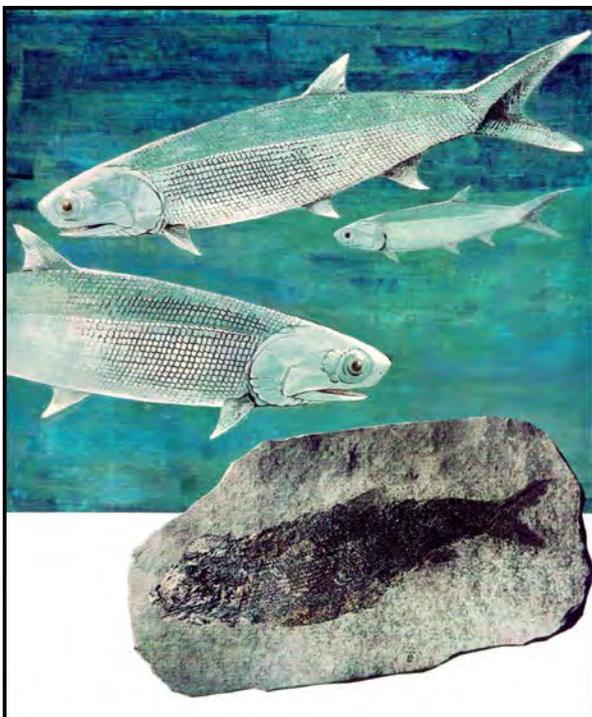


Abbildung 32: *Palaeoniscus freieslebeni*

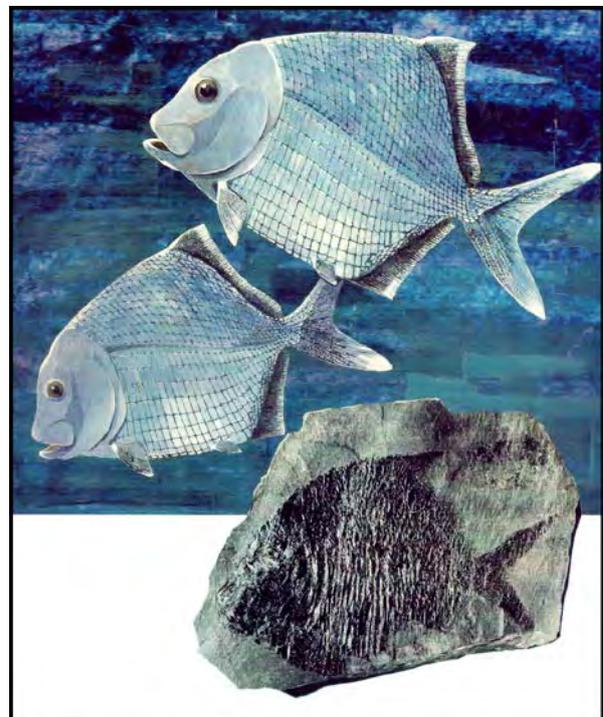


Abbildung 33: *Platyosomus gibbosus*

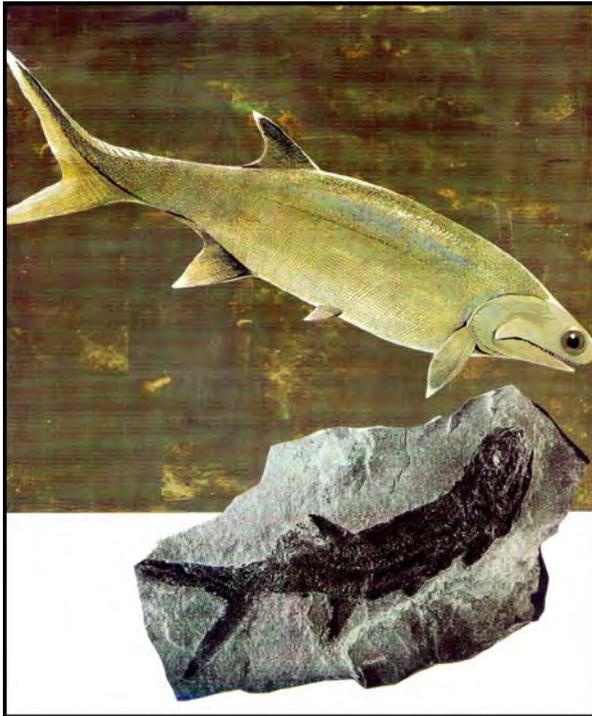


Abbildung 34: *Pygopterus humboldti*

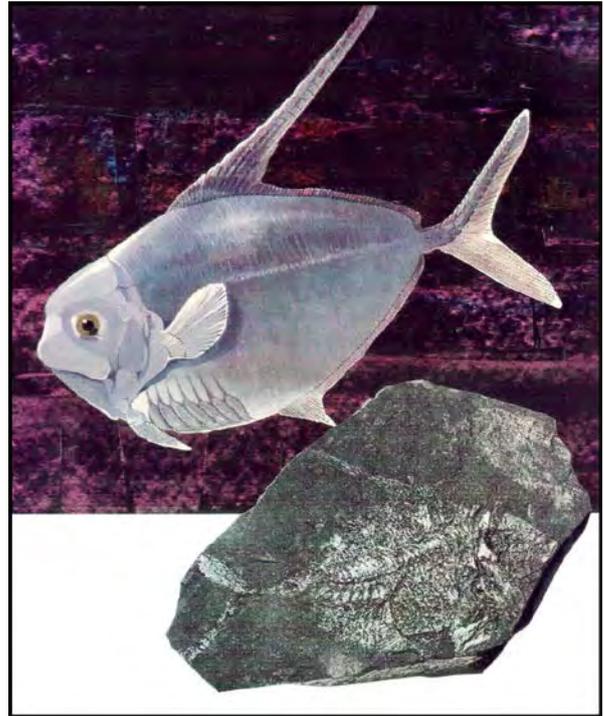


Abbildung 35: *Dorypterus hoffmanni*

Einige der im Lagerstättenbereich im Erzhorizont gefundenen Pflanzenabdrücke.



Abbildung 36: *Ullmannia frumentaria*



Abbildung 37: Sphenobaiera digitata



Abbildung 38: Callipteris martinsii

Anfang des 19. Jahrhunderts wurden die Abdrücke zur Grundlage erster paläontologischer Studien, die das heutige Bild bereits in Ansätzen umrissen und die Bestände der Lebensdokumente aus dem Kupferschiefer in ihren Details und ihre stammesgeschichtliche Interpretation ermöglichten.

Die Fundmöglichkeiten gut erhaltener Abdrücke verringerten sich in den letzten Jahrzehnten des Bergbaus erheblich, bedingt durch die fortschreitende Mechanisierung des Abbaus des Kupferschiefers einerseits und den Wegfall der manuellen Kläubung des Erzes über Tage bei der Verlagerung des Bergbaus aus der Mansfelder Mulde in das Sangerhäuser Lagerstättenrevier andererseits.

Als besonders „ästhetisch“ gelten die mit Buntkupferkies, Kupferkies, Kupferglanz und gediegen Silber vererzten Abdrücke. Die detailgetreue Erhaltung feinsten Strukturen beweist, daß die Vererzung unmittelbar nach dem Tod der Organismen eingesetzt hat, ausgelöst durch Fäulnis- und Zersetzungsphase.

Nach *Brandt* (1996) umfassen die Fossilfunde aus dem Eisleber und Sangerhäuser Kupferschiefer vier wirbellose Tiere, 17 Fische und 14 Pflanzenarten. Nicht sicher bestimmt sind vier weitere Pflanzenarten.

In den folgenden Ausführungen sollen nur die verbreitetsten und bekanntesten Fossilabdrücke erwähnt werden. Dabei sind die in der Literatur angegebenen Pflanzen- und Tiernamen nur in ihrer Kurzform wiedergegeben.

Pflanzenwelt (Flora)

Pflanzenreste im Kupferschiefer sind ausnahmslos in die Sedimente eingespült oder eingeweht worden, denn die Standorte lagen auf dem Land. Bei den Bergleuten waren Pflanzenabdrücke schon lange bekannt als „Kornähren“, „Stangengraupen“ und „Fliegenfittiche“.

Nach heutigem Wissensstand untergliedert man die Pflanzenabdrücke im Kupferschiefer in:

- Algen (Algae)
Algites virgatus

- Nadelbäume (Koniferen)
Ullmannia frumentaria
Ullmannia bronni
Pseudovoltzia liebeana
Quadrocladus solmsi
Quadrocladus orobiformis

- Farnsamer (Pteridospermen)
Taeniopteris eckardtii
Calipteris martinsii
Sphenopteris dichotoma
Sphenopteris patens

- Ginkgogewächse (Ginkgophyten)
Sphenobaiera digitata

- Schachtelhalme (Calamiten)
Neocalamites mansfeldicus

- Bandblattbäume (Cordaiten)
Cordaites pangertii

Einige der häufigsten Pflanzenabdrücke zeigen die Abbildungen 36-38.

Tierwelt (Fauna)

Entsprechend seiner Tierwelt kann der Kupferschiefer als Typus eines weitestgehend einheitlich ausgebildeten „Fischschiefers“ ausgewiesen werden. Vorzugsweise sind die stärker bituminösen Flözlagen Feine Lette, Grobe Lette und Kammschale „fischführend“.

Die bekanntesten Fischarten sind:

- *Palaeoniscum freieslebeni*
- *Pygopterus humboldti*
- *Platysomus gibbosus/striatus*
- *Platysomus rhombus*
- *Janassa bituminosa* sowie
- *Dorypterus hoffmanni*.

Der *Palaeoniscum freieslebeni* - bis 1977 unter dem Namen *Palaeoniscus freieslebeni* geführt - bestimmt das Bild der Fischfauna vom Kupferschiefer (rd. 90 % aller Funde). Er ist der auffälligste Fauna-repräsentant eines geologisch eng begrenzten Zeitraumes.

Palaeoniscum-Funde zeigen eine beträchtliche Spannweite der Körpergröße. Die Mehrzahl der Tiere ist zwischen 100 mm und 180 mm lang. Jungfische unter 70 mm Länge sind recht selten, ebenso Exemplare von mehr als 300 mm Länge. Die dichte, aber schwache Bezaehlung spricht dafür, daß sich der Fisch vorwiegend von Plankton ernährte. Innerhalb der Nahrungskette des Kupferschiefermeeres waren die reichen *Palaeoniscum*-Bestände die Hauptnahrungsquelle für den räuberischen *Pygopterus humboldti*, wie dies durch mehrfache Funde von *Palaeoniscum* in Abdomen von *Pygopterus* belegt ist. Auch die häufigen, stark mit *Palaeoniscum*-Schuppen durchsetzten zigarrenförmigen Koprolithen dürften vorwiegend von jenem verhältnismäßig zahlreich auftretenden Raubfisch stammen. Der *Pygopterus humboldti* erreichte eine Körperlänge von 400 mm bis 550 mm. Der Körperbau war der Lebensweise des wendigen schnellschwimmenden Raubfisches angepaßt. Der vorne spitz zulaufende Schädel war niedrig, der Mundspalt groß, die Kiefer stark bezahnt. Durch mehrfache Funde unverdauter *Palaeoniscum*-Exemplare in Abdomen von *Pygopterus* liegen schlüssige Beweise für dessen Ernährung vor. Ein besonders dramatischer Augenblick wurde dadurch konserviert, daß ein offenbar zu großer Beutefisch von dem Räuber nicht verschlungen werden konnte, sondern in seinem Schlund steckenblieb, so daß beide Tiere gemeinsam verendeten. *Platysomus striatus/gibbosus* und *Platysomus rhombus* waren langsame Schwimmer, die im offenen Meer zwar wehrlos, aber in der Lage waren, durch plötzliche Bewegungen in alle Richtungen durch enge Spalten zu schlüpfen, um sich in Sicherheit zu bringen. Seine Gestalt brachte ihm vielerlei Namen ein, wie „Meerbutt“, „Scholle“, „Rhombus“.

Die Küstensäume des Kupferschiefermeeres waren auch der Lebensraum der Reptilien (Reptilia). Ihre Skelette wurden in das Meer eingespült. Der wichtigste Kupferschiefer-Saurier, der *Proterosaurus*, gehört der Klasse der Reptilien an. Er erreichte eine Körperlänge bis über 1,60 m. Das zweite wichtige Reptil aus dem Kupferschiefer ist der *Weigeltisaurus*, der in der Literatur zuweilen auch als „fliegendes Reptil“ (Gleitflieger) bezeichnet wird, und somit das bisher früheste Auftreten fliegender Vertebraten in der Erdgeschichte von der Trias ins Oberperm weiter vorverlegt.

Neben den Fischen und Reptilien gehören zur Tierwelt des Kupferschiefers noch wirbellose Tiere (Invertebraten), wie Weichtiere (Mollusca), Gliederfüßer (Arthropoden) und Armfüßer (Brachiopoden).