

Zur Genese der Uran-Lagerstätten in Deutschland

On the Genesis of the Deposits of Uranium in Germany

Markus SCHADE
Im Grund 4
D-96528 Theuern/Thür.
www.goldmuseum.de

Zusammenfassung

In Deutschland sind magmatogene (magmatische, pegmatitische), hydrothermogene (pneumatolytische, hydrothermale), chemogene (zementative, infiltrative) und klastogene (Seifen-) Uran-Vorkommen bekannt. Bergbaulich gewonnen wurde Uran hierzulande bisher aus hydrothermalen, zementativen und infiltrativen Lagerstätten. Einige dieser Lagerstätten in Sachsen und Thüringen gehören zu den bedeutendsten ihrer Art in der Welt. Im Ergebnis von 45 Jahren Bergbautätigkeit und den anschließenden 25 Jahren Sanierungsarbeiten entstanden unzählige unter- und übertägige Aufschlüsse sowie eine Vielzahl von geowissenschaftlichen Arbeiten. Dennoch sind einige Fragen zur Entstehung dieser Lagerstätten, insbesondere was die Herkunft des Urans betrifft, nach wie vor umstritten. Dieser Beitrag ist ein Versuch, ein geochemisch, mineralogisch und lagerstättenkundlich plausibles Gesamtmodell der Genese der deutschen Uranlagerstätten zu entwerfen. Dabei spielen Sapropelite eine besondere Rolle als Metallquellen des Urans.

Abstract

There are magmatogenic (magmatic, pegmatitic), hydrothermogene (pneumatolytic, hydrothermal), chemogene (cementation, infiltration) and clastogene (placer) occurrences of uranium in Germany. But only hydrothermal and supergene deposits were mined in this country. Some of these deposits in Saxony and Thuringia belong to the most important of its kind in the world. After 45 years of mining activity followed by 25 years of renovation many underground and surface exposures were originated and scientific publications were written. Nevertheless some features of the genesis of these deposits and particularly the origin of uranium are still controversially. This paper is an attempt to sketch a geochemical, mineralogical and geological plausible general model of the genesis of the uranium deposits in Germany. Sapropelites are of particular importance as sources of uranium.

Inhaltsverzeichnis

1.	Anlass und Grundlagen der Arbeit	2
2.	Übersicht zur Urangewinnung in Deutschland	2
3.	Zur Geologie des Urans	3
3.1	Definitionen und Erläuterungen	3
3.2	Geochemische Besonderheiten	4
3.3	Mineralogische Besonderheiten	7
3.4	Lagerstättenkundliche Besonderheiten	8
3.4.1	Systematisierung der Uranlagerstätten	9
3.4.2	Vorschlag einer genetischen Klassifikation der Uranvorkommen	10
3.5	Evolution der Uranvorkommen	11
3.6	Metallogenetische Zusammenfassung	12
4.	Zur Genese der deutschen Uranlagerstätten	13
4.1	Zementative Lagerstätten vom Ronneburger Typ	13
4.2	Infiltrative Lagerstätten vom Sandsteintyp	15
4.3	Infiltrative Lagerstätten vom Biolithtyp	16
4.4	Hydrothermale Ganglagerstätten vom Erzgebirgstyp	16
4.5	Hydrothermale Lagerstätten in Graniten	18
4.6	Herkunft des Urans der hydrothermalen Ganglagerstätten	20
4.7	Erzkontrollierende Faktoren	23
5.	Raumzeitliches Modell der deutschen Uranvorkommen	24
5.1	Prävariszische U-Anreicherungen (Proterozoikum-Devon)	25
5.2	Variszische U-Anreicherungen (Karbon-Rotliegend)	27
5.3	Postvariszische U-Anreicherungen (Zechstein-Quartär)	29
5.4	Metallogenetisches Schema	31
6.	Resümee	32

1. Anlass und Grundlagen der Arbeit

Als ehemaliger „Wismuter“ habe ich die sächsisch-thüringischen Uranlagerstätten nie ganz aus den Augen verloren. Umso mehr vermisse ich nach wie vor ein in allen wesentlichen Teilen plausibles Genesemodell vor allem der sächsischen U-Ganglagerstätten ebenso wie eine Gesamtübersicht zur Genese der deutschen U-Vorkommen. Da ich glaube, der Nachwelt diesbezüglich etwas Bedenkenswertes hinterlassen zu können, habe ich mich entschlossen, meine Vorstellungen darüber aufzuschreiben, anstatt sie eines Tages mit ins Grab zu nehmen.

Die hier aufgestellten Thesen stützen sich im Wesentlichen auf eigene Erfahrungen (elf Jahre Tätigkeit als Betriebsgeologe im Uranerzbergbau) und geowissenschaftliche Untersuchungen auch von anderen Autoren. Dabei fließen theoretische Erkenntnisse und praktische Erfahrungen aus 42 Jahren geochemischer, mineralogischer, lagerstättenkundlicher und metallogenetischer Untersuchungen an Vorkommen des Elementes Nr. 79 in Mitteleuropa und weltweit mit ein. Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen besteht darin, dass Granite (und deren „magmatische Restlösungen“) keine signifikanten Lieferanten von Gold sind. Ähnliche Schlussfolgerungen ergeben sich auch für die hydrothermalen Erzgänge des Elementes Nr. 92. Es ist wohl nicht vollkommen abwegig, dass in Deutschland eines Tages wieder Uranerz abgebaut wird. Spätestens dann kommen die im Folgenden behandelten Fragen wieder auf den Tisch und spätestens dann werden die Ergebnisse der Lagerstättenuche und -erkundung die hier entwickelten Thesen bestätigen oder widerlegen. Im Übrigen kann ein tieferes Verständnis der Genese der deutschen Lagerstätten schon heute hilfreich sein bei der Erzsuche und -erkundung in anderen Regionen der Welt. Es gibt also mehr als nur einen Grund, sich mit der Genese der deutschen Uranvorkommen zu beschäftigen.

2. Übersicht zur Urangewinnung in Deutschland

Erste bewusste Begegnungen und geistige Auseinandersetzungen einzelner Menschen mit Mineralen und Erzen des Metalls, das später Uran genannt wurde, spielten sich wohl im Erzgebirge ab. Dort trafen Bergleute im Mittelalter beim Abbau von Silber- und anderen Erzgängen hin und wieder auf ein schweres, schwarzes, pechartiges Mineral, das sie aus Erfahrung für Vorboten zurückgehender Gehalte der Wertmetalle, insbesondere Silber, hielten. Diese Blende sah also nicht nur aus wie Pech, sie brachte auch kein Glück beim Abbau des bedeutendsten Edelmetalls des Erzgebirges. Eine der ersten schriftlichen Erwähnungen der Pechblende, eines der häufigsten Uranminerale, geht auf das Jahr 1565 zurück, als Johannes Kentmann (1518-1574) dieses Mineral lateinisch-sächsisch als „*Plumbago sterilis pici similis. Bechblende*“ (KENTMANN, S. 77) bezeichnet. Die lateinische Beschreibung kann als „bleiartig(schwer)es nutzloses pechähnliches (Mineral)“ übersetzt werden, was dem damaligen Kenntnisstand darüber entspricht.

In einer Erzprobe aus der Johannegeorgenstädter Georg-Wagsfort-Fundgrube entdeckt Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) das Element Uran. Die erste Abhandlung über seine Entdeckung hat er „am 24.9.1786 der Akademie der Wissenschaften zu Berlin vorgelegt“ (KIRCHHEIMER, S. 15). Sie wurde aber erst 1792 publiziert. Da er die „gleiche Erkenntnis (...) schon 1789 an anderer Stelle veröffentlicht“ (KIRCHHEIMER, S. 15) hat, wird diese Jahreszahl (1789) oft (fälschlich) als Entdeckungsjahr des Urans genannt. Später zeigte sich allerdings, dass Klaproth das Erz nur bis zum Uranoxid aufgeschlossen hatte. Das erklärt auch, warum er diese (dem Arsen äußerlich ähnliche) Substanz für eine „seltsame Art Halb-Metall“ hielt. Die Darstellung von Uranmetall gelingt erstmals 1841 dem französischen Chemiker Eugène-Melchior Peligot (1811-1890).

Im 19. Jahrhundert wird Pechblende erstmals gezielt abgebaut, nach dem man erkannt hat, dass sie sich zur Herstellung von Farben für Gläser und keramische Produkte eignet. 1819 beginnt der Abbau von Uranerzen in Johannegeorgenstadt. Von 1827 bis 1938 sind dort aus 29,698 t Erz 6,1 t U_3O_8 ausgebracht worden (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.1, S. 7). Im Schneeberger Revier werden von 1825 bis 1931 sogar 137 t Uranerz mit 8,66 t Uran (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.2.1, S. 1) gewonnen. Kleinere Mengen Uran stammen aus anderen Bergbaurevieren des Erzgebirges wie bei Annaberg und Marienberg. Im Schwarzwald wird 1840 Uranpecherz in der Grube Sophia bei Wittichen beschrieben (KIRCHHEIMER, S. 25). Funde von Uranglimmern sind im mittleren Schwarzwald sogar schon „1793 zur Mitteilung gelangt“ (KIRCHHEIMER, S. 11). Die intensive Suche und Erkundung sowie der Abbau von Uranerz in großem Stil setzen in der Mitte des 20. Jahrhunderts ein, als im amerikanisch-(britisch-französisch-)sowjetischen Wettlauf um den Bau der ersten Atombombe die weltweite Jagd nach dem strategischen Rohstoff Uran forciert wird. Die wichtigsten bekannten Uranlagerstätten der Welt liegen damals in Belgisch-Kongo (Shinkolobwe, entdeckt 1913), Südafrika und Kanada (Oberer Bärensee, entdeckt 1931) und damit im Einflussbereich der USA. Die Sowjetunion verfügt seinerzeit über keine nennenswerten eigenen Reserven und organisiert die Lagerstättenuche in ihrem Einflussbereich. Bereits 1946 zeichnet sich ab, dass die Uransuche in Sachsen aussichtsreich ist.

Im sowjetisch zunächst besetzten und dann kontrollierten Teil Deutschlands wird aus militärisch organisierten Vorläufern am 2. Juli 1947 ein Unternehmen gegründet, das sich unter strenger Geheimhaltung mit der Gewinnung von Uran beschäftigt, die Sowjetische Aktiengesellschaft (SAG) Wismut. Sie wird am 1. Januar 1954 in das zweistaatliche Unternehmen Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft (SDAG) Wismut überführt. Die Wismut, wie das Unternehmen landläufig genannt wird, hat bei ihren Such- und Erkundungsarbeiten nach eigenen Angaben insgesamt 27 Uranlagerstätten und eine Reihe nennenswerter Vorkommen von Zinn, Wolfram, Silber, Fluorit, Antimon, Seltenen Erden und Baustoffen gefunden. Die bedeutendsten Uranlagerstätten waren das Ronneburger Erzfeld (113 010 t U abgebaut) im (Ost-)Thüringischen Schiefergebirge sowie das Erzfeld von Schneeberg-Schlema-Alberoda (80 880 t U abgebaut) im sächsischen (West-)Erzgebirge (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, S. 1). „Die Gesamtförderung von Bergen und Erz im Zeitraum von 1946 bis 1990 lag bei 1.200 Mio. t. Davon wurden 200 Mio. t an die Aufbereitungsbetriebe geliefert und 1.000 Mio. t aufgehaldet. In der Zeit von 1946 bis 1990 wurden durch die Wismut und ihre Vorläufer 231.000 t Uran gewonnen“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, S. 1). Die DDR wird damit der viertgrößte Uranproduzent der Welt hinter den USA, Kanada und der Sowjetunion. Bei den Sanierungsarbeiten fielen von 1991 bis 2011 weitere 3089 t Uran an, die für ca. 67 Millionen Euro verkauft wurden (Deutscher Bundestag, Drucksache 17/6237).

Im amerikanisch(-britisch-französisch) zunächst besetzten und dann kontrollierten Teil Deutschlands kam es nie zu einer systematisch flächendeckenden Suche und Erkundung von Uranvorkommen. Die geologischen Landesdienste unterstützten aber die Prospektionstätigkeit privater Unternehmen durch geowissenschaftliche Voruntersuchungen. So begann die Badische Geologische Landesanstalt 1951 mit ausführlichen Recherchen über Hinweise auf Uranvorkommen im Schwarzwald (SCHWARZMAIER et al., S. 128), nachdem bei Sulzburg, Eisenbach und Wittichen Uranerzfunde bekannt geworden waren. Dieser 1957 abgeschlossenen Inventur folgten Prospektionsarbeiten von Bergbauunternehmen. Bezeichnend für die damalige Arbeitsweise war, dass eine der größten Uranlagerstätten Westdeutschlands (Krunkelbach im Schwarzwald) weder durch staatliche, noch durch unternehmerische Sucharbeiten, sondern durch zwei pfiffige Studenten entdeckt worden war. Sie hatten im Mai 1957 Uranminerale gefunden und ihr Wissen an ein Bergbauunternehmen verkauft. Die Lagerstätte Krunkelbach gilt als die einzige in Westdeutschland, die über das Erkundungsstadium hinauskam. Der Abbau dieser Lagerstätte erbrachte von 1973 bis 1991 etwa 480 t Uran (<http://www.wikipedia.org/wiki/Uranbergbau>). Außer in Baden-Württemberg sind kleinere westdeutsche Uranlagerstätten auch in Bayern und Rheinland-Pfalz bekannt. In der Bundesrepublik Deutschland wurde Uranerz nach Auskunft der Bundesregierung (1984) nur versuchsweise gefördert und zwar in den Bergwerken Krunkelbach bei Menzenschwand (Schwarzwald), Mähring, Poppenreuth und Schirmberg bei Girnitz (alle drei in der Oberpfalz), Großschloppen (Oberfranken) und Müllenbach bei Baden-Baden (AUTORENTEAM, 1984). Ungenannt bleiben in dieser Aufzählung der Tagebau bei Ellweiler (Rheinland-Pfalz), wo sich auch die einzige (westdeutsche) Aufbereitungsanlage für Uranerz befand, und das seinerzeit geheim betriebene Uranbergwerk Rudolfstein (Oberfranken). Beide Gruben waren 1984 bereits außer Betrieb.

Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Urananomalien (AUTORENTEAM, 1966, S. 14-20; AUTORENTEAM, 1986, S. 274-291; AUTORENKOLLEKTIV, 2002) in (Nord-, Süd-, Ost-, West- und Mittel-)Deutschland.

3. Zur Geologie des Urans

Grundlage für das Verständnis der Genese der Uranlagerstätten ist die Kenntnis der Metallogenese dieses Metalls, die seine geochemischen, mineralogischen und lagerstättenkundlichen Besonderheiten einschließt.

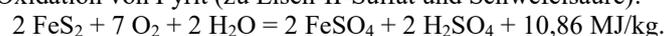
3.1 Definitionen und Erläuterungen

Zur Vermeidung von Missverständnissen werden zunächst einige Grundbegriffe definiert und erläutert.

Endogen/exogen

„Endogene Prozesse werden mit Energie aus dem Erdinneren angetrieben, exogene mit Energie aus der Sonne.“ Nach dieser Definition lassen sich die meisten geologischen Bildungen genetisch klar zuordnen. Es gibt aber auch Grenzfälle. Ab wann werden beispielsweise aus meteorischen (also klar exogenen) Sickerwässern, die sich auf ihrem Weg in die Tiefen der Erdkruste erwärmen, hydrothermale (also klar endogene) Lösungen? Sollte man eventuell eine Temperaturgrenze festlegen?

Die Temperatur kann allenfalls eine grobe Orientierung bieten. Sie ist aber kein klares Kriterium für diesen oder jenen Prozess. Es gibt nämlich auch sehr tiefentpermierte endogene Lösungen (< 100 °C) und heiße exogene. So wurde die untertägige Laugung von magaziniertem Haufwerk im Ronneburger Erzfeld unter anderem wegen der Selbstentzündung der Schwarzschiefer eingestellt (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.4.7, S. 35). Hauptursache solcher „endogenen Brände“ (Endogen ist hier nicht im geologisch-genetischen Sinne gemeint.) ist die exotherme Reaktion der Oxidation von Pyrit (zu Eisen-II-Sulfat und Schwefelsäure):



Welche Hitze dabei entstehen kann, das belegen Messungen in Bohrlöchern: „In Übertagebohrungen im Bereich der Blöcke 20, 34 und 46 wurden Temperaturen von mehr als 300°C gemessen“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.14.7, S. 2).

In Grenzfällen sollte also jeweils speziell definiert werden, was exogen und was endogen ist. Bei genetischen Betrachtungen zum Uran ist das unumgänglich, da die erzbildenden hydrothermalen (also eigentlich klar endogenen) Lösungen dieses Metalls eine wesentliche Eigenschaft exogener Wässer haben müssen und zwar ein erhöhtes Oxidationspotential, sonst können sie kein Uran mobilisieren. Vadose Wässer werden hier so lange als exogen betrachtet, wie sie (deszendend) in die Tiefe vordringen, selbst wenn sie sich dabei erwärmen. Sobald sich ihre Fließrichtung umkehrt und die Lösungen (aszendent) aufsteigen, sind sie endogen und verhalten sich auch so, kühlen nämlich tendenziell ab und scheiden ihre mineralische Fracht ab.

Vorkommen/Lagerstätte

„Vorkommen sind Teile der Erdkruste mit anomal hohen Anreicherungen von Rohstoffen“ (unabhängig von ihrer Abbauwürdigkeit). Anomal hoch ist jede gegenüber dem allgemeinen Durchschnittsgehalt signifikant erhöhte Anreicherung. Sie wird für jede Rohstoffart separat definiert. „Lagerstätten sind bergwirtschaftlich nutzbare Vorkommen“. Die Lagerstätte ist also eine ökonomische Kategorie, das Vorkommen eine übergreifende geologische. Jede Lagerstätte ist ein Vorkommen, aber nicht jedes Vorkommen eine Lagerstätte.

Uraninit/Nasturan/Pechblende/Uranschwärze

Es gibt eine Reihe von Synonymen und Varietäten des Minerals mit der Zusammensetzung UO_2 (bis U_3O_8). Am ältesten ist wohl der Name Pechblende oder (sächsisch) Bechblende. Als Pechblende wird hier die traubig-nierige Varietät des Uraninits und als Uranschwärze die pulverig-erdige bezeichnet. Der Name Uraninit wird hier sowohl als Oberbegriff für das Mineral (UO_2 - U_3O_8) als auch für seine hochthermale, meist idiomorph-kristalline Varietät verwendet. Die Bezeichnung Nasturan wurde 1853 von dem Mineralogen und Schriftsteller Franz von Kobell eingeführt und war bei sowjetischen Geologen (nicht nur der SDAG Wismut) beliebt, die darunter im Wesentlichen die Mineralvarietät verstanden, die (im Deutschen) der Pechblende entspricht.

Hauptvererzungsprozess

Da praktisch alle (U-)Vorkommen im Ergebnis mehrerer genetischer Prozesse entstehen, erfolgt ihre Zuordnung zu dieser oder jener Klasse oder Gruppe stets entsprechend dem jeweiligen Hauptvererzungsprozess. Wer sich nicht auf ein Ereignis als Hauptprozess festlegen kann oder will, dem bleibt es unbenommen, jeden einzelnen Prozess im gesamten Erzbildungszyklus lagerstättengenetisch zu berücksichtigen und am Ende vielleicht eine syndimentär-metamorph-hydrothermal-zementative Lagerstätte zu kreieren. Hier werden hydrothermale Vorkommen jedenfalls auch dann als solche bezeichnet, wenn ihre oberflächennahen Teile exogen überprägt wurden. „Schwarzschiefer-Lagerstätten“ wie das Ronneburger Erzfeld sind den Zementiten zuzuordnen, auch wenn in ihnen einerseits geringfügig hydrothermale Bildungen bekannt sind und andererseits die Sapropelite selbst natürlich Infiltrate sind. Schließlich werden Sandsteinlagerstätten wie die in Königstein als Infiltrate klassifiziert, auch wenn in ihnen untergeordnet seifenartige Anreicherungen nachweisbar sind und epigenetisch zementative Erzulagerungen stattgefunden haben. Nähere Angaben zur (genetischen) Klassifizierung der Lagerstätten folgen weiter unten in diesem Kapitel (Abschnitt 3.4.2).

3.2 Geochemische Besonderheiten

Uran zeichnet sich (petrologisch-)geochemisch vor allem durch seine lithophilen, inkompatiblen und bivalenten Eigenschaften aus.

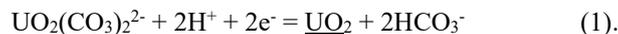
Sein **lithophiler Charakter** sorgt dafür, dass es sich als „silikat-liebendes“ Element extensiv bevorzugt in der Erdkruste und zwar in sauren (silikatreichen) Magmatiten (Granite, Rhyolithe) anreichert. So enthalten ultrabasische Magmatite im Mittel nur 0,02 ppm Uran, während es in sauren 4,5 ppm (BOYLE, S. 23) sind.

- Im hochthermalen Milieu (Magmen) passt es allerdings als **inkompatibles Element** nicht in das Kristallgefüge der gesteinsbildenden Massenminerale. Lediglich einige akzessorische Minerale wie Zirkon $ZrSiO_4$ und Monazit (Ce, Y, La, Th) PO_4 sind in der Lage, größere Mengen Uran in ihre Kristallstruktur einzubauen. Die Elemente Th, Zr, Ce und andere Seltene Erden haben ähnliche Ionenradien wie Uran (in Achterkoordination mit Sauerstoff) und kristallisieren im gleichen (Fluorit-)Gittertyp, so dass sie sich in vielen Mineralen gegenseitig ersetzen können. Wenn der Platz in diesen Mineralen nicht ausreicht, dann bildet Uran in den (Rest-)Schmelzen und Pegmatiten eigene Minerale bis hin zum Uraninit UO_2 .

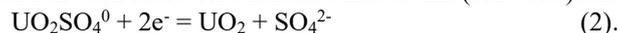
Bei den inkompatiblen Elementen wird zwischen solchen mit großen Ionenradien (LILE, large-ion lithophile elements) und jenen mit hohen Ionenvalezen (HFSE, high field strength elements) unterschieden. Uran gehört wie Thorium, die Seltene Erden, Zirkonium und Hafnium, Niob und Tantal zu den HFSE. Mit diesen Metallen und mit Titan bildet Uran auch gern magmatogene (magmatische und pegmatitische) sowie hochhydrothermogene (pneumatolytische) Element- (und Mineral-)Paragenesen. Uran migriert in diesen (mehr oder weniger reduzierenden) Milieus generell vierwertig (U^{4+}).

Uran kann sich lagerstätten genetisch signifikant generell (1.) an reduktiven oder (2.) an nichtreduktiven Löslichkeitsbarrieren abscheiden.

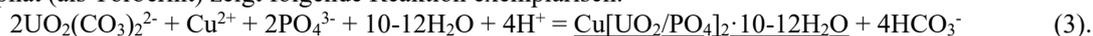
1. Reduktionsbarrieren spielen eine hervorragende Rolle als lagerstättenbildender Faktor für Uran in hydrothermalen und exogenen Milieus. In der Natur erweisen sich organische Substanzen (Kohle, Schwarzschiefer, mobile Kohlenwasserstoffe), Sulfidschwefel (Sulfidminerale, biogener Sulfidschwefel) und unter bestimmten Bedingungen (SCHADE, 1984, S. 79 ff.) auch zweiwertiges Eisen als die wirksamsten Elektronen-Donatoren und damit Reduktionsmittel. Die Fällung des Urans aus hydrothermalen oder exogenen (Uranyl-Karbonat-)Lösungen an einer Reduktionsbarriere (als Uraninit) läuft nach folgender schematischer Reaktion ab:



Diese Reaktion ist typisch für schwach saure bis basische Milieus. Im (schwefel)sauren Milieu verläuft sie so:



2. Uran kann sich auch ohne Redoxreaktionen abscheiden und zwar in vierwertiger Form aus hochthermalen Systemen wie Magmen und sechswertig aus tieferthermalen wie hydrothermalen und exogenen Lösungen. Bei hochthermalen Prozessen bildet vierwertiges Uran bevorzugt Minerale wie Brannerit UTi_2O_6 , Betafit $(\text{U,Ca})(\text{Ti,Ta,Nb})_3\text{O}_9$, Davidit $(\text{REE})(\text{Y,U})(\text{Ti,Fe}^{\text{III}})_{20}\text{O}_{38}$ und Uranothorianit $(\text{Th,U})\text{O}_2$. Diese Minerale sind bei tieferen Temperaturen relativ stabil, so dass ihr Uran nur bedingt für epigenetische Prozesse zur Verfügung steht. Sechswertiges Uran kann sich (ohne Reduktion) an Löslichkeitsbarrieren abscheiden, wenn die mobilen Uranyl-Komplexe auf bestimmte Anionen treffen, mit denen sie schwerlösliche Verbindungen bilden wie Phosphate, Arsenate, Molybdate, Vanadate und Silikate. Häufige „sekundäre“ Minerale sind Uranglimmer wie Torbernit, Autunit, Zeunerit und Uranocircit. Ihre Entstehung kann lagerstättenbildend von Bedeutung sein. Die Fällung des Urans aus exogenen Lösungen an einer Löslichkeitsbarriere in Anwesenheit von gelöstem Kupfer und Phosphat (als Torbernit) zeigt folgende Reaktion exemplarisch:

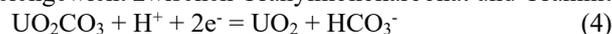


Thermodynamische Berechnungen belegen, dass Uranyl-Arsenate selbst bei Karbonatkohlenstoff-Aktivitäten von 10^{-1} Mol/l stabil sind. Die Stabilität der festen Phasen nimmt von den Arsenaten über die Phosphate zu den Vanadaten sogar noch zu. Anders als die Uranylhydroxide (Schoepit $\text{UO}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sind -arsenate, -phosphate und -vanadate auch in sauren Milieus stabil.

Alternativ zur Bildung von Uranglimmern kann sich Uranyl auch mineralisieren durch Entzug von Wasser (Verdunstung an der Erdoberfläche). Dabei entstehen Minerale wie Schoepit oder Rutherfordin UO_2CO_3 .

Wie plausibel ist das „Karbonatmodell“?

Einige Autoren (KASANSKI et al., S. 198, HILLER & SCHUPPAN, S. 61 f., HOFMANN, S. 109) favorisieren als Uranabscheidungsmechanismus das „Karbonatmodell“, das jedoch vor allem aus geochemischen Gründen nicht unproblematisch ist. Nach Ansicht von Axel Hiller und Werner Schuppan kann dieses Modell auf „die Bedingungen der Erzabscheidung in der Lagerstätte [Schneeberg-Schlema-Alberoda] (...) mit ausreichender Genauigkeit angewendet werden. Es wurde unter Berücksichtigung der Spezifik von Bau und Zusammensetzung der Uranerzgänge erarbeitet. Das Wesen des Modells besteht darin, dass sich in karbonatischen, neutralen und schwach basischen Lösungen bei gemäßigten Temperaturen stabile Uranylkarbonatkomplexe bilden, wobei auch Diuranyl- und besonders Triuranylkarbonate [Welche Form unter welchen Eh-pH-Bedingungen dominiert, geht aus Abb. 1 hervor.] eine wichtige Rolle spielen. In Form dieser Verbindungen kann das Uran sowohl unter oxidierenden als auch reduzierenden Bedingungen migrieren, selbst dann, wenn die Lösungen potentielle Reduktionsmittel des Urans enthalten“ (HILLER & SCHUPPAN, S. 72). Der letzte Satz wirft eine Reihe von Fragen auf: Müsste nicht nach den Gesetzen der Chemie ein reduzierendes Milieu, in dem also ein Überschuss an freien Elektronen herrscht, das Gleichgewicht zwischen Uranylmonokarbonat und Uraninit



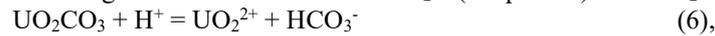
nach rechts verschieben? Müsste also der größte Teil des gelösten Urans in einem hinreichend reduzierenden Milieu nicht doch seine Migrationsfähigkeit verlieren und als Uraninit ausfallen? Und wird damit nicht eine Lösung, die potentielle Reduktionsmittel enthält, instabil, bis sich das Gleichgewicht wieder eingestellt hat durch Bildung von Uraninit, was dem System überschüssige Elektronen entzieht? Eine „friedliche Koexistenz“ von gelösten Uranyl-Komplexen und Reduktionsmitteln ist also im Gleichgewichtszustand nicht plausibel. Das gilt nicht nur für den Monokarbonatkomplex, sondern auch für das Uranyldikarbonat $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ und das Uranyltrikarbonat $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$.

Die eigentliche Uranabscheidung wird wie folgt beschrieben: „Die Abscheidung des Urans erfolgte bei der Überlagerung zweier Prozesse: Abführung von Kohlendioxid und Pufferreaktionen, die ein Anwachsen des pH-Wertes verhindern. Die Vergrößerung der Anzahl und des Volumens der offenen Spalten, die anfänglich von mineralisierten Fluida gefüllt wurden und später das feste Mineralsubstrat aufnahmen, bewirkte eine Störung des Gleichgewichtes Lösung-Gestein und führte zu günstigen Bedingungen für eine Dekarbonatisierung der

Lösungen. Die Abführung von Kohlendioxid konnte unter realen Bedingungen in der Lagerstätte durch zwei Prozesse erfolgen: Freisetzung von Gasen bei der Entstehung von offenen Hohlräumen und Karbonatisierung des Nebengesteins bei sinkendem Partialdruck des Kohlendioxids“ (HILLER & SCHUPPAN, S. 72). Dieser Fällungsmechanismus erscheint (nur) auf den ersten Blick plausibel: Karbonat entfernt sich aus dem System – Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts (siehe Reaktionsgleichungen 1 und 4) – Uraninit fällt aus. Tatsächlich bewirkt die Verringerung der Karbonat-Aktivität im System – etwa durch CO₂-Entgasung oder die Bildung von Karbonat-Mineralen – zwar eine Destabilisierung der Uranyl-Karbonatkomplexe aber noch keine Abscheidung von Uraninit. Thermodynamische Modelle (Abb. 1) zeigen, dass eine Abnahme der Karbonat-Aktivität (ohne signifikante Senkung des Oxidationspotentials) zur Bildung von Schoepit (nicht Uraninit!) führen würde:



Das ist bei den hydrothermalen Gangerzen aber nicht der Fall. Außerdem wäre Schoepit auch nur in basischen Milieus stabil. In neutralen und sauren Milieus würden die Uranyl-Karbonatkomplexe bei abnehmender Karbonat-Aktivität in der Lösung verbleiben und zwar als UO₂²⁺ (bei pH < 5) oder UO₂OH⁺ (bei pH 5-7):



Eine Dekarbonatisierung der Lösung führt folglich in keinem Falle zur Abscheidung von Pechblende. Da aber Pechblende das häufigste hydrothermale Uranmineral ist, mineralisiert sich Uran nicht durch eine Dekarbonatisierung der Lösung, sondern durch ihre Reduktion. (Diese Erkenntnis der Fällung von Uraninit an Reduktionsbarrieren ist nicht neu und durch unzählige Feldbefunde belegt.) Dabei wird Karbonat frei, das je nach physiko-chemischen Bedingungen zur Mineralbildung führt oder entgast oder in der Lösung verbleibt. Das gilt nicht nur für hydrothermale, sondern auch für entsprechende exogene Prozesse.

Schlussfolgerung:

Uraninit kann sich aus wässrigen (exogenen oder hydrothermalen) Lösungen nur durch Reduktion der komplexbildenden Uranyl-Ionen abscheiden. Ohne ein hinreichend niedriges Redoxpotential bildet sich auch bei gründlichster Dekarbonatisierung der Lösung kein Uraninit. Dagegen scheidet sich bei einem hinreichend niedrigen Redoxpotential Uraninit auch aus karbonatreichsten Lösungen ab. Hinreichend niedrig ist das Redoxpotential dann, wenn folgende Ungleichung möglichst deutlich erfüllt ist:

$$\text{Eh} < 0,6 - 0,07\text{pH},$$

was als Gleichung in etwa dem Übergang U^{IV}/U^{VI} entsprechen würde. Die genaue Lage der Reduktionsbarriere im Eh-pH-Feld hängt von den konkreten thermodynamischen Parametern des jeweiligen Systems ab.

Die Bivalenz als geochemische Besonderheit des Urans hat grundlegende lagerstättengenetische und darüber hinausgehende Konsequenzen. Sie führt (1.) dazu, dass sich in den oxidierenden erdoberflächennahen Milieus die Wege des (sechswertigen, leicht löslichen) Urans von denen des (nur vierwertigen, schlecht löslichen) Thoriums trennen, was als lagerstättengenetisches Kriterium von Bedeutung sein kann. Daneben sorgt das oxidierende Milieu der Erdoberfläche (2.) für eine gute Löslichkeit und damit Beweglichkeit des Urans, bis es an einer (tiefer liegenden) Reduktionsbarriere ausgefällt wird und sich ablagert. Dieser „Selbstreinigungs-Effekt“ der Oxidationszone ist von fundamentaler Bedeutung nicht nur für die Metallogenese des Urans, sondern eventuell auch für eine weniger gestörte Evolution des Lebens auf der Erde. Die Eigenheiten der Geochemie des Urans verdienen jedenfalls besondere Aufmerksamkeit bei der Suche nach seinen Lagerstätten. So können einerseits Verdunstungsanreicherungen Anomalien vortäuschen, wo gar keine Lagerstätten sind. Andererseits kann der „Selbstreinigungs-Effekt“ die (bei vielen anderen Erzen vorhandenen) geochemischen Aureolen an der Erdoberfläche bis zur Unkenntlichkeit verwischen.

Genetisch bedeutsam für die Bildung von hydrothermalen und exogenen U-Vorkommen ist ein hinreichend hohes Oxidationspotential der Fluide zur Stabilisierung des sechswertigen Urans als Voraussetzung für seine Mobilität in wässrigen Lösungen.

3.3 Mineralogische Besonderheiten

Nach abnehmender Bildungsenergie (-temperatur) können folgende genetische Hauptgruppen von Uranmineralen unterschieden werden: (endogene) magmatogene und hydrothermogene sowie (exogene) chemogene. Hinzu kommen noch klastische Minerale, die nicht neu gebildet, sondern allenfalls „umgeformt“ werden.

- Im magmatogenen Milieu entstehen relativ arme aber teilweise große U-Vorkommen in Magmatiten sowie tendenziell etwas reichere aber auch kleinere in Pegmatiten. Die höchsten Bildungstemperaturen unter den Uranmineralen haben einige Oxide wie Brannerit, Betafit, Davidit und Uranothorianit. Letzteres Mineral ist Teil der lückenlosen Mischungsreihe Thorianit ThO₂ – Uraninit UO₂. Wegen des inkompatiblen Verhaltens von Uran kommen diese Minerale gern in hoch differenzierten sauren und alkalischen Magmatiten und in entsprechenden Pegmatiten vor. Typisch für magmatisches und pegmatitisches Uraninit sind erhöhte Gehalte an Thorium. Hochthermales Uraninit bildet nicht selten idiomorphe (kubische) Kristalle.

Auch andere (Nicht-U-)Minerale können sich mit Uran anreichern. Dazu gehören Akzessorien wie Zirkon und Monazit aber auch seltenere Minerale wie Steenstrupin $\text{Na}_{14}\text{Ce}_6\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}\text{Fe}_2^{2+}(\text{Zr,U,Th})(\text{Si}_6\text{O}_{18})_2(\text{PO}_4)_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, ein „komplexes Monazit-Silikat“ mit bis zu 2 % U. Uran ersetzt in diesen Mineralen Zirkonium, Seltene Erden und Thorium.

- Im hydrothermogenen Milieu sind höherthermale pneumatolytische Bildungen von tieferthermalen hydrothermalen zu unterscheiden. Während sich Uran in Pneumatolyten minerogenetisch noch weitgehend wie in den Magmatogeniten verhält, also thoriumreiches Uraninit (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 59) und U-Ti-Minerale wie Brannerit bildet, entsteht aus ihm in hydrothermalen Milieus bevorzugt Pechblende. Typisch für hydrothermale Pechblende sind kolloidmorph, radialstrahlig-kugelige, nieren- oder traubige Abscheidungen. Coffinit $\text{U}[(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})_4]$ kann sowohl aus pneumatolytischen als auch aus hydrothermalen (und exogenen) Prozessen hervorgehen.

Die Bildung von Uranmineralen an Reduktionsbarrieren erfolgt im hydrothermalen (und exogenen) Milieu umso intensiver, je stärker das Redoxgefälle an der Barriere ist. Deshalb liegen in Uranreicherzen oft oxidische Minerale (wie Hämatit) und nichtoxidische (wie Sulfide) auf engstem Raum dicht beieinander. Erhöhte Oxidationspotentiale sorgen bei der Erzbildung auch für die Verringerung des S/Se-Verhältnisses als Voraussetzung für die Abscheidung von Seleniden, die das Uran in einigen hydrothermalen Paragenesen begleiten.

- Typisch für exogen-geochemische (zementative und infiltrative) Bildungsbedingungen sind im oxidierenden Milieu Minerale wie Uranglimmer (Torbernit, Autunit, Zeunerit, Carnotit, ...). Im reduzierenden Milieu bildet Uran (IV) dagegen Uraninit und Coffinit. Exogenes Uraninit tritt als Uranschwärze, eine pulverige Form dieses Minerals, oder Pechblende auf. Exogene Pechblende unterscheidet sich in den Parametern ihres Kristallgitters von hydrothermal gebildeter (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.14.0.2, S. 14).

- Voraussetzung für die Bildung exogen-mechanischer Paragenesen (Seifen) ist die erhöhte geochemische und mechanische Verwitterungsresistenz einiger Uranminerale. So finden sich Davidit und Brannerit als klastische Einträge in den cenomanen Sandsteinen des Böhmisches Kreidebeckens (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 237) und Uranothorianit ist aus Seifen in Sri Lanka bekannt.

Schlussfolgerung

Einige U-Minerale können bei unterschiedlichen Bildungsbedingungen entstehen. So gibt es endogenes (magmatisches, pegmatitisches, pneumatolytisches und hydrothermales) Uraninit aber auch exogenes (zementatives und infiltratives). Die Minerale verraten ihre Genese durch zusätzliche Kriterien wie ihre Paragenese, ihr Spurenelementspektrum, ihren Habitus und ihre Kristallstrukturparameter.

3.4 Lagerstättenkundliche Besonderheiten

Weltweit sind neben verschiedenen endogenen (magmatischen, pegmatitischen, hydrothermalen) auch diverse exogene (zementative, infiltrative, klastische) Uranlagerstätten bekannt. In Deutschland waren bisher hydrothermale, zementative und infiltrative Lagerstätten wirtschaftlich bedeutsam.

- Magmatogene U-Lagerstätten sind vor allem an hoch differenzierte saure Magmatite wie Alaskite (Rössing, Namibia) und Alkali-Syenite (Kvanefjeld, Grönland) sowie an Pegmatite (Bancroft, Kanada) gebunden. Typisch für diese Bildungen sind geringe Urangelhalte im Erz bei teilweise sehr großen Erzvorräten. In Magmatiten liegen die Urangelhalte bei 20-400 ppm. In Pegmatiten können sie auch etwas höher sein (bis um 0,1 %), die Erzumfänge sind dafür aber geringer (bis zu einigen hundert Tonnen U).

- Hydrothermogene U-Lagerstätten kommen in unterschiedlichen Ausbildungen vor. In den (höherthermalen) Pneumatolyten sind Urananreicherungen in Skarnen wie die Lagerstätte Mary Kathleen in Australien sowie in „porphyrischen“ Lagerstätten bekannt. Beispiele für eine (je nach Marktlage zeitweilige) Urangewinnung als Nebenprodukt aus „porphyrischen“ Erzen sind die Cu-Lagerstätten Chuquibambilla (Chile) und Bingham (USA). Bei etwas tieferen Temperaturen entstehen die eigentlichen Hydrothermalite. Sie bilden sowohl mehr oder weniger reine Gangerze wie im Erzgebirge als auch diverse stockwerkartige Vererzungen („metasomatische“, „diskordanzgebundene“, „vulkanische“, „metamorphe“, „Brekzien“-Lagerstätten), in denen teilweise ebenfalls Erzgänge auftreten.

- Exogen-geochemische U-Lagerstätten können unterteilt werden in Zementite, in denen das Uran durch (engräumige) Umlagerung angereichert wird, und Infiltrate, in die es durch (weiträumigen) Eintrag gelangt. Eine der größten zementativen U-Lagerstätten der Welt ist das Ronneburger Erzfeld in Thüringen, typische infiltrative Lagerstätten sind Königstein (im Sandstein) und Freital (in Biolithen) in Sachsen.

- Exogen-mechanische U-Lagerstätten sind als Klastite (Seifen) mit Uranmineralen bekannt (Witwatersrand, Südafrika).

Die meisten U-Lagerstätten der Welt entstehen aus bestimmten mit Uran vorangereicherten Sapropeliten und (sauren) Magmatiten. Nach Robert William BOYLE enthalten saure Magmatite (Granite, Rhyolithe) um 4,5 ppm, alkalische Granite und Syenite bis zu 100 ppm und Sapropelite (Schwarzschiefer) sogar bis zu 1000-1200 ppm Uran (BOYLE, S. 23). Phosphorite führen nur selten mehr als 150 ppm Uran.

Dem entsprechend sind auch die besonders reichen Lagerstätten an (U-reiche) Sapropelite gebunden. Das gilt für die extrem reichen (bis 20 % U im Erz) Lagerstätten im südöstlichen Athabasca-Becken in Kanada (Cigar Lake, Key Lake, Eagle Point) – „*Alle Vorkommen sind gebunden an Graphit-führende Metasediment-Horizonte im Basement*“ (LEHMANN, S. 22). – ebenso wie für die größten deutschen Lagerstätten (Ronneburg, Schneeberg-Schlema-Alberoda). Selbst Prototypen magmatogener Lagerstätten wie Rössing (Namibia) scheinen von Sapropeliten beeinflusst worden zu sein. Jedenfalls liegen die besten Vererzungen dort in Alaskitgraniten und zwar in denen, die an den Übergangsbereich der (älteren) Khan- zur (jüngeren) Rössing-Formation gebunden sind. Genau in diesem Grenzbereich sind die einzigen bemerkenswerten Sapropelite („graphite marble“) dieser Formationen anzutreffen.

Schlussfolgerung

Uranlagerstätten sind weltweit auf zwei Haupttypen metallogenetisch signifikanter Metallquellen zurückzuführen: (endogen-magmatische) saure Magmatite und (exogen-sedimentäre) Sapropelite. (U-reiche) Sapropelite sind die Edukte der reichsten U-Lagerstätten der Welt.

3.4.1 Systematisierung der Uranlagerstätten

Im 20. Jahrhundert hat sich die Lagerstättenkunde und mit ihr die Einteilung der Uranlagerstätten weltweit im Wesentlichen in drei Richtungen entwickelt: eine traditionell (man muss schon fast sagen: traditionalistisch) orientierte westeuropäische, eine zentralistisch orientierte sowjetische und eine pragmatisch gewinnorientierte nordamerikanisch-australische Schule.

Am dynamischsten entwickelt sich bis heute die nordamerikanisch-australische Schule. Bei ihr tritt auch die Zweiteilung der Lagerstättenkunde in einen pragmatisch-montangeologischen und einen theoretisch-akademischen Zweig am deutlichsten hervor. Die akademischen Geologen tendieren dazu, genetische Aspekte in die Systematisierung der Lagerstätten zu integrieren, worauf die Vertreter der Montangeologie (economic geology) problemlos verzichten können, solange mit empirischen Methoden noch genügend Lagerstätten gefunden werden. Die Lagerstättentypisierung global agierender Organisationen wie der WNA (World Nuclear Association) folgt aus naheliegenden Gründen dem montangeologischen Hauptstrom (mainstream) und so werden aktuell (2010) folgende Haupttypen (major categories) von Uranlagerstätten unterschieden:

1. Diskordanzgebundene Lagerstätten (Unconformity-related) wie Cigar Lake in Kanada,
2. Brekzien-Lagerstätten (Breccia-type) wie Olympic Dam in Australien,
3. Sandsteingebundene Lagerstätten (Sandstone) wie im Colorado Plateau,
4. Quarzgeröll-Konglomerate (Quartz-Pebble-Conglomerate) wie Witwatersrand,
5. Oberflächen-Lagerstätten (Surficial) wie Yeelirrie in Australien,
6. Ganglagerstätten (Vein-type) wie im Erzgebirge,
7. Vulkanische Lagerstätten (Volcanic-type) wie die Strelzowskaya Caldera in Russland,
8. Intrusive Lagerstätten (Intrusive Type) wie Rössing in Namibia,
9. Metasomatische Lagerstätten (Metasomatic) wie Espinharas in Brasilien,
10. Kollapsbrekzien-Lagerstätten (Collapse Breccia) wie Arizona Strip in den USA,
11. Phosphorit-Lagerstätten wie in Florida, USA,
12. Metamorphe Lagerstätten wie Mary Kathleen in Australien,
13. (Braun-)Kohle-Lagerstätten (Lignite) wie Mulga Rock in Westaustralien,
14. Schwarzschiefer-Lagerstätten (Black Shale) wie Ranstad in Schweden,
15. Meerwasser und Salzseen.

Diese Typisierung folgt im Wesentlichen derjenigen der IAEA (International Atomic Energy Agency) von 1996. In ihr ist unschwer eine nach abnehmendem ökonomischem Wert geordnete Abfolge von Großlagerstätten zu erkennen. Dagegen fehlt ein metallogenetisch fundiertes Prinzip der Typisierung. (Worin unterscheiden sich beispielsweise Brekzien von Kollapsbrekzien genetisch so signifikant, dass sie zwei verschiedenen Typen zugeordnet werden?) Viel mehr werden unserem Zeitgeist entsprechend die ökonomisch bedeutsamsten Lagerstätten der Welt zu Typen erklärt, denen kleinere ähnlich geartete zugeordnet werden. Wer aber nicht erst bei der Planung des Abbaus, sondern schon bei der Suche und Erkundung von Lagerstätten wirtschaftlich denkt, dem müsste auffallen, dass diese geologisch weitgehend empirische Herangehensweise alles andere als effizient ist. Sie birgt nämlich die Gefahr in sich, bestimmte Typen von Lagerstätten zu übersehen und die Suche und Erkundung der anderen nicht hinreichend zu optimieren.

Ein etwas anderes Bild zeigt die auf der sowjetischen Schule basierende Klassifizierung der tschechischen Uranvererzungen, die sechs morphogenetischen Lagerstättentypen zugeordnet werden:

- Typ I: Bruchzonen in graphitisierten Gesteinen des kristallinen Fundaments (Moldanubikum): Hydrothermale Erzkörper gebunden an tektonische Störungszonen mit Graphit und Pyrit, Gang- und Imprägnationserze mit Uraninit UO_2 , Coffinit $U[(SiO_4)_3(OH)_4]$ und Brannerit UTi_2O_6 ,
- Typ II: Erzgänge und -stockwerke in der Geosynkлинаletage (Tepla-Barrandium): Hydrothermale Karbonat-Uraninit-Mineralisationen im Kontaktbereich variszischer Granite,

- Typ III: Chloritisierte Störungszonen in variszischen Granitoiden: metasomatische Uraninit-Coffinit-Brannerit-Erze mit Uranhydroxiden, Uranschwärzen und Uranophan.
- Typ IV: Stratiforme (Uran-)Kohlelager in grauen Ablagerungen des Oberkarbons-Rotliegenden,
- Typ V: Schichtgebundene Uranerze in Konglomeraten und Sandsteinen der (Ober-)Kreide,
- Typ VI: Neogene (Uran-)Kohlelager (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 67-70).

Hier wird immerhin eine metallogenetische Grundeinteilung in endogene Bildungen (Typen I bis III) des Grundgebirges und exogene (Typen IV bis VI) der Molasse und des Deckgebirges sowie eine Aufreihung nach dem Alter der Nebengesteine erkennbar. Ansonsten folgt auch diese Typisierung der seit dem Mittelalter bekannten empirisch-beschreibenden Methode der Einteilung nach stofflichen und strukturellen Merkmalen. Analog zur tschechischen Einteilung basiert auch die – allerdings ältere und deshalb genetisch unreifere – morphologisch-genetische Lagerstättentypisierung der SDAG Wismut auf Lehrmeinungen der sowjetischen Schule. Demnach gibt es:

- „Ganglagerstätten vom erzgebirgischen Typ,
- *polygene Lagerstätten vom Schwarzschiefer Typ im Raum Ronneburg,*
- *hydrogene Lagerstätten in den Bildungen des Tafeldeckgebirges (Typ Königstein und Culmitsch),*
- *Uran-Kohle-Lagerstätten vom Typ Freital sowie*
- *metasomatische Lagerstätten vom Typ Roshna Olschi und Vitkov, die gesucht, jedoch in Sachsen und Thüringen nicht nachgewiesen wurden“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.3.1, S. 6).

Die Wismut GmbH versucht, entsprechend den veränderten politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen (nach 1989) eine Brücke zu bauen zwischen dieser Typisierung und derjenigen der WNA (IAEA), und gliedert die ostdeutschen Uranlagerstätten in:

- Hydrothermale Ganglagerstätten (Typ 6 der WNA),
- Erzstockwerke in paläozoischen Schwarzschiefern (Typ 14),
- Lagerstätten in oberpermischen, triassischen und oberkretazischen Sandsteinen (Typ 3),
- Vorkommen in Tuffen saurer bis intermediärer Vulkanite in NW-Sachsen (Typ 7),
- Lagerstätten in unterpermischen Steinkohlen (Typ 13) (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.3.6, S. 17).

In dieser Typisierung fehlen die genetischen Leitlinien (die metallogenetische Grundeinteilung in endogene und exogene Bildungen sowie die Altersabfolge), die eigentlich schon „Stand der Technik“ sind (zumindest bei den südlichen Nachbarn von Sachsen). Auch lassen die (wenigen verfügbaren) geologischen Unterlagen der Uranvorkommen bei Delitzsch in NW-Sachsen Zweifel an ihrer Deutung als „Vulkanit-Typ“ aufkommen. Harald Dill unterscheidet am Westrand der Böhmisches Masse zwei Typen von Vorkommen nach dem Träger- (host rock) und dem Herkunftsgestein (source rock) des Urans: *“Two principle types of U deposits may be distinguished as to their host rock source relationship. Type I is found within organic matter bearing anchimetamorphosed to low grade regionally metamorphosed Palaeozoic rocks of the Saxothuringian. Type II is typical for medium to low grade regionally metamorphosed rocks and granites of the Saxothuringian and Moldanubian.*

In cases of Type I host rock and source rock are identical. On the other hand fault-bound mineralization of Type II is not restricted to a certain fertile bed but to favourable source rock unit ('Varied Group'). The Type II ore mineralizations are closely related in space and time to the Late Variscan igneous rocks. They have been the mobilizing power. No definite thermal activity may be supposed for Type I ore mineralization“ (DILL, 1986, S. 288). Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Vererzungstypen wird zum Schluss genannt: Typ I bildet sich ohne ein thermale Ereignis (zementativ), Typ II mit thermaler Hilfestellung durch spätvariszische magmatische Gesteine (hydrothermal). Die anderen genannten Unterscheidungskriterien stehen auf wackeligen Füßen. Was am Westrand der Böhmisches Masse für den Typ I noch zutreffen mag – nämlich die „Identität“ des Träger- und des Herkunftsgesteins des Urans – lässt sich nicht problemlos auf das ganze Saxothuringikum extrapolieren. Schon im Ronneburger Erzfeld liegen große Teile der U-Vererzungen nicht in den Schwarzschiefern selbst, sondern in benachbarten Tonschiefern, Kalksteinen und Diabasen. Außerdem gibt es im Saxothuringikum nicht nur paläozoische, sondern auch präkambrische U-Quellen und Nebengesteine der Erze (im östlichen und mittleren Erzgebirge).

Eine (gesamt)deutsche metallogenetische Systematisierung der Uranlagerstätten liegt bisher wohl noch nicht vor.

3.4.2 Vorschlag einer genetischen Klassifikation der Uranvorkommen

Hauptkriterium einer konsequent genetischen Klassifizierung der Erzvorkommen (Tab. 1) ist die **E n e r g i e**, die den Erzbildungsprozess antreibt.

Entsprechend ihren Hauptenergiequellen werden die Uranvorkommen zunächst in endogene und exogene unterteilt. Die Problematik ihrer Abgrenzung wurde (in Abschnitt 3.1) bereits erörtert. Die Hauptklasse der Endogenite unterteilt sich in die Klassen der (aus Schmelzen gebildeten) **Magmatogenite** mit den beiden Gruppen der Einträge der Magmatite und der Umbildungen der Pegmatite sowie der (aus wässrigen Lösungen entstandenen) **Hydrothermogenite** mit den beiden Gruppen der (eingetragenen) Pneumatolyte/Hydrothermalite und der (in situ umgebildeten oder allenfalls engräumig umgelagerten) Metamorphite. Pneumatolyte, die von

englischsprachigen Geologen nicht als eigenständige genetische Gruppe betrachtet werden, entstehen aus überkritischen wässrigen Phasen. Man kann sie (so wie hier) separat betrachten, muss es aber nicht.

Tab. 1: Schema einer (metallo)genetischen Lagerstättenklassifikation

Energieart		Geochemisch			geomechanisch
Energiequelle		Endogenite		Exogenite	
Energie- menge	hoch mittel gering	Magmatogenite	Hydrothermogenite	Chemogenite	Klastogenite
Energie- wirkung, räumlich	Eintrag (fern) Umbildung (nah)	Magmatite Pegmatite	Pneumatolyte/ Hydrothermalite Metamorphite	Infiltrate Zementite	Deponite Klastite

Bei der Hauptklasse der Exogenite können die Klassen der (exogen-geochemischen) **Chemogenite** und der (exogen-mechanischen) **Klastogenite** unterschieden werden. Die Chemogenite werden in die Gruppen der (weiträumig eingetragenen) Infiltrate und der (engräumig umgelagerten) Zementite eingeteilt. Die Klastogenite lassen sich in die Gruppen der mechanischen Einträge der Deponite und Umlagerungen der Klastite unterteilen. Exogene (weiträumige) mechanische Einträge sind wohl nur durch anthropogene Einflüsse realisierbar, weshalb sie hier – in Anspielung auf die von Menschenhand geschaffenen Deponien – Deponite genannt werden. Noch ist diese Gruppe von Vorkommen als Rohstoffquellen für Uran irrelevant.

Die Einteilung in Gruppen kann auch nach dem Kriterium der zeitlichen Energiewirkung vorgenommen werden. Anstelle der (räumlich orientierten) Einträge und Umbildungen sind dann syngenetische (gleichzeitige) und epigenetische (zeitversetzte) Bildungen zu unterscheiden.

Nach dieser Klassifizierung waren in Deutschland bisher folgende Typen von Uranvorkommen wirtschaftlich bedeutsam:

Klasse der Hydrothermogenite

- Zur Gruppe der Hydrothermalite gehören die hydrothermalen Erzgänge und -stockwerke im Grundgebirge. Sie entsprechen den Typen I bis III der tschechischen sowie dem Typ 6 der WNA-Systematik. Hydrothermalite können an präkambrische Nebengesteine (Typ I), an paläozoische nichtgranitische (Typ II) und an Granite (Typ III) gebunden sein. Lagerstätten dieser Art sind im Erzgebirge, im Vogtland und im Schwarzwald abgebaut worden.

Klasse der Chemogenite

- Zur Gruppe der Infiltrate zählen die infiltrativen Erzlager im Übergangs- und Deckgebirge. Sie entsprechen den Typen IV bis VI der tschechischen sowie 3 und 13 der WNA-Systematik. Sie können syngenetisch entstehen und an Biolithe (Kohlen) gebunden sein (Typen IV und VI) oder epigenetisch in (wasserdurchlässigen) Klastiten (Konglomeraten, Sandsteinen) unterschiedlichen Alters (Typ V). Freital-Gittersee ist eine U-Lagerstätte vom Biolithtyp und Königstein eine vom Sandsteintyp.
- Zur Gruppe der Zementite gehören die zementativen Erzstockwerke im Grundgebirge, die annähernd dem Typ 14 der WNA-Systematik entsprechen. In Tschechien fehlt dieser Typ von Lagerstätten. Aus derartigen Lagerstätten wurde bisher nur im Thüringischen Schiefergebirge Uran abgebaut.

Nicht auszuschließen ist die Anwesenheit weiterer Typen von Uranlagerstätten in Deutschland.

3.5 Evolution der Uranvorkommen

Die Erdgeschichte kann bezüglich der Evolution der Uranvorkommen in vier große Abschnitte unterteilt werden:

- In erdgeschichtlich ältester Zeit kam es nicht zur Bildung von U-Lagerstätten.
- Die ältesten Uranvorkommen, die auch die Parameter von Lagerstätten erreichen, entstanden am Ende des Archaikums in **Seifen**. Die etwa 2,8 Milliarden Jahre alten Konglomerate vom Witwatersrand (Südafrika) führen (Th-reiches) Uraninit. In der damaligen reduzierenden (sauerstoffarmen) Atmosphäre konnte Uran in vierwertiger Form als Uraninit mechanisch transportiert und angereichert werden. Erhöhte Thorium-Gehalte im Uraninit weisen auf seine Herkunft aus Granitoiden der zuvor entstandenen kontinentalen Lithosphäre hin.
- Vor etwa 2,4 Mrd. Jahren kam es zur biogenen Anreicherung größerer Mengen freien Sauerstoffs in der Atmosphäre. Seit dem konnte Uran an der Erdoberfläche in großen Mengen oxidiert und somit mobilisiert werden als Voraussetzung für die Bildung chemogener (infiltrativer und zementativer) U-Vorkommen. Die erhöhte Mobilität des Urans (als löslicher Uranyl-Komplex) an der Erdoberfläche führte zum Eintrag größerer Mengen dieses Metalls in die Ozeane. Abgestorbene Biomasse in bestimmten Meeresbecken sorgte zeitlich und räumlich begrenzt für die Entstehung von **Sapropeliten**, die mit ihren reduzierenden Eigenschaften große Teile des im Meerwasser gelösten Urans an sich binden konnten. Diese uranreichen Sapropelite und die

sauerstoffreiche Atmosphäre waren wiederum die Grundvoraussetzungen für die Bildung hydrothermaler Uranvorkommen, unter denen die reichsten U-Lagerstätten der Welt zu finden sind.

- Mit dem Vordringen des Lebens auf die **Kontinente** verlagerte sich auch der Schwerpunkt der Ausbildung von Reduktionsbarrieren seit dem mittleren Paläozoikum auf terrestrische Bereiche. Große Teile des bei der Verwitterung mobilisierten Urans wurden auf den Kontinenten gebunden und konnten so nicht mehr in die Ozeane gelangen. Das hatte zur Folge, dass einerseits (devonische und) jüngere marine Sapropelite uranärmer sind und andererseits neue Typen von U-Vorkommen entstanden wie uranreiche Kohlen.

Im Laufe der geologischen Geschichte wächst die Vielfalt genetischer Typen von Uranvorkommen.

3.6 Metallogenetische Zusammenfassung

Die Metallogene des Urans wird im Wesentlichen von seinen drei geochemischen Leitlinien bestimmt und kann wie folgt zusammengefasst werden:

1. Auf Grund seines lithophilen Charakters und seines inkompatiblen Verhaltens in Gesteinsschmelzen kann sich Uran(-IV) extensiv in sauren Magmatiten und Pneumatolyten anreichern.

Auf diese Weise entstehen die extensiv entwickelten (großräumigen aber relativ schwach angereicherten) U-Vorkommen in sauren Magmatiten wie Graniten und Rhyolithen (U-Vorkommen 1 in Abb. 2). Sie können sich weiterentwickeln zu Pegmatiten (2 in Abb. 2). Dabei reichert sich das (vierwertige) Uran bevorzugt als Spurenelement in anderen akzessorischen Mineralen (Zirkon, Monazit) an, ehe es eigenständige Minerale (Brannerit, Davidit, Uraninit) bildet.

In vierwertiger Form kann sich Uran offenbar auch bei energiereichen hydrothermogenen Prozessen (Pneumatolyte, 3 in Abb. 2) anreichern unter Bildung von Skarnen oder porphyrischen Lagerstätten.

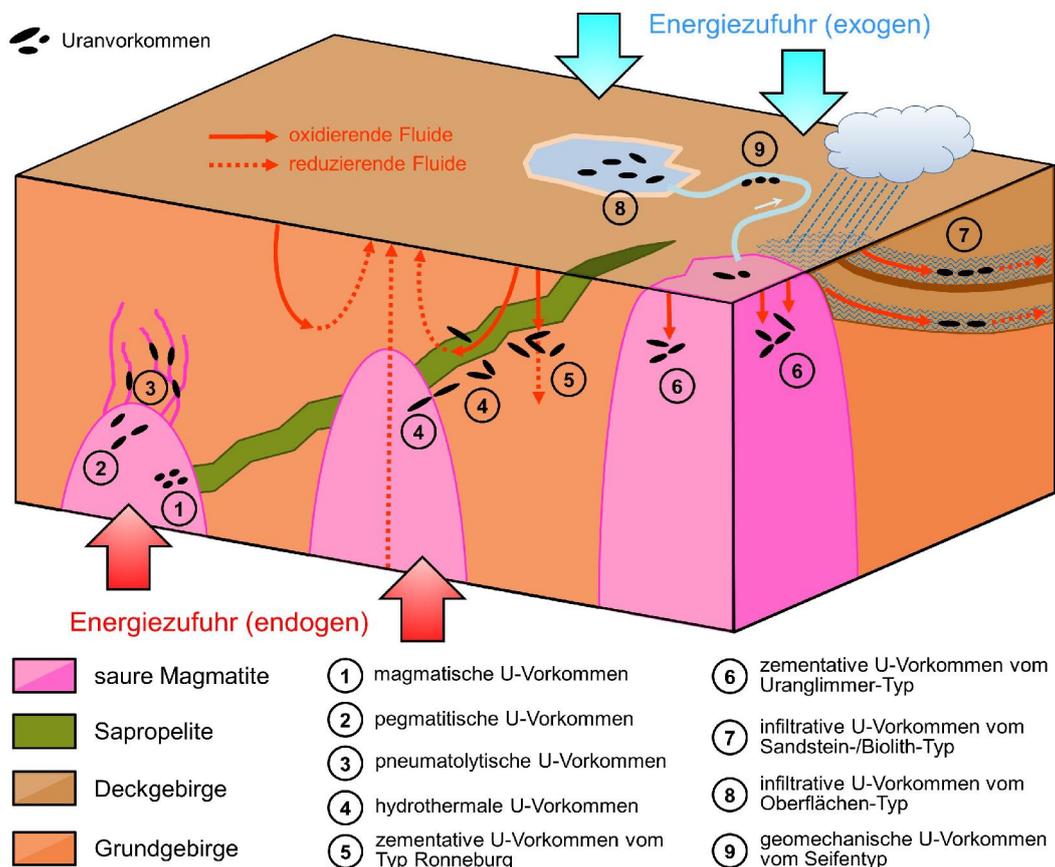


Abb. 2: Schematische Darstellung der Genese endogener und exogener U-Vorkommen

Zeichnung: H. J. Giesen (Eschweiler)

2. Auf Grund der unterschiedlichen Mobilität seiner VI-wertigen (gut löslich) und IV-wertigen Form (schlecht löslich) kann sich Uran in energieärmeren Systemen am Rande von Reduktionszonen (an Reduktionsbarrieren) endogen (hydrothermal) und exogen (zementativ und infiltrativ) anreichern.

Uran geht in oxidierenden Lösungen in den leicht löslichen VI-wertigen Zustand über und migriert als Uranyl-Ion (UO_2^{2+}) bis zu einer Reduktionsbarriere, wo es als IV-wertiges UO_2 (Uraninit, Pechblende, Uranschwärze)

ausfällt. Die wichtigsten geologischen Reduktionsbarrieren und damit Fällungsmittel für gelöstes Uran sind organischer Kohlenstoff (Kohle, Schwarzschiefer) und Sulfidschwefel (Pyrit, sulfidische Fluide). Beide Fällungsmittel kommen in Sapropeliten vor, die entsprechend uranreich sein können. An Reduktionsbarrieren können (endogen-)hydrothermale (4 in Abb.2) sowie (exogen-)zementative (5 in Abb. 2) und infiltrative U-Vorkommen (7 in Abb. 2) entstehen.

3. Auf Grund der geringen Löslichkeit bestimmter Komplexverbindungen kann sich das ansonsten gut lösliche VI-wertige Uran auch in der Oxidationszone (an nichtreduktiven Löslichkeitsbarrieren) anreichern.

Treffen die leicht löslichen Uranyl-Ionen auf bestimmte Anionen wie Phosphat, Arsenat oder Vanadat, so bilden sich feste Phasen wie Autunit, Zeunerit, Torbernit und Carnotit. Es entstehen zementative U-Vorkommen vom Uranglimmer-Typ (6 in Abb. 2). Bei anderweitig hervorgerufener Übersättigung uranyl-haltiger Lösungen etwa durch Wasserentzug (Verdunstung) scheiden sich Minerale wie Schoepit $\text{UO}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Rutherfordin $\text{UO}_2(\text{CO}_3)$, Uranopilit $(\text{UO}_2)_6(\text{SO}_4)(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ab und es bilden sich infiltrative Vererzungen vom Oberflächen-Typ (8 in Abb. 2).

4. An der Erdoberfläche geochemisch hinreichend stabile U-Minerale können sich geomechanisch als Seifen anreichern.

Vor mehr als 2,4 Mrd. Jahren war Uraninit ein gewöhnliches Seifenmineral wie auch Pyrit. In jüngeren Sedimenten hat es kaum noch eine Chance, der Auflösung infolge seiner Oxidation zu entgehen. Dafür können sich andere Uranminerale wie Davidit, Brannerit und Uranothorianit in Seifen (9 in Abb. 2) anreichern.

4. Zur Genese der deutschen Uranlagerstätten

Entsprechend der hier vorgeschlagenen Klassifikation sind in Deutschland zementative U-Lagerstätten vom Ronneburger Typ, infiltrative vom Sandstein- und vom Biolithyp sowie hydrothermale vom Erzgebirgstyp abgebaut worden. Im Folgenden werden wesentliche genetische Aspekte dieser Lagerstättentypen erörtert.

4.1 Zementative Lagerstätten vom Ronneburger Typ

Die größte Uranlagerstätte Deutschlands hat eine erkenntnistheoretisch bewegte Vergangenheit. Davon zeugt auch die „Geschichte der Klassifizierung des Ronneburger Erzfeldes. Die Vertreter der hydrothermalen Schule fanden alle erforderlichen Kriterien für die Einordnung in die Gruppe der hydrothermalen Lagerstätten (RYBALOV), wenn auch vom Stockwerktyp. Ebenso gewichtige Argumente wurden für die Zuordnung in den metamorphsedimentären Lagerstättentyp (GJÖZEVA) gefunden. Die Untersuchungen vor allem der Rolle der Hypergenese bei der Erzkonzentration führten zur Einordnung in die Gruppe der hydrogenen Lagerstätten (ANTROPOV). Aus dieser Vielfalt ergab sich letzten Endes die sicher auch einzig gerechtfertigte Zuordnung zu dem Lagerstättentyp – ‚polygene Lagerstätten vom Schwarzschiefer Typ‘. [Die Unzulänglichkeit dieses Versuchs eines ‚genetischen Kompromisses‘ haben die Autoren wohl erkannt und führen fort:] Die Vielfalt der an der Bildung einer Lagerstätte eines derart mobilen Elementes wie Uran beteiligten Prozesse macht natürlich eine genaue Zuordnung schwer. Andererseits stellt aber die Herausarbeitung einiger weniger aber wesentlicher Gesetzmäßigkeiten der Erzlokalisierung die Grundlage für die Erarbeitung einer Suchstrategie dar“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.3.1, S. 7). Eine Vielzahl eigener und anderer Feldbefunde in dieser Lagerstätte und Erkenntnisse über ihre „Gesetzmäßigkeiten der Erzlokalisierung“ erlauben die Schlussfolgerung, dass es sich beim Ronneburger Erzfeld um eine wesentlich exogene und zwar zementative Lagerstätte handelt. Einige Geologen sprechen bei dieser Lagerstätte auch „vom Schwarzschiefer Typ“. Dieses Merkmal (der Bindung an Schwarzschiefer) ist aber keineswegs nur für zementative Lagerstätten vom Ronneburger Typ, sondern auch für hydrothermale Ganglagerstätten (vom Erzgebirgstyp) charakteristisch, was im Weiteren noch belegt wird. Im Ronneburger Erzfeld wurden diagenetische, metamorphe, hydrothermale und hypergene Mineralbildungen nachgewiesen. Sie waren mit unterschiedlicher Intensität an der Erzbildung beteiligt. Die „Chronik der Wismut“ fasst den aktuellen Kenntnisstand über die Genese der Lagerstätte so zusammen: „Die Regionalmetamorphose durch die varistische Orogenese ist nur schwach ausgeprägt und entspricht der Grünschieferfacies. Die intensivsten Umwandlungen sind **supergene** Veränderungen, die nach der Auffaltung und Hebung des Gebietes im Rotliegenden einsetzen und zur Herausbildung einer Oxidations- und einer Zementationszone führten. Die Morphologie der Oxidationszone wird durch die Migrationswege des sauerstoffreichen infiltrierenden Wassers bestimmt und bildet nur in Erdoberflächennähe einen zusammenhängenden Bereich. In den südlichen und zentralen Teilen der Lagerstätte ist dieser jedoch teilweise oder ganz erodiert.

Die Oxidationszone zeichnet den strukturellen Bau der Lagerstätte nach, ist stark verzweigt und aufgetrümert. An Störungen erstrecken sich Verwitterungsaureolen zungenförmig bis in Teufen von 1.000 m und unterwandern z.T. die Zementationszone.

Makroskopisch ist sie durch Rotfärbung im Ergebnis der Oxidation der Sulfide zu erkennen. Weitere Merkmale sind Umwandlung von Augit, Chlorit und Ilmenit zu Hellglimmer und Kaolinit, die Auslaugung des Karbonats aus den silurischen Kalken und die Veränderungen der Spurenelementgehalte. Uran wird aus den silurischen Schwarzschiefern weggeführt und in der Zementationszone in anderen Gesteinen angereichert. Der mittlere Urangelalt in den Unteren Graptolithenschiefern fällt von 40–60 ppm im unveränderten Gestein auf ca. 15 ppm im oxidierten Bereich“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.14.0.2, S. 11 f.).

Ein weiterer die Bildung dieser Lagerstätte begünstigender Faktor ist die tektonisch (durch Überschiebungen) bedingte Erhöhung der scheinbaren Mächtigkeit der Unteren Graptolithenschiefer (S₁ in Abb. 2) als Uranlieferanten. Dadurch erhöhte sich das metallogenetische Uranangebot im Erzbildungsraum wesentlich.

„Gesetzmäßigkeiten der Verteilung der Uranvererzung in der Lagerstätte:

- Flächenhaft wird die bauwürdige Uranvererzung durch die Verbreitung der Unteren Graptolithenschiefer in Verbindung mit einer über die gesamte Mächtigkeit ausgebildeten Oxidationszone begrenzt.
- Die überwiegende Anzahl der Bilanzerzintervalle (85 %) liegt in einer Entfernung zwischen 0–30 m zur nächstliegende Grenze der Unteren Graptolithenschiefer.
- Der Hauptteil der Uranvererzung liegt in den Unteren Graptolithenschiefern sowie in den unmittelbar angrenzenden Gesteinen.

Lederschiefer	40 %	Untere Graptolithenschiefer	12 %
Ockerkalkgruppe	16 %	Obere Graptolithenschiefer	1 %
Kalktonschiefer	10 %	Diabase	21 %

Tabelle (...): Verteilung der Uranvererzung auf die Wirtsgesteine [im Ronneburger Erzfeld].

- Die obere Grenze der abbauwürdigen Uranvererzung wird durch die Untergrenze der Oxidationszone bestimmt und umfaßt einen Bereich von 50–350 m unterhalb dieser. Bedingt durch die Erosion der Oxidationszone infolge tektonischer Hebungen im Südteil der Lagerstätte und durch das allgemeine Abtauchen der Faltenachsen nach NE hat die Uranvererzung eine vertikale Erstreckung von der Tagesoberfläche im Südteil bis zu 1.200 m Teufe im NE-Teil (...).

- Die **Uranschüttung** in den einzelnen Erkundungsrevieren der Lagerstätte schwankt zwischen 15–210 Gramm Uran pro Kubikmeter Lagerstättenvolumen.

Die höchste Uranschüttung wird in dem tektonisch am stärksten beanspruchten sog. Zentralteil der Lagerstätte erreicht, in dem bei 25 % Flächenanteil 56 % der Uranressourcen der Lagerstätte konzentriert waren. Zu den Flanken der Lagerstätte hin nimmt die Uranschüttung deutlich ab“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.14.0.2, S. 21).

Ein typisches Merkmal für die hypergenen Uranerzparagenesen im Ronneburger Erzfeld „ist das völlige Fehlen von Gangarten“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.14.0.2, S. 14).

Sowohl im großen als auch im kleinen Maßstab ergibt sich insgesamt ein ziemlich klares Bild einer zumindest überwiegend zementativen Genese der U-Vererzung im Ronneburger Erzfeld.

Bei dieser Dominanz der zementativen Erzbildungsprozesse stellt sich die Frage, welche Rolle dort zweifelsfrei ebenfalls auftretende hydrothermale Bildungen spielen. Zunächst ist festzustellen, dass unter den Erzmineralen generell Pyrit, Markasit und Uranoxide dominieren. Alle anderen Erzminerale kommen nur selten vor. Die meisten der weit verbreiteten Eisendisulfide und Uranoxide sind aber nicht hydrothermal entstanden.

Eine zweifelsfrei hydrothermale, übermannshohe Quarz-Sulfid-Kristalldruse im Diabas an der Lichtenberger Störungszone war auf der 180 m-Sohle des Bergbaubetriebs Reust angefahren worden. Diese Fahlerz-Paragenese war nicht nur fachlich eine Offenbarung, sondern auch ästhetisch ein überwältigender Anblick. Das Fehlen von Uranmineralen in dieser hydrothermalen Bildung unterstreicht ebenso wie die geringe Anzahl und die begrenzte Verbreitung solcher Mineralisationen insgesamt die untergeordnete Rolle der hydrothermalen Prozesse bei der Uranerzbildung im Vergleich zur Hypergenese. Dieses Bild passt zu der Modellvorstellung, nach der vor allem im Kern des Ronneburger Erzfeldes (hydrothermale) Wärmeströme aufstiegen, deren Fluide ihrer Herkunft entsprechend ein niedriges Redoxpotential aufwiesen. So kam es in den zentralen und tiefen Teilen der hydrothermalen Aufstiegsbahnen zur Bildung von sulfidischen Mineralparagenesen (ohne U-Mineralen). In den peripheren und oberflächennahen Bereichen konnten sich die aufsteigenden reduzierenden Hydrothermen mit den oxidierenden meteorischen Wässern mischen und zusätzlich U-Mineralen bilden, wenn letztere Lösungen zuvor hinreichenden Kontakt zu untersilurischen Kieselschiefern hatten, um sich mit Uran anzureichern.

Bleibt noch die Frage nach dem Einfluss metamorpher Prozesse auf die Erzbildung im Ronneburger Erzfeld. Die variszische Regionalmetamorphose ist zwar großräumig aber nur schwach ausgeprägt. Gegen signifikante Anreicherungen von Uran durch metamorphe Prozesse sprechen die zeitliche Lücke zwischen der

Metamorphose und der Erzbildung, die Abwesenheit von U-Vererzungen in vielen metamorph überprägten Schwarzschiefern innerhalb und außerhalb des Ronneburger Erzfeldes sowie das Fehlen eines hinreichend hohen (metamorph induzierten) Redoxpotentialgefälles, das in der Lage wäre, große Uranmengen zu mobilisieren und umzulagern. Die Regionalmetamorphose allein ist wohl generell auch weltweit nicht dazu in der Lage, das Oxidationspotential so zu erhöhen, dass Uran signifikant mobilisiert wird. Insofern stellt sich die Frage, ob es überhaupt U-Vorkommen gibt, deren metallogenetischer Hauptprozess die Metamorphose war. Jedenfalls sind die sogenannten „metamorphen U-Lagerstätten“ (Typ 12 der WNA) nach den hier verwendeten genetischen Kriterien entweder hydrothermogene Bildungen wie die an Skarne gebundene Typlagerstätte Mary Kathleen (Australien), die von australischen Geologen als „*scarn-hosted metamorphic-hydrothermal deposit*“ (MCKAY & MIEZITIS, S. 132) bezeichnet wird, oder (metamorphosierte) synsedimentäre Infiltrate (mit klastischen Anteilen oder ohne) wie die andere Typlagerstätte Forstau (Österreich). Ähnlich wie im Ronneburger Erzfeld sind in Forstau metamorphe U-Erzumbildungen zwar nachweisbar, sie spielen aber nicht die metallogenetische Hauptrolle. Die ältesten U-Anreicherungen in Forstau sind an Sapropelite gebunden und die mengenmäßig überwiegenden an hydrothermale Erzgänge.

Ähnliche Wandlungen bei der Deutung seiner Entstehung – wie das Ronneburger Erzfeld – hat auch das wesentlich kleinere, aber genetisch analoge Vorkommen von Dittrichshütte durchlaufen: *„Die unter dem Aspekt hydrothormaler Gänge erkundete Lagerstätte wurde als sedimentäre Infiltrationslagerstätte geschlossen. In genetischer Hinsicht kann die Lagerstätte Dittrichshütte unter der notwendigen Würdigung unterschiedlicher Parameter und der anderen geologisch-strukturellen Positionen mit den Uranlagerstätten des Ronneburger Erzfeldes verglichen werden“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.12.1, S. 10). Es handelt sich hierbei also weder um eine hydrothermale, noch um eine infiltrative, sondern um eine zementative Bildung.

„Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Uranvererzung der Lagerstätte einer starken tektonischen, lithologischen und hypogenetischen Kontrolle unterlag“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.12.1, S. 10).

Schlussfolgerungen

- Die zementativen Uranlagerstätten vom Ronneburger Typ entstehen unter besonderen Bedingungen. Zu ihrer Entstehung bedarf es (1.) der Anwesenheit hinreichender Mengen uranreicher Schwarzschiefer, die (2.) tektonisch „vorbereitet“ (überschoben, steilgestellt, frakturiert) werden, (3.) einer intensiven Verwitterung bei langsamer Hebung ausgesetzt sind (gern auch mehrmals) und (4.) danach geologisch weitgehend konserviert werden.
- Die zementative Anreicherung des synsedimentären Schwarzschieferurans verlief im Ronneburger Erzfeld so effizient wie an kaum einer anderen Stelle in der Welt. Kleinere Vorkommen dieser Art sind auch anderenorts im Saxothuringikum bekannt und im Verbreitungsgebiet altpaläozoischer und proterozoischer Sapropelite zu erwarten.
- Die Zementation bei der Verwitterung als Haupterzbildungsprozess ist der wesentliche genetische Unterschied zu den Schwarzschiefer-Lagerstätten („Black shale deposits“) der Systematik der IAEA, deren Entwicklung mit der syngenetischen Urananreicherung endet (AUTORENTEAM, 2009, S. 61). Das Ronneburger Erzfeld ist so gesehen also keine Schwarzschiefer-Lagerstätte im Sinne der IAEA, da die (unveränderten) Sapropelite hier nicht die Parameter von U-Erzen erreichen.
- Die zementativen Uranlagerstätten vom Ronneburger Typ blieben offensichtlich unbeeinflusst von Graniten und unterstreichen dadurch in besonderer Weise die Bedeutung der Schwarzschiefer (gegenüber den Magmatiten) als Uranlieferanten.

4.2 Infiltrative Lagerstätten vom Sandsteintyp

Charakteristische Merkmale der U-Vererzungen dieses Typs sind ihre Bindung an wasserdurchlässige (psephitisch-psammitische) Sedimentschichten meist in artesischen Beckenstrukturen und ihre epigenetischen infiltrativen Einträge von Uran, das sich an Reduktionsbarrieren abscheidet.

Eine mit dem Prototyp vom Colorado-Plateau in vieler Hinsicht vergleichbare Lagerstätte ist Königstein in Sachsen. Die U-Vererzung ist dort an drei übereinander liegende Sandsteinhorizonte (Grundwasserleiter) gebunden, die durch pelitische Wasserstauer hydraulisch voneinander getrennt sind. Die Befunde von Helmut Tonndorf (2000) zur Genese der Lagerstätte lassen auf den *„Beginn der Herausbildung des 3. Erzhorizontes [in Erosionsrinnen an der Basis der diskordant auflagernden cenomanen Sedimentite] durch exo-diagenetische Infiltration des Urans etwa gleichzeitig mit der synsedimentären Polymetallanomalie schließen. Erst später bildeten sich, z. T. auf der stofflichen Grundlage des 3. Horizontes, durch epigenetische Infiltration und unter zeitweiliger Einflußnahme des tertiären Vulkanismus, die beiden oberen Erzhorizonte heraus. Zuletzt entwickelten sich die Klüftungserze“* (TONNDORF, S. 10).

Die Lagerstätte entstand also in drei Vererzungsetappen: Zuerst (1.) bildete sich im unteren, terrestrisch entwickelten Erzhorizont eine genetisch etwas komplexere „polymetallische synsedimentäre Basisanomalie“. Sie wurde dann (2.) teilweise von infiltrativen U-Einträgen als Haupterzbildungsprozess überprägt, die auch die beiden oberen Erzhorizonte entstehen ließ. Danach bildeten sich (3.) die zementativen Klüfterze.

Helmut Tonndorf unterteilt die erste Etappe der Bildung der Lagerstätte Königstein zusammenfassend in „Elementanreicherungen mit Seifencharakter in den rotbunten Basissedimenten“ und „syngenetische Anreicherungen von U, Th, Sn, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Mo, Ag und SE in den Flußauen- und See-Sumpfablagerungen“ (TONNDORF, S. 170). Genetisch verbergen sich dahinter also eine Seife und ein Infiltrat. Erhärtet wird die Annahme der Seifenbildung durch Untersuchungsergebnisse im benachbarten Böhmisches Becken, wo Erzanreicherungen in stratigraphisch äquivalenten Niveaus mineralogisch spezifiziert worden sind. In cenomanen Paläoseifen finden sich dort die Erzminerale Ilmenit, Sphen, Rutil, Titanomagnetit, Leukoxen, Zirkon, Malakon, U-Titanate (Davidit, Brannerit), Uranthorit, Magnetit, Monazit, Xenotim, Anatas, Brookit, Gold, Zinnstein (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 237).

Für die schichtlinsenförmige Vererzung wird ein absolutes Alter von 74 Mio. Jahren angegeben, für die Klüfterze 24 Mio. Jahre (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.11, S. 23). Der Sedimentation und Infiltration in der Oberkreide folgte also eine teilweise (zementative) Umlagerung des Urans im Tertiär.

Die Herkunft des Urans in dieser Lagerstätte wurde eingehend untersucht: „*Quellen des Urans sind sicher die Markersbacher Granite und Quarzporphyre, die durch erhöhte Urangelhalte (drei- bis fünfmal mehr als im Quarz) und durch hinreichend hohe Beweglichkeit des Urans (bis 32 % mobiles Uran) gekennzeichnet sind. Für diese Annahme sprechen auch die Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen (...), die darauf hindeuten, daß die sauerstoffhaltigen Wässer in der Pirnaer Paläodepression hauptsächlich vom Markersbacher Granitmassiv herrühren*“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.11, S. 22).

Geringfügig beeinflusst wurden die U-Vererzungen auch vom tertiären Vulkanismus, der lokal Wärmeenergie zugeführt und neue hydraulische Verbindungen geschaffen hat. Stofflich hat der Vulkanismus das Uranangebot aber nicht erweitert, zumal die an zersetzte Vulkanite und ihre Nebengesteine gebundenen Erzkörper „eindeutig jünger als der Basalt“ (TONNDORF, S. 159) sind.

4.3 Infiltrative Lagerstätten vom Biolithtyp

Charakteristische Merkmale der U-Vererzungen dieses Typs sind ihre Bindung an kohlige Substanzen (Kohle, Sapropelite) und ihre syngenetischen U-Einträge, die sich an Reduktionsbarrieren der Organik abscheiden. Insbesondere die Kohlesümpfe im kontinentalen Milieu (aber auch die sapropelitischen marinen Sedimente) zeichnen sich durch hohe Reduktionskapazitäten und Gradienten des Redoxpotentials am Übergang vom oxidierenden (atmosphärischen oder marinen) Bereich zum reduzierenden aus. Beides sorgt in der Summe für eine effiziente Fällung von Uran.

Ein Vertreter des (kontinentalen) Biolithtyps ist die Lagerstätte Freital-Gittersee in Sachsen. „*Die Uranvererzung im Bereich der Lagerstätte Freital ist im wesentlichen an Steinkohlen, Brandschiefer und kohligen Schluffsteinen der Döhlener Schichten, sehr sporadisch aber auch an farbige Arkosen in ihrem Liegenden gebunden*“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.10, S. 5). Die Döhlener Schichten sind der zweite von vier sedimentären Megazyklen im Döhlener Becken. Geochronologisch werden sie ins Rotliegende gestellt. „*Die Herkunft des Urans wird von NEKRASOVA (1969) mit uranführenden Lösungen in Verbindung gebracht, die aus den Bereichen der zur Zeit des Unterrotliegenden in Verwitterung stehenden Monzonite des Meißener Granitoidmassives in das Moor eingetragen worden sind. Für die Monzonite wurden Urangelhalte zwischen 7,7 g/t bis 11,6 g/t (Clarke-Gehalte von Granit etwa 4 g/t) festgestellt.*

REICHEL (1970) betrachtet die porphyrischen Gesteine des Tharandter Waldes sowie den Potschappel-Wilsdruffer Porphyrit als potentielle Spurenelementlieferanten“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.10, S. 13).

„*Anzeichen auf eine hydrothermale Erzzufuhr aus dem präpermischen Fundament konnten nicht nachgewiesen werden*“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.10, S. 14). Nach gegenwärtigem Kenntnisstand sind nur die Kohlen (der Flöze und Schiefer) syngenetisch mit Uran vererzt worden. Die (kohlfreien) Arkosen wurden epigenetisch mit Uran aus den Kohlen mineralisiert. Es handelt sich bei den „Uran-Kohlen“ also um exogen-syngenetische Bildungen, die sich teilweise epigenetisch weiterentwickelt haben.

Metallogenetisch ähnlich entstanden sind wohl auch die „Aktiv-Kohlen“ im Stockheimer Becken (Thüringisch-Fränkisches Schiefergebirge) und im Weidener Becken (am Oberpfälzer Wald).

4.4 Hydrothermale Ganglagerstätten vom Erzgebirgstyp

Hydrothermale U-Gangmineralisationen sind im Erzgebirge, Vogtland, Fichtelgebirge, Oberpfälzer und Bayerischen Wald sowie im Schwarzwald bekannt. Am stärksten entwickelt und am deutlichsten ausgeprägt sind sie im Westerzgebirge. Nach Südwesten (Vogtland) verringert sich ihre Verbreitung und Intensität ebenso wie nach Nordosten (Mittel- und Osterzgebirge). Die Ursachen der Verteilung dieser Uranvererzung (in Sachsen) waren bisher weitgehend unklar (BAUMANN et al., S. 80 f.). Das hier vorgeschlagene genetische Modell gibt auch zu diesem Problem eine Erklärung. Näheres dazu folgt weiter unten (Abschnitt 4.6).

Im Westerzgebirge wird die hydrothermale Mineralisationsabfolge in den U-Lagerstätten nach der Nomenklatur der SDAG Wismut zu folgenden Paragenesen zusammengefasst:

„- Gänge der **Quarz-Formation (q-F.)** sind vor allem im inneren Kontakthof ausgebildet und führen neben Quarz Fluorit sowie Wolframit, Scheelit und Kassiterit. (...)

- **Quarz-Sulfid-Gänge (kb-F.)** spielten im NW-Kontakt des Gleesberg-Granites (Grube König David u.a.) in einer Cu-betonten Abfolge mit Bornit und in der Lagerstätte Niederschlema-Alberoda zeitweise mit dem Abbau von Blei-, Zink- und Kupfersulfiden eine Rolle.
- die Gänge der **Kammquarz-Kalzit-Pechblende-Formation (kku-F.)** verkörpern die älteste, die primäre uranföhrnde Gangformation. Durch Isotopenbestimmung ist für ihre Pechblende ein Alter von 275 Mio Jahren ermittelt worden. Neben den namensgebenden Mineralen treten Fluorit, Coffinit, Sulfide und Hämatit auf. (...)
- die **Magnesiumkarbonat-Stinkspat-Pechblende-Formation (mgu-F.)** ist durch das Auftreten von Dolomit (der häufig Kalzit der kku-F. verdrängt), korrodierter und umgelagerter Pechblende sowie von dunklem Fluorit (Stinkspat/Antozonit) und Seleniden (vor allem Clausthalit) gekennzeichnet. Die mgu-Bildungen sind i. d. R. als Teleskopung auf älteren, meist kku-Gängen zu finden.
- die **Wismut-Kobalt-Nickel-Formation (biconi-F.)** enthält Co-, Ni- und Fe-Arsenide (Skutterudite, Smalitin, Safflorit, Rammelsbergit, Löllingit u.a.), gediegenen Arsen, Silber und Wismut sowie korrodierte und umgelagerte Pechblende in Karbonaten (Parankerit, Siderit), Quarz und Baryt. Bildungen dieser Formation kommen auf selbständigen Gängen, oft aber auch auf älteren Gängen vor (Teleskopung).
- die **Silber-Sulfid-Formation (ags-F.)** mit gediegenem Arsen und Silber, Sulfiden, Sulfosalzen, Kalzit und Quarz zeigte sich meist auf biconi-Gängen und bildete mit dieser Formation die Grundlage des historischen Schneeberger Bergbaus.
- der **Kalzit-Formation (k-F.)** werden fast monomineralische Kalzitgänge und -trümer mit wenig Sulfiden zugerechnet.
- die **Eisen-Mangan-Formation (Fe-Mn-F.)** ist auf regenerierten Bruchstörungen im südwestlichen und mittleren Teil des Erzfeldes ausgebildet“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.2.1, S. 8 ff.).

Das absolute Alter der einzelnen hydrothermalen (U-)Paragenesen ist noch weitgehend unklar. Dieses Thema wird von Ullrich Lipp ausführlich erörtert. Er kommt zu dem Schluss, „dass eine exakte Grenzziehung zwischen dem variszischen und postvariszischen Mineralisationszyklus anhand des relativen und des absoluten Alters der betrachteten Gangformation [„kku“] noch nicht möglich ist“ (LIPP, S. 98). Für den Autor (Lipp) endet der erste (spätvariszische) Mineralisationszyklus nach der „kb“-Formation und der zweite (postvariszische) beginnt mit der „kku“-Formation. Den zweiten Zyklus unterteilt er in einen saxonischen und einen alpidischen Subzyklus. Einige Autoren glauben, ein unterpermisches Alter (270-275 Ma) der ältesten U-Paragenese – der „kku“-Formation – als gesichert betrachten zu können. Die mgu-Formation wird von ihnen als jurassisch (155-158 Ma) und die biconi-Formation als kretazisch (um 120 Ma) eingestuft (HILLER & SCHUPPAN, S. 60). Bekannt sind auch jüngere Pechblendeumlagerungen bis ins Tertiär (16-7 Ma) hinein (HILLER & SCHUPPAN, S. 59). Aus den Mineralparagenesen geht in Übereinstimmung mit Daten allgemeiner Altersbestimmungen jedenfalls hervor, dass die „kku“-Formation (der Wismut, die nach der Freiburger Nomenklatur Uran-Quarz-Karbonat-Assoziation – „uqk“ – bezeichnet wird), „die eigentliche primäre Uranparagenese des Erzgebirges“ (BAUMANN et al., S. 80) ist. „Alle jüngeren Pechblende-Generationen stellen Mobilisate aus der kku-Formation dar“ (HILLER & SCHUPPAN, S. 60). Zu dieser Gruppe der ältesten hydrothermalen U-Mineralisationen gehören offenbar auch analoge Bildungen in anderen Teilen Deutschlands. Darüber hinaus sind sich neuerdings die meisten Autoren einig darüber, dass zwischen der Intrusion der jüngsten Erzgebirgsgranite und der Bildung der ältesten Uranerzgänge („kku“) ein Hiatus bestand, der bei 30 Millionen Jahren (HILLER & SCHUPPAN, S. 59) lag. Aber auch das Uran der „kku“-Formation „fiel nicht vom Himmel“, wie das ein Autor (SEBASTIAN, S. 131) ausgedrückt hat. Es stammt (räumlich und genetisch naheliegend) im Wesentlichen aus Schwarzschiefern, ist also in gewissem Sinne auch „nur“ ein Mobilisat.

Am Westrand der Böhmisches Masse (Nordost-Bayern) unterscheidet Harald Dill zwei Hauptparagenesen von U-Erzmineralisationen: „Two different types of ore mineralization may be established. The 'polymetallic U paragenesis' (U occurs in single oxides with variable sulfides, arsenides, selenides of Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Bi, and native elements) is assumed to be genetically connected with the granitic activity itself and its post-magmatic phenomena. The 'monotonous U paragenesis' shows a great variability in U bonding (U titanates, U oxides, U-Ti silicates), pyrite is the only sulfide. Though belonging to the Late Variscan thermal activity, it is probably more akin to the rift processes which started during Late Variscan. Triassic to Jurassic redeposition is proved by age datings“ (DILL, 1986, S. 288). An anderer Stelle (DILL & KOLB, S. 261) heißt es, dass die „polymetallische Paragenese“ gewöhnlich auch (kristallines) Hämatit führt (DILL & KOLB, S. 269 f.). Nach den vorliegenden Beschreibungen scheint kein signifikanter Altersunterschied zwischen diesen beiden Paragenesen zu bestehen. Sie sind wohl beide (spät-)variszisch entstanden und lassen sich zeitlich mit der „kku“ des Erzgebirges parallelisieren. Die stofflichen Besonderheiten sind offenbar – außer durch das geochemisch differenzierte Inventar der Nebengesteine – vor allem durch unterschiedliche Bildungstemperaturen erklärbar: Die „polymetallische Paragenese“ entstand bei tieferen Temperaturen als die „monotone“. Die höherthermale „monotone Paragenese“ ist eine typische Bildung des Moldanubikums. U-Ti-Mineralien wie Brannerit und Davidit gehören dort in vielen Lagerstätten zum üblichen Inventar der U-Erze (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 67 ff.) und sie kommen auch am Westrand der Böhmisches Masse vor (DILL & KOLB, S. 288).

Die nordostbayerische „polymetallische Paragenese“ erscheint stofflich wie eine „Zusammenfassung“ („kku“ + „mgu“ + „biconi“) der hydrothermalen Uranerz-Mineralisationen des Erzgebirges. Dabei könnten die stofflichen Analogien zwischen den Seleniden der „polymetallischen Paragenese“ und denen der (selenidreichen) „mgu“- oder „dse“-Formation des Erzgebirges sowie zwischen der Element-Assoziation „Ni, Co, Bi“ in der „polymetallischen Paragenese“ und in der „biconi“-Formation auf eine Art von „Teleskopieren“ innerhalb der „polymetallischen Paragenese“ hinweisen. So wären auch spätere Umlagerungen („Triassic to Jurassic redeposition“) in den U-Mineralisationen erklärbar.

Die vorliegenden Befunde ordnen sich in die Modellvorstellung ein, dass an den großen metallogenetischen Aktivierungsetappen (variszische, kimmerische, alpidische, ...) jeweils mehrere, tendenziell schwächer werdende energetische Impulse beteiligt waren, die spezifische hydrothermale Bildungen hervorgebracht haben. Grundvoraussetzung für die hydrothermale Uranerzbildung ist die Beteiligung von Lösungen mit hinreichend hohen Oxidationspotentialen. Die Neubildung von Uranerzen („kku“) durch hydrothermale Prozesse erfolgt darüber hinaus stets in Anwesenheit von (U-reichen) Sapropeliten. So erklärt sich auch die regelmäßige räumliche Bindung hydrothermalen U-Vererzungen an größere tektonische Störungszonen, über die oxidische Lösungen von der Erdoberfläche zu den Sapropeliten gelangen können, aus denen sie das Uran mobilisieren. Die Abscheidung der Uranerze erfolgt beim Kontakt der U-führenden Lösungen mit einer Reduktionsbarriere (organischer Kohlenstoff, Pyrit, sulfidische Hydrothermen, ...).

„Die mächtigeren, aushaltenden Gänge der mgu-Formation nahmen mit Zunahme der Teufe ab, während die geringmächtigen, granitnahen Gänge der kku-Formation mit steigender Teufe zunahmen“

(AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.4.6.1, S. 1). Dieser Befund passt zu der Vorstellung, dass „kku“-Gänge etwas energiereichere (Temperatur, Druck) Bildungen sind als „mgu“- (und „biconi“-)Gänge.

„Die von der ‚SDAG Wismut‘ abgebauten Uranerzgänge (uqk- und ‚BiCoNi‘-Formation) waren besonders in den oberproterozoischen und altpaläozoischen Metamorphiten verbreitet. Bemerkenswert ist dabei eine gewisse lithologische Kontrolle der U-Ausscheidungen:

- in den oberproterozoischen Metaschwarzschiefern und Metabasiten des Mittleren Erzgebirges (Distrikt Annaberg, Bärenstein-Niederschlag, Marienberg) sowie

- in den kambroordovizischen und silurischen kohlenstoffhaltigen Schieferen und Quarziten einschließlich den devonischen Diabasen im Westerzgebirge-Vogtland (Distrikt Schneeberg-Schlema-Aue, Johannegeorgenstadt, Jachymov/ČR, Pöhla und Zobes-Bergen)“ (BAUMANN et al., S. 81 f.). Die erzkontrollierende Bedeutung der Sapropelite für die Fällung von Uranerzen ist also schon länger bekannt, ihre Funktion als Erzlieferanten aber offenbar noch nicht.

„Während in vielen erzgebirgischen Ganglagerstätten, besonders aber in denen des historischen Bergbaus, die Wismut-Kobalt-Nickelformation (biconi) auch Hauptträger der Uranvererzung war, besaßen in den großen Uranerzlagerstätten, wie Oberschlema und Niederschlema-Alberoda, die Kammquarz-Kalzit-Pechblende-Formation (kku) und die Magnesiumkarbonat-Pechblende-Stinkspat-Formation (mgu) überragende Bedeutung für die Uranerzgewinnung“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.4.6.1, S. 1). Hinter dieser empirischen Beobachtung verbirgt sich keine objektive geologische Gesetzmäßigkeit, sondern ein subjektiver Eindruck, der vor allem dadurch entsteht, dass die Alten keine Pechblende gesucht und abgebaut haben. Die Anwesenheit von Pechblende war für erfahrene Bergleute seinerzeit sogar eher ein Grund, die Arbeiten einzustellen oder gar nicht erst anzufangen, zeigte sie doch das (bevorstehende) Ende der vor allem gesuchten Silberanbrüche an.

4.5 Hydrothermale Lagerstätten in Graniten

Von besonderer genetischer Bedeutung unter den hydrothermalen U-Vorkommen sind solche in Graniten ohne (auf den ersten Blick) erkennbare Verbindung zu Schwarzschiefern. Zu den größeren U-Gangvererzungen im Granit gehören die Vorkommen Gottesberg und Bergen im Vogtland sowie Krunkelbach im Schwarzwald. Sie (und einige weitere Vorkommen) scheinen die Schwachstelle des genetischen Konzeptes der Uranherkunft aus Sapropeliten zu sein und die Hypothese von den Graniten als Uranquelle zu erhärten. Deshalb wird ihre Genese im Folgenden etwas genauer betrachtet.

*„Die Lagerstätte **Gottesberg-Grummetstock** liegt vollständig im Eibenstocker Granitmassiv, etwa 1,5–4 km vom südwestlichen Kontakt zur Schieferhülle entfernt (...). Sie befindet sich im Kreuzungsbereich der herzyn streichenden Gottesberger Störung und der äquatorial streichenden Silberbach-Störung.*

Im Kreuzungsbereich der beiden Störungen ist der Eibenstocker Granit intensiv vergreist“

(AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.6.4, S. 2). Die Uranvererzung ist bevorzugt an das jüngere, herzyne Gangsystem gebunden. Das äquatoriale System führt nur im Kreuzungsbereich mit dem herzynen U-Erze (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.6.4, S. 2).

„Das hochthermale Stadium ist durch eine Quarz-Wolframit-Paragenese auf den Gängen des erzgebirgischen Systems [NO-SW] und durch eine Quarz-Kassiterit-Paragenese auf den Gängen des herzynen Systems [NW-SO] vertreten. (...)

Das mittelthermale Stadium kann in eine Quarz-Pechblende-Abfolge und in eine Quarz-Sulfid-Abfolge unterteilt werden.

Die erstere besteht aus Fluorit, Kammquarz in Verwachsung mit Hämatit und kolloidaler, traubig-nieriger Pechblende.

Die zweite, von der ersten durch tektonische Bewegungen getrennte Abfolge setzt sich aus feinkörnigem braunem Quarz, Eisen-, Kupfer-, Blei- und Zinksulfiden sowie umgelagerter Pechblende aus der ersten Abfolge zusammen.

Typisch für die hydrothermale Mineralisation in der Lagerstätte ist das völlige Fehlen von Baryt, Kobalt- und Nickel-Arseniden, gediegen Wismut, Arsen und Silber.

In der Lagerstätte ist eine Oxydationszone ausgebildet, die auf einigen Gängen über die gesamte fallende Erstreckung zu verfolgen ist, während in anderen bereits an der Tagesoberfläche Pechblende angetroffen wurde. Supergene Mineralbildungen sind Eisenhydroxyde, Uranschwärze, Uranglimmer, Gummit u.a. sekundäre Uranminerale“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.6.4, S. 3 f.).

Die Lagerstätte Gottesberg-Grummetstock liegt in der Streichrichtung der (nach Südwesten verlängerten) Synklinalstruktur der Lößnitz-Zwönitzer Mulde. Verlängert man dagegen die grabenartigen Synklinalstrukturen des „Zobes-Horizontes“ nach Südosten, so folgt nach etwa zehn Kilometern eine ähnliche aber nicht so tief eingesenkte Synklinalstruktur mit Phycodenschiefern südlich von Auerbach. Weitere zehn Kilometer südöstlich davon wäre eine (noch weniger tief eingesenkte) Synklinale über dem heutigen Granitanschnitt (mit der Lagerstätte Gottesberg) denkbar, die inzwischen abgetragen wurde. Das Uran der Lagerstätte Gottesberg könnte also aus silurischen Schwarzschiefern stammen, die ihr Metall (hydrothermal) an die Erzgänge im liegenden Granit abgegeben haben.

Ein weiteres mögliches Szenarium wäre eine laterale Zufuhr von Uran aus kambrischen Schwarzschiefern, die unweit von Gottesberg auch zur Bildung der U-Lagerstätte Schneckenstein beigetragen haben. In diesem Falle ließen sich genetische Parallelen zum Revier **Bergen** (der U-Lagerstätte Zobes) erkennen, dessen U-Vererzung im Bergener Granit liegt. Dieses Vorkommen ist tektonisch an die Neuensalzer Störungszone gebunden, die im Bereich des benachbarten produktiven Zobes-Horizontes unvererzt ist (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.6.1, S. 11). Allem Anschein nach ist das Uran hier aus den silurischen Schwarzschiefern des Zobes-Horizontes lateral abgewandert und entlang der (großen und gut durchlässigen) Neuensalzer Störungszone in den Granit gelangt. Die aufsteigenden Fluidströme im Granit haben also U-reiche Lösungen über hinreichend durchlässige Migrationswege „angesaugt“ und das Uran kraft ihrer reduzierenden Eigenschaften ausgefällt.

Beda Hofmann hat die genetischen Verhältnisse der Lagerstätte **Krunkelbach** im Schwarzwald beschrieben. *„Das Wirtsgestein der Uranvererzungen ist der unterkarbonische Bärhaldegranit. Dieser hochdifferenzierte Zweiglimmergranit mit Affinität zu einem Zinngranit weist einen relativ hohen Urangelalt (14 ± 3 ppm) und einen tiefen Thoriumgehalt (12 ± 5 ppm) auf. Das Uran ist im frischen Granit vorwiegend an magmatischen Uraninit gebunden. Dieser gesteinsbildende Uraninit stellt die Quelle des in der Lagerstätte konzentrierten Urans dar. [Eine Alternative dazu ist der teilweise oder vollständige Eintrag des Urans aus Sappropeliten der Nebengesteine.] Hochhydrothermale Umwandlungen (300 bis 400°C) im Bärhaldegranit führten zur Ausbildung von Greisen, von Arsenkies-Cassiteritaderchen und zur Chloritisierung von Biotit. Uran wurde dabei nicht mobilisiert. Die Uranmineralisation in der Lagerstätte Krunkelbach ist an hydrothermale Erzgänge mit Quarz, Baryt, Fluorit, Pyrit, Pechblende, Hämatit (sogenannte Eisen-Barium-Formation) gebunden. [Die Paragenese der „Eisen-Barium-Formation“ erinnert stofflich ebenso an die „kku“-Formation des Erzgebirges wie zeitlich. Beide haben variszisches Alter (HOFMANN, S. 23).] (...) Das Nebengestein der Erzgänge ist hydrothermal stark umgewandelt: Plagioklas, Kalifeldspat und Biotit wurden illitisiert. Die Entstehung der Lagerstätte im Oberkarbon wird auf die Wechselwirkung von aufsteigenden, reduzierenden Hydrothermen mit relativ oberflächennahen, oxidierenden, tiefthermalen Lösungen erklärt. Die Uranmineralisation bildete sich durch Mischung der beiden Lösungen oder durch Reaktion der oxidierten Lösungen mit sulfidischem Erz“ (HOFMANN, S. III). Dieses Modell der Lösungsmischung passt gut zur Hypothese des (teilweisen oder vollständigen) Eintrags von Uran, das durch „oberflächennahe, oxidierende“ Wässer aus Sappropeliten der Nebengesteine der Granite mobilisiert wurde.*

Ein zweites, allerdings nur lagerstättenumbildendes „Ereignis ist altersmässig mit dem tertiären Pb-Verlust von Pechblendern und mit der ebenfalls alttertiären Intrusion von Olivinnephelinitgängen zu korrelieren und steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit der Bildung des Oberrheingrabens“ (HOFMANN, S. IV).

Das dritte lagerstättenverändernde Ereignis war die quartäre Verwitterung. *„Die Oxidation der Lagerstätte mit der Bildung von Eisenhydroxiden, Uranylmineralien, Kaolinit, Beidellit und dem Ba-Al-Phosphat Gorceixit ist nach Datierungen an cogenetischen sekundären Uranmineralien mindestens 260 bis 340 ka alt“ (HOFMANN, S. IV).*

Für die Herkunft des Urans der hydrothermalen Gangerze der Lagerstätte Krunkelbach aus Sappropeliten im Umfeld des Bärhaldegranits sprechen auch die Randlage der Vererzung im Granit, die Anwesenheit von Graphit als akzessorischem Bestandteil verschiedener Metasedimente im Kontakthof des Granits (HOFMANN, Anhang III: 1) sowie Hinweise auf eine „granitexterne“ Herkunft bestimmter Begleitelemente des Urans: *„Für das im Erz teilweise stark angereicherte Element Se ist eine granitexterne Herkunft ebenfalls wahrscheinlich“ (HOFMANN, S. 75).*

Auch in den U-Vererzungen von **Großschloppen-Hebanz** im Fichtelgebirge liegen die Erze am Rande der Granitintrusion nahe dem Kontakt mit lokal sapropelitisch entwickelten (kambrischen) Schiefen.

Insgesamt entsteht der Eindruck: Auch **hydrothermale Uranerzgänge in Graniten beziehen ihr Metall im Wesentlichen aus Sapropeliten** der Nebengesteine der Intrusionen. Viele Schwarzschiefer sind nicht nur weitaus potentere Uranlieferanten als Granite, sie zeigen meist auch eine mehr oder weniger auffällige räumliche (und damit genetische) Nähe zu den hydrothermalen U-Vererzungen in den Graniten.

Schlussfolgerungen

- Als Träger von U-Mineralisationen eignen sich Granite unter vergleichbaren Bedingungen genauso gut wie viele andere Nebengesteine.
 - Als Uranlieferanten bleiben saure Magmatite generell aber hinter Sapropeliten deutlich zurück. So entstehen reiche (hydrothermale) Uranerze in Graniten bevorzugt – wahrscheinlich sogar nur – unter Beteiligung von (U-reichen, nicht assimilierten) Sapropeliten im Umfeld der Magmatite.
 - Es hängt im Wesentlichen von den hydrochemisch-hydrodynamischen Bedingungen ab, ob Uran durch die Erzlösungen in die Granite eingetragen wird und sich dort in hydrothermalen Gängen ablagert oder nicht.
 - Metallogenetisch bedeutsam für die hydrothermale Urananreicherung sind Granite vor allem durch ihre energetischen Begleiterscheinungen. Sie sind einerseits direkte Wärmelieferanten vor, während und nach ihrer Intrusion, andererseits aber auch Anzeiger für bevorzugte Aufstiegswege endogener Wärmeenergie, die erdgeschichtlich auch (mehrmals) reaktiviert werden können.
- Darüber hinaus begünstigen die Granite selbst und ihre Kontakthöfe als tektonisch kompetente Gesteine (in einem entsprechenden geomechanischen Spannungsfeld) die Bildung und Offenhaltung von Spalten für die Zirkulation erzbildender Lösungen und den Absatz von Erzen.

4.6 Herkunft des Urans der hydrothermalen Ganglagerstätten

Während die Hauptquellen des Urans der zementativen Lagerstätten vom Ronneburger Typ (Schwarzschiefer) und der infiltrativen vom Biolith- und vom Sandsteintyp (saure Magmatite) in Deutschland relativ klar erkannt zu sein scheinen, herrscht in dieser Frage bei den hydrothermalen Ganglagerstätten immer noch eine nicht zu überschende Unsicherheit, ja Ratlosigkeit. Dabei wird über diese genetisch entscheidende Frage schon lange nachgedacht. *„Bereits in der ersten Generalvorratsberechnung [der SDAG Wismut] von 1954 (...) findet sich ein bemerkenswert ausführlicher Abschnitt“* (HILLER & SCHUPPAN, S. 70) über die Genese der Uranlagerstätte Schneeberg-Schlema-Alberoda.

Zunächst gab es historisch bedingt gar keine Alternative zu den Graniten und ihren „magmatischen Restlösungen“, aus denen angeblich alle hydrothermalen Gangerze – also auch die Uranerze – entstanden sein sollen. Etwa seit den 1960er Jahren wird dieses Modell aber immer ernsthafter in Frage gestellt (BAUMANN et al., S. 66). Traditionen können bekanntermaßen langlebig sein und so werden die Granite auch heute noch von vielen Geologen als Metalllieferanten der Gangerze geschätzt. Diesbezüglich sind sich viele Wismut-Geologen aber auch ihre „zivilen“ Kollegen erstaunlich einig.

Die „Chronik der Wismut“ (2002) lässt bei der Erörterung der metallogenetischen Rolle der Granite mehrere Varianten zu: *„Ausführliche Untersuchungen der Petrologie, Petrografie und der Geochemie wurden an den Granitoiden vorgenommen. Es ging vor allem um die Rolle der varistischen Granite bei der Erzbildung, besonders bei der Bildung der Gangerzlagerstätten.*

Die Granite wurden

- *als die direkten „Quellen“ des Urans für die Lagerstättenbildung [Granit liefert U syngenetisch],*
- *als Zwischenherd [Granit liefert U epigenetisch] und*
- *als Lieferanten für die Fluide, die das Uran im Nebengestein mobilisieren, [Granit liefert kein U] betrachtet“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 1.3.1, S. 3 f.). Von diesen drei Varianten der Rolle der Granite bei der U-Erzbildung sind nach den hier dargestellten Erkenntnissen die beiden ersten (die erste vollkommen, die zweite weitestgehend) bedeutungslos. Die dritte Variante versucht, quasi „die Ehre der Granite zu retten“: Wenn die Granite schon kein Uran liefern, so doch wenigstens die Fluide für seine Erzbildung. Es erscheint jedoch überaus fraglich, ob Granite in der Lage sind, ohne „Hilfe von außen“ hinreichend oxidierende Fluide hervorzubringen, um Uran aus dem Nebengestein zu mobilisieren.

Die Bergbaumonographie „Geologie und Uranbergbau im Revier Schlema-Alberoda“ von 2008 beruft sich bezüglich der Genese dieser Lagerstätte auf eine Arbeit aus dem Jahre 1983 von 21 (sowjetischen) Autoren und präsentiert ebenfalls drei (in der Sache ähnliche, in der Form aber akademischer ausgedrückte) Varianten der Herkunft des Urans:

„1) magmatische Herkunft, verbunden mit Restdifferentialen der Granitschmelze, aus denen uranhaltige Fluide abgetrennt wurden;

2) Filtrationsprozesse, bei denen eine Mobilisation des Urans durch intrakrustale Fluide aus einem uranführenden Substrat in der Oberkruste abläuft;

3) lokale Herkunft, die in der Hypothese der Entwicklung geochemischer Barrieren ihren Ausdruck fand und das allgemeine Modell der Dynamik von Fluida mit zwei wichtigen Komponenten verbindet:

- mit der thermochemischen Kompression, die mit chemischen Reaktionen im Bereich des Kontakthofes einhergeht und

- mit Dekompressionen bei der nachfolgenden Spaltenbildung, die von der Aufnahme des Urans aus dem Nebengestein durch kohlen-saure Fluida begleitet werden“ (HILLER & SCHUPPAN, S. 71).

Während die Variante 1 noch hinreichend konkret, nach den hier vorliegenden Erkenntnissen aber unzutreffend ist, können die Varianten 2 und 3 allein schon wegen ihres überaus hohen Verallgemeinerungsgrades nicht ganz falsch sein. Kann die Uranquelle noch allgemeiner umschrieben werden als mit einem „uranführenden Substrat in der Oberkruste“? Wohl kaum! Auch die „lokale Herkunft“ des Urans ist samt der ergänzenden Erläuterung dazu alles andere als eine wissenschaftliche Punktlandung. Die thermodynamischen Schwächen des Modells der Kompression/Dekompression („Karbonatmodell“) wurden bereits erläutert. Dieses Modell ist physiko-chemisch nicht plausibel.

Auch wenn inzwischen nicht mehr alle Gangmineralisationen des Erzgebirges und anderer mitteleuropäischer Grundgebirge als Differentiationsprodukte variszischer Granitintrusionen (BAUMANN et al., S. 66) betrachtet werden, so fällt der „Abschied“ von den Graniten als die Hauptmetallquelle hydrothermalen U-Ganglagerstätten offenbar immer noch schwer. Wenn die Granite als syngenetische Uranlieferanten für die Erzgänge ausfallen, was sich immer klarer abzeichnet, dann „sollen“ sie wenigstens epigenetisch Uran liefern. In diesem Sinne fassen auch Ludwig Baumann, Ewald Kuschka und Thomas Seifert die Genese der sächsischen Uranlagerstätten zusammen, ordnen sie in die Systematik aller dortigen Erzlagerstätten ein und ziehen den Schluss: „Im Gefolge der Subsequenztektonik kommt es zum ‚Jüngeren Intrusivmagmatismus‘ mit umfangreichen Erzanreicherungen (Sn-W; Fe-Zn-Cu-Pb, U-Se, Sb-Ag)“ (BAUMANN et al., S. 75). Diese Formulierung ist hinreichend allgemein gehalten, um die Granite („Jüngere Intrusivmagmatite“) als Uranlieferanten ansprechen zu können aber nicht zu müssen. Ähnlich zweideutig drücken sich auch Geologen im benachbarten Böhmen aus. Sie sprechen zwar einerseits die uranreichen Migmatite und (spätvariszischen) Granite als wahrscheinlichste Lieferanten dieses Metalls an und gehen dank der klaren räumlichen Bindung der tschechischen Uranganglagerstätten an den Exokontakt spätvariszischer Granite von einer genetischen Verwandtschaft aus. Andererseits sehen sie aber keine direkte genetische Verbindung zwischen ihnen wegen des Altersunterschieds der Granite und der Gangerze (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 77). Das Uran der hydrothermalen Erzgänge wurde also (scheinbar) epigenetisch aus den Graniten mobilisiert. So sehen das auch deutsche Geologen, die zusammenfassend feststellen: „Eindeutige genetische Beziehungen zum Granit waren nicht nachzuweisen. Die U-Erzgänge kommen entweder innerhalb von Graniten vor (= Nebengestein; z. B. Bergener Granit/Vogtl.) oder sie werden von jüngeren Graniten nach der Teufe zu abgeschnitten bzw. sie setzen aus (z. B. im Distrikt Schneeberg-Schlema). Die häufig auftretende Bindung der U-Mineralisationen an Granitaufwölbungen ist demnach nicht stofflich, sondern s t r u k t u r e l l zu bewerten“ (BAUMANN et al., S. 82). Eine „nicht stoffliche“ Beziehung zwischen den Graniten und den U-Erzen ist eine gute Idee, wie noch gezeigt werden wird. Auch die „strukturelle“ Beziehung erscheint plausibel, erklärt sie doch die räumliche Begrenzung der Uranvererzung auf den Kontakthof der Granite. Die Kontaktmetamorphose führt quasi zu einer „Versinterung“ des Nebengesteins im Kontakthof, was die Öffnung tektonischer Spalten für die Gangerzbildung begünstigt. Als problematisch ist die strukturelle Rolle der Granite nur dann zu betrachten, wenn damit auf die Frage nach der Herkunft des Urans angespielt werden sollte. Die Herleitung hydrothermalen Uranlösungen aus imaginären Tiefen über tiefreichende tektonische Strukturen ist aus mehreren Gründen nicht plausibel. Ein Grund sind die (in mehrerer Hinsicht naheliegenden) U-reichen Sapropelite, ein weiterer die reduzierenden Bedingungen in den Tiefen der Erdkruste, die für die Migration des Urans in wässrigen Lösungen ungeeignet sind.

„Neuerdings wird für die ‚uqk‘-Assoziation eine genetische Beziehung zu den spätvariszischen Lamprophyren postuliert“ (BAUMANN et al., S. 82). Lamprophyre kommen – ähnlich wie die Granite – als strukturelle Wegbereiter, als (raumzeitlich begrenzte) Energielieferanten und als Anzeiger für Wärmeströme in Betracht. Stofflich erweisen sie sich mit ihren sulfidischen Komponenten zwar als Goldlieferanten (SCHADE, 2014) aber nicht als Uranquelle. Ihr basischer Stoffbestand spricht gegen eine magmatische Anreicherung von Uran in ihnen, ihr reduzierendes Milieu (Sulfidschwefel) verhindert eine signifikante U-Migration in wässrigen Phasen und wirkt als Reduktionsbarriere für dieses Metall. Lamprophyre können also bestenfalls erklären, warum sich Uran in ihrer Nähe abscheidet, aber nicht woher es kommt und auf welchen Wegen es dorthin gelangt. Ähnlich sind Versuche zu beurteilen, die jüngsten (tertiären) Umlagerungen der Pechblende „durch tertiären Basaltvulkanismus“ (BAUMANN et al., S. 82) erklären zu wollen. Dieser Vulkanismus bietet weder für die Mobilisierung noch für den Transport von Uran geochemisch geeignete Bedingungen. Denkbar wäre allenfalls – analog zu den Lamprophyren – ein „thermisches Ereignis“ in der Erdkruste, das beide Prozesse (Basalt-Vulkanismus und Uran-Remobilisation) antreibt.

Selbst der U-Reichtum der „Erzgebirgsgranite“ („Tatsächlich liegen die Urangehalte der sächsischen Fluor-Granite mit 11 ppm Uran deutlich über dem Durchschnittswert für die Erzgebirgsgneise (2 ppm)“, SEBASTIAN, S. 131) ist an sich kein Argument für ihre Bedeutung als Uranquelle hydrothermalen Prozesse. Was auf den

ersten Blick einleuchtend zu sein scheint, – die Ableitung der Uranherkunft aus den U-reichen Graniten – erweist sich aus einem anderen Blickwinkel als das genaue Gegenteil. Es ist nämlich keineswegs plausibel, dass trotz seiner (angeblichen) Abwanderung aus den Graniten in die U-Erzgänge immer noch so viel Uran im Granit verblieben ist. Tatsächlich wirkt sich die Assimilation uranreicher Gesteine durch Granite metallogenetisch sogar eher negativ aus, da das Uran bevorzugt in kristallchemisch stabile Minerale wie Zirkon, Monazit, Xenotim, Brannerit, Davidit, Thorianit eingebaut wird. Viele dieser Minerale sind gegenüber epigenetischen (sowohl hydrothermalen als auch exogenen) Prozessen weitgehend resistent. Aus ihnen kann also kaum Uran für Gangerzbildungen mobilisiert werden. Lediglich aus (magmatischem) Uraninit ist Uran relativ leicht mobilisierbar.

Gegen die Granite als (syngenetische oder epigenetische) Uranquellen bei der Gangerzbildung spricht noch eine weitere Beobachtung in der Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Antiklinalzone. Im Westerbirge und im Vogtland liegen nämlich bauwürdige Uranvererzungen in Kontakthöfen sowohl der jüngeren (uranreicheren) „Erzgebirgsgranite“ (Eibenstocker Granit) als auch der älteren (uranärmeren) „Gebirgsgranite“ (Bergener Granit). Auch bei Uranerzgängen innerhalb der Granite scheint es wenig bedeutsam zu sein, ob die Magmatite stark oder schwach differenziert sind. So sind die U-Erzgänge von Bergen an einen weniger differenzierten „Gebirgsgranit“ und die von Gottesberg an einen höher differenzierten „Erzgebirgsgranit“ gebunden. Der Grad der petrologisch-geochemischen Spezialisierung der Granite spielt lagerstättengenetisch also offenbar keine wesentliche Rolle für die Bildung hydrothermalen Uranvorkommen.

Bei so vielen Argumenten, die gegen die Granite als Uranlieferanten im hydrothermalen Milieu sprechen, stellt sich die Frage, ob es denn eine Alternative zu ihnen gibt. Ja, es gibt eine Uranquelle, die sich dem aufmerksamen Betrachter geradezu aufdrängt: die in mehrerer Hinsicht naheliegenden **S a p r o p e l i t e**.

Für Schwarzschiefer und Graphitgneise als Uranquelle der hydrothermalen Gangerze spricht eine Reihe von Argumenten:

- In vielen hydrothermalen Uranlagerstätten wird die räumliche Nähe der U-Erze zu sapropelitischen Nebengesteinen beschrieben. Gedeutet werden die Sapropelite bisher allenfalls als günstige Medien für die Erzfällung. Weitgehend ignoriert wird dagegen die Tatsache, dass sie natürlich auch exzellente U-Lieferanten sein können. Hinzu kommt noch, dass sapropelitisches Nebengesteine oftmals auch dann die hydrothermalen U-Lagerstätten begleiten, wenn sie in den jeweiligen geologischen Beschreibungen (noch) nicht explizit angesprochen werden.
- Die Größe der Lagerstätten hängt wesentlich von der Art der Schwarzschiefer, genauer gesagt von ihrem ursprünglichen Urangehalt, ihrer Menge und ihrer Zugänglichkeit für erzbildende Lösungen ab. So bringen die uranreichen (40-60 g/t) untersilurischen Kieselschiefer die größten U-Lagerstätten Deutschlands (Schneeberg-Schlema-Alberoda, aber auch das Ronneburger Erzfeld) hervor. Ältere uranärmere und/oder geringermächtige (präkambrische und kambrische) Schwarzschiefer bilden kleinere Uranlagerstätten (Erzgebirge außer Schneeberg-Schlema-Alberoda). Aus jüngeren Sapropeliten (devonischen Schwarzschiefern, karbonischen Rußschiefern) sind keine U-Lagerstätten entstanden. Die wenigen vorhandenen Analysendaten deuten darauf hin, dass sie uranarm sind. Diese Befunde stimmen mit den Grundlinien der Evolution der U-Vorkommen (Abschnitt 3.5) überein. Somit macht sich die genetische Beziehung zwischen den Sapropeliten und den U-Gangerzen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ bemerkbar.
- Der unterschiedliche Uranreichtum der verschiedenen Sapropelite erklärt in Kombination mit anderen erzkontrollierenden Faktoren auch zwanglos die Verteilung der U-Vorkommen insbesondere im Erzgebirge, wo die „*Gegensätzlichkeit in der regionalen Verbreitung von Quarz-Poly metall-Ag- und Quarz-Uran-Karbonat-Assoziationen (...) bisher noch keine endgültige Erklärung gefunden*“ (BAUMANN et al., S. 81) hatte. Das Modell der Uranherkunft aus Sapropeliten erklärt zwanglos die räumliche Bindung der U-Ganglagerstätten an die Verbreitungsgebiete der (proterozoisch-altpaläozoischen) Graphitgneise und Schwarzschiefer und damit die Verteilung der U-Vorkommen im Erzgebirge und darüber hinaus.
- Sapropelite scheinen sogar die Granite mit ihrem Uran zu befruchten, worauf bereits weiter oben (Abschnitt 3.4) am Beispiel der Lagerstätte Rössing (Namibia) aufmerksam gemacht wurde. Anzeichen für eine Assimilation von Sapropeliten durch Granite erwähnt Harald Dill in den Graniten von Falkenberg (Oberpfalz) und Hauzenberg (Bayerischer Wald), wo dunkle Zonen aus organischer Substanz in Phosphatmineralen wie Apatit zu beobachten sind. Der Autor kommt zu dem Schluss: „*The metabiolite-bearing members of the 'Varied Group' (...) are thought to be the most fertile primary environment for preconcentration not only for U but also for W*“ (DILL, 1986, S. 284). Zum üblichen Inventar der bunten Gesteinskomplexe („Varied Group“) gehören Sapropelite.
- Für die Fertilität der Sapropelite spricht auch, dass Uranlagerstätten ohne jegliche Granite entstehen können, wie das Beispiel des Ronneburger Erzfeldes zeigt.
- Schließlich verfügen Sapropelite gegenüber den Graniten über weitere metallogenetische Vorteile für die Urananreicherung. Sie sind nämlich oftmals nicht nur reichere Uranquellen mit hohen Anteilen relativ leicht mobilisierbaren Urans, sondern zugleich auch eine effiziente Reduktionsbarriere. So kann der

Anreicherungsprozess auf engstem Raum und damit sehr intensiv ablaufen, wenn sich nämlich eine Oxidationsfront langsam durch die Schwarzschiefer arbeitet. Diese Oxidationsfront kann generell sowohl wesentlich exogen (wie im Ronneburger Erzfeld) als auch endogen (wie im Erzfeld Schneeberg-Schlema-Alberoda) angetrieben werden. Endogene Prozesse haben den Vorteil, dass erhöhte Temperaturen die Löslichkeit vieler Komponenten erhöhen und somit auch höhere Anreicherungen im Erz zulassen. Auch wenn die Idee von den uranliefernden Sapropeliten noch nicht viele Freunde hat, so ist sie doch nicht neu. Schon 1967 äußerte der sowjetische Geologe Alexej Iwanowitsch Tugarinow die Vermutung, dass uranreiche sedimentäre Formationen (Schwarzschiefer, Phosphorite) die Voraussetzung für die Entstehung von Uranprovinzen und endogenen U-Lagerstätten sind (KASANSKI et al., S. 185).

Schlussfolgerungen

- **Das Uran der hydrothermalen Gangvererzungen Deutschlands stammt im Wesentlichen aus (silurischen, kambrischen und präkambrischen) Sapropeliten**, nicht aus Graniten oder anderen Magmatiten, nicht aus deren „magmatischen Restlösungen“, nicht aus imaginären Tiefen, die über tektonische Störungszonen mit höheren Etagen der Erdkruste verbunden sind, nicht aus Lamprophyren oder deren Fluiden und nicht aus Produkten des tertiären Basaltvulkanismus.
- Uranreiche (in Deutschland jungproterozoisch-altpaläozoische, weltweit auch altproterozoische) Sapropelite entstanden, als sich in bestimmten **Meeresbecken** massenhaft organisches Material ansammelte, das als Reduktionsbarriere wirkte, an der sich das im Meerwasser gelöste Uran in großen Mengen abgeschieden hat. Mit der Ausbreitung des (organischen) Lebens auf die **Kontinente** verlagerte sich auch der Schwerpunkt der Ausbildung solcher Reduktionsbarrieren seit dem jüngeren Paläozoikum auf terrestrische Bereiche.
- Die **besondere Bedeutung der Sapropelite für die Uranerzbildung** besteht in ihrer Mehrfachfunktion. Sie sind (1.) oft reiche Uranquellen mit (2.) hohen Anteilen relativ leicht mobilisierbaren Urans, sorgen (durch die Oxidation ihrer Sulfide) (3.) für effiziente Lösungsmittel (Sulfatschwefel), können (4.) als spröde Kieselschiefer in einem entsprechenden tektonischen Spannungsfeld eine kleinräumige Zerstückelung und damit eine weitgehende Zugänglichkeit der Uranquelle für erzbildende Lösungen gewährleisten und bilden (5.) durch ihre hohen Gehalte an organischem Kohlenstoff und Sulfidschwefel effiziente Reduktionsbarrieren, an denen sich Uran abscheiden kann.

4.7 Erzkontrollierende Faktoren

Damit ein Erzvorkommen entsteht, muss allgemein gesagt (1.) eine Metallquelle vorhanden sein, deren Metall (2.) in eine mobile Phase überführt und (3.) zu einer Immobilisierungsbarriere transportiert wird, an der es (4.) sich in höherer Konzentration ablagert, also anreichert. Die Metallanreicherung muss (5.) anschließend konserviert bleiben. Diese Prozessschritte führen nur dann zur Bildung und Erhaltung eines Vorkommens, wenn sie in einer bestimmten raumzeitlichen Abfolge – nämlich in der Reihenfolge von 1. bis 5. – wirken. Aus diesen allgemeinen Prozessschritten der Erzbildung leiten sich für jeden Rohstoff konkrete erzkontrollierende Faktoren ab.

In der Literatur werden für die hydrothermale Uranlagerstätte Schneeberg-Schlema-Alberoda folgende erzkontrollierende Faktoren genannt:

„- der Kontakthof der Granite (außerhalb dessen ist keine bauwürdige Uranvererzung angetroffen worden);

- die Gesteine der Lößnitz-Zwönitzer Zwischenmulde als produktive Gesteine (vor allem kohlenstoffführende und karbonatische Schiefer und Metadiabase) sowie Quarzitschiefer-Horizonte der Südflanke;
- Wechsellagerungen von chemisch und physikalisch unterschiedlichen Gesteinen;
- besondere strukturell-tektonische Bedingungen (Gangkreuze und -scharungen, Verwerfungen, Änderungen im Streichen oder Fallen bzw. in der Mächtigkeit der Gänge, Auftrümmungen u. a.)“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.2.1, S. 10 f.).

Bei diesen Faktoren steht die Erzabscheidung im Vordergrund. Die Herkunft des Erzmetalls spielt allenfalls in Gestalt der Granite eine Rolle, die hier – historisch gewachsen – nicht zufällig an erster Stelle stehen.

Diesen Faktoren werden alternativ (gemäß den eingangs genannten Prozessschritten) folgende gegenübergestellt:

1. Metallquelle: silurische und (prä)kambrische **Sapropelite**,
2. Metallmobilisation durch (von der Erdoberfläche absteigende) **Fluide mit hohem Oxidationspotential**, die in Kontakt mit der Metallquelle kommen,
3. Metallmigration durch **gerichtete Fluidströme** in (strukturell-tektonisch) dafür geeigneten Räumen,
4. Metallimmobilisierung an einer **Reduktionsbarriere** (kohlige Substanz, Sulfidschwefel, reduzierende Fluide),
5. Metallkonservierung durch ein geeignetes **geotektonisches Regime**.

Die Rolle der Granite reduziert sich demnach im Wesentlichen auf die Lieferung oder die Anzeige von Aufstiegswegen der Wärmeenergie als Motor der endogenen Prozesse und die Beteiligung an der Schaffung strukturell-tektonisch geeigneter Räume für die Uranmigration und die Erzablagerung (Faktor 3). Die

Anwesenheit von Graniten ist allerdings keine notwendige und schon gar keine hinreichende Voraussetzung für die hydrothermale Uranerzbildung. So zeigen U-Gangvererzungen im mittleren und östlichen Erzgebirge keine räumliche Bindung an variszische Granite. Dagegen ist die Anwesenheit von Sapropeliten eine notwendige aber noch keine hinreichende Voraussetzung für die Bildung von U-Lagerstätten vom Erzgebirgstyp.

Ganz ähnliche erzkontrollierende Faktoren gelten für die zementativen Lagerstätten vom Ronneburger Typ. Bei diesen U-Vererzungen sind bisher aber nur silurische Schwarzschiefer als Uranquelle bekannt und die Temperaturen der mobilisierenden Fluide sind bei den Zementiten naturgemäß tiefer als bei den Hydrothermaliten.

Etwas größere genetische Unterschiede zeigen sich bei den erzkontrollierenden Faktoren der infiltrativen Lagerstätten vom Sandstein- und vom Biolith-Typ. Bei diesen U-Vererzungen spielen allem Anschein nach variszische Magmatite die Hauptrolle als Uranquelle. Die anderen vier Faktoren sind im Allgemeinen die gleichen wie bei den Hydrothermaliten. Im Besonderen hat natürlich jedes Vorkommen seine unverwechselbare Spezifik.

Verallgemeinert auf alle Uranvorkommen Deutschlands (und der Welt) sind folgende erzkontrollierende Faktoren zu nennen:

- Metallquelle: Die Urquelle aller U-Vorkommen sind **saure und alkalische Magmatite**, die jedoch nur relativ U-arm sind. Die lagerstättengenetisch wirksamste Uranquelle sind bestimmte **Sapropelite**.
- Metallmobilisation: Uran kann geochemisch bei hinreichend hohen Temperaturen (magmatisch, pegmatitisch, pneumatolytisch) in vierwertiger Form U^{4+} und bei tieferen (endogen-hydrothermal, exogen-infiltrativ und -zementativ) in sechswertiger Form UO_2^{2+} mobilisiert werden. Stabile U-Mineralien lassen sich bei Erosionsprozessen mechanisch (klastisch) mobilisieren.
- Metallmigration: Uran wird so lange transportiert, wie es in (zumeist) **flüssigen Phasen in Bewegung** bleibt. Dafür müssen die Mobilisationsbedingungen erhalten bleiben und geeignete räumliche Voraussetzungen bestehen. Für den gerichteten geochemischen U-Transport eignen sich ein entsprechendes **tektonisches Inventar** (mit Störungen verschiedener Größenordnungen) sowie hinreichend isolierte **wasserdurchlässige Schichten** (besonders in artesischen Becken). **Oberflächennahe Fließgewässer** können Uran sowohl geochemisch als auch mechanisch transportieren.
- Metallimmobilisierung: Die Abscheidung von Uran erfolgt geochemisch durch reduktive oder nichtreduktive Löslichkeitsverringerung sowie geomechanisch durch Sedimentation (Seifen). An Reduktionsbarrieren geht leichtlösliches sechswertiges UO_2^{2+} in schwerlösliches vierwertiges U^{4+} über und fällt bevorzugt als Pechblende oder Coffinit aus. Die effizientesten Reduktionsmittel sind **organischer Kohlenstoff** (Erdgas, Erdöl, kohlige Substanz, Kohle, Graphit), **Sulfidschwefel** (Pyrit und andere Sulfidminerale, biogener Sulfidschwefel) sowie unter bestimmten Bedingungen (SCHADE, 1984, S. 79 ff.) auch **zweiwertiges Eisen**. Je stärker das Reduktionsvermögen ist, desto vollständiger und konzentrierter fällt das Uran an der Reduktionsbarriere aus.
Ohne Redoxreaktionen kann sich vierwertiges Uran durch **Abkühlung hochthermaler Systeme** abscheiden. Dabei entstehen bevorzugt U^{IV} -Oxide (Brannerit, Davidit, Uraninit). Uran kann auch in sechswertiger Form reduktionsfrei an Löslichkeitsbarrieren ausgefällt werden etwa in Form von Uranglimmern, die sich bei der **Reaktion von Uranyl-Ionen mit bestimmten Anionen** (Arsenat, Phosphat, Vanadat) bilden, mit denen sie schlechtlösliche Verbindungen eingehen. Eine andere Löslichkeitsbarriere ohne Reduktion entsteht durch **Wasserverlust** (Verdunstung). Dabei kann Uran ausfallen etwa als Uranyl-Karbonat (Rutherfordin) oder -hydroxid (Schoepit).
- Metallkonservierung: Uranerze bleiben erhalten, solange die geotektonischen Bedingungen dafür sorgen, dass sie **nicht erodiert und nicht von oxidierenden Fluiden oder sehr hohen Temperaturen erfasst** werden.

Da praktisch alle U-Lagerstätten im Ergebnis eines mehraktigen Prozesses entstehen, durchläuft das Uran den Zyklus der Erzbildung mit den jeweiligen erzkontrollierenden Faktoren mehrmals, wobei die Produkte der vorangegangenen Anreicherung die Edukte der nächsten sind.

5. Raumzeitliches Modell der deutschen Uranvorkommen

Das folgende metallogenetische Modell basiert auf der hier vorgestellten Klassifikation der Erzvorkommen und den damit verbundenen Definitionen der Erzbildungsprozesse. Auf der Basis der allgemeinen erzkontrollierenden Faktoren und der besonderen geologischen Bedingungen in Deutschland kann folgendes raumzeitliche Modell der Genese der Uranvorkommen entwickelt werden, bei dem jedes Vorkommen einem bestimmten Raum (wo es liegt) und einer bestimmten Zeit (wann es dort entstand) zugeordnet werden kann:

5.1 Prävariszische U-Anreicherungen (Proterozoikum – Devon)

Von den heute in Deutschland bekannten Uranlagerstätten entstand keine in prävariszischer Zeit. Viele von ihnen gäbe es aber nicht ohne die Voranreicherungen von Uran in dieser Zeit. In proterozoisch-altpaläozoischer Zeit entstanden also U-Anreicherungen, die sich erst später zu U-Lagerstätten weiterentwickelt haben. Metallogenetisch bedeutsam sind in prävariszischer Zeit vor allem synsedimentäre U-Anreicherungen in **Sapropeliten**. Sie gehören lagerstättengenetisch zu den (weiträumigen) Einträgen der *Infiltrate*.

Sapropelite im präkambrischen Fundament

haben hydrothermale U-Vorkommen hervorgebracht, die im östlichen und mittleren Erzgebirge (graphitführende Gneise und Schiefer bei Freiberg-Brand, Niederpöbel-Bärenhecke, Johnsbach, Marienberg, Annaberg-Bärenstein-Niederschlag), im Oberpfälzer Wald (Gneise der „Bunten Gruppe“ bei Mähring), im Bayerischen Wald (graphitführende Gneise im Raum Hauzenberg) und im Schwarzwald (Kinzigite) bekannt sind. Die relativ geringen Vorräte dieser Uranvorkommen verraten, dass präkambrische Schwarzschiefer zwar U-Lagerstätten generieren können, aber nicht die stärksten metallogenetischen Uranquellen sind. Hinweise auf die Herkunft des Urans aus Sapropeliten fanden sich in allen etwas näher betrachteten U-Lagerstätten dieses Typs:

- Die ältesten Nebengesteine hydrothermalen U-Erzgänge, die zugleich Sapropelite als U-Lieferanten führen, sind wohl im südwestlichen Zentralteil (Brander Revier) des Freiburger Lagerstättendistrikts bekannt. *„Die Gesetzmäßigkeiten der Uranerzverteilung blieben zur Betriebszeit ungeklärt. (...) Aus heutiger Sicht [2002] scheint eine lithologische Kontrolle der Vererzung durch heterogene Einlagerungen im Brander Gneis sehr wahrscheinlich“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.9.1, S. 3) zu sein. Mit lithologischer Kontrolle ist die Abscheidung des Urans, nicht seine Mobilisierung gemeint. Für die Vermutung, dass unter den lithologisch „bunteren“ Brander Gneisen auch Sapropelite zu finden sein müssten, lieferten zunächst jedoch weder die „Chronik der Wismut“ noch die „Lagerstätten des Erzgebirges“ (BAUMANN et al.) einen Hinweis. Offenbar erfreuen sich Sapropelite bei vielen Autoren keiner (ihnen angemessenen) metallogenetischen Verehrung. Einen Besuch der Bergbauhalden im Brander Revier konnte ich mir dennoch ersparen dank einer Arbeit von Wolfgang Gotte (1985), in der sich folgendes Zitat über den Himmelsfürster Glimmerschieferkomplex fand:

„Bemerkenswert sind ferner mannigfaltige, oft in inniger Wechsellagerung miteinander auftretende, am Aufbau des Glimmerschieferkomplexes beteiligte Gesteine wie Muskovitquarzit, Granatquarzit, graphitführender [Da sind sie, die gesuchten Sapropelite!] Glimmerschiefer“ (GOTTE, S. 203).

- Die U-Lagerstätte Marienberg liegt in präkambrischen Zweiglimmergneisen der Reischdorfer Folge. Zwischen Rittersberg und Wolkenstein sowie bei Pobershau sind in einem 50-80 m mächtigen Teil des Profils bis 40 cm mächtige graphit- und pyritreiche Lagen (sogenannte „Schwarze Flöze“) eingeschaltet (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.5 S. 4), an die die Uranvererzungen gebunden sind.

- Das Nebengestein der U-Lagerstätte Annaberg ist präkambrischer Zweiglimmergneis („Graugneis“) der Annaberg-Wegefahrender Folge. Darin sind bis zu 10 m mächtige Graphitgneise eingeschaltet. *„Bauwürdige Uranerze wurden nur (...) im Verbreitungsgebiet graphitischer Gneise angetroffen“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.4, S. 7).

- Auch in der Lagerstätte Bärenstein-Niederschlag sind die Uranvererzungen an graphit- und pyritführende Lagen innerhalb der Gneisglimmerschiefer und Zweiglimmerschiefer der Niederschlag Gruppe und an der Basis der Raschauer Folge gebunden (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.7, S. 6).

- Im Umfeld des Bärhaldegranits, dem Träger der Lagerstätte Krunkelbach (Schwarzwald), treten diverse graphitführende Metasedimente – darunter auch (präkambrischer) Paragneis – auf (HOFMANN, Anhang III: 1), die als Uranquelle in Betracht kommen.

- Auch bei den teilweise Uranerz führenden, hydrothermalen Bi-Co-Ni-Ag-Gängen im Granit von Wittichen (Schwarzwald) lassen sich räumliche und genetische Beziehungen zu graphitischen Gesteinen herstellen. Im Tal der Kleinen Kinzig unweit von eben jenem Wittichen liegt nämlich der „locus typicus“ der 1860 von Leopold Heinrich Fischer erstmals beschriebenen Gesteinsart Kinzigit, eines Granatgraphitgneises.

- Schließlich bestand ein Erkundungsergebnis im Gebiet von Delitzsch (Nordwestsachsen) in der lithologischen *„Differenzierung des riphäischen Grauwackenkomplexes durch dunkle kohlenstoffreiche Argillite bis Tonschiefer, die den Charakter autonomer Züge bis 15 km Längserstreckung und 1.000 m scheinbare Mächtigkeit annehmen können und erhöhte Clarke-Gehalte an Elementen der Schwarzschiefer-Fazies aufweisen“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.5, S. 8). Auch wenn hier noch kein Uranerz oder -vorkommen angetroffen wurde, so leiten sich daraus aller Voraussicht nach doch Perspektiven für die Uranhöflichkeit solcher riphäischen Bildungen ab.

Sapropelite in der paläozoischen Geosynkлинаletage

haben sich epigenetisch teils zu hydrothermalen U-Erzgängen und -stockwerken, teils zu zementativen Erzlagern und -stockwerken, teils aber auch gar nicht weiterentwickelt. Dabei erweisen sich die silurischen Schwarzschiefer als die uranreichsten mit den größten Lagerstätten (Ronneburg, Schneeberg-Schlema-Alberoda, Zobes). Etwas bescheidener fallen die an kambrische Schwarzschiefer gebundenen Vorkommen (Johanngeorgenstadt, Pöhla-Tellerhäuser, Antonsthal-Bermsgrün-Raschau-Breitenbrunn, Schwarzenberg-Neuwelt-Lauter-Bernsbach, Schneckenstein, Fichtelgebirge, Delitzsch) aus. Metallogenetisch unauffällig

verhalten sich die jüngeren Schwarzschiefer (devonische Schwarzschiefer und unterkarbonische Rußschiefer). Sie weisen offenbar keine erhöhten Urangelhalte auf, was für die Südostflanke des Schwarzbürger Sattels belegt werden konnte (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.16, S. 4) und was durch die Evolution der Uranvorkommen in der Erdgeschichte (Abschnitt 3.5) begründet wird.

- Kambrium

Es gibt zahlreiche Hinweise auf eine räumliche Bindung von U-Mineralisationen an kambrische Sapropelite:

- Im Erzfeld Pöhla-Tellerhäuser sind U-Vererzungen an (kambrische) kohlenstoffführende Glimmerschiefer, Skarne und Amphibolite gebunden (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.3.2, S. 3).

- Bei Johanngeorgenstadt (Unruhe) werden stark graphitführende Phyllite als Nebengesteine der Uranerze genannt (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.8.8, S. 2).

- Die Uranlagerstätte Weißer Hirsch bei Antonsthal liegt in Glimmerschiefern und Gneisen der mittleren und oberen Raschauer Folge der (unterkambrischen) Keilberg-Gruppe. Auch wenn Schwarzschiefer in dieser und in anderen U-Lagerstätten zwischen Johanngeorgenstadt und Schwarzenberg in der „Chronik der Wismut“ nicht explizit erwähnt werden, so bedeutet das nicht, dass diese Gesteine dort nicht vorkommen. Ihre Anwesenheit geht aus anderen geologischen Berichten hervor und ist auch im Haldenmaterial vielerorts nicht zu übersehen.

- Während man in der „Chronik der Wismut“ vergeblich nach Hinweisen auf Sapropelite in der Lagerstätte Schneckenstein im Vogtland sucht, findet sich in der Monographie über die Schwespatlagerstätte Brunndöbra, die direkt an die Uranlagerstätte Schneckenstein angrenzt, wenigstens ein unscheinbarer Vermerk darüber in einer Übersicht des stratigraphischen Normalprofils im Gebiet Hammerbrücke/Klingenthal: In der oberkambrischen Körnerberg-Folge kommen *„im S auch dunkelgraue bis schwarze Tonphyllite und Graphitschieferlagen“* (ILGNER & HAHN, S. 23) vor. Sie sind dort aber bestimmt nicht die einzigen Sapropelite.

- Kambrisches Alter weist auch die Schieferhülle im Bereich des Granit-U-Vorkommens Großschloppen-Hebzan im Fichtelgebirge auf. Dieses Vorkommen gäbe es ohne die kambrischen Schwarzschiefer im Exokontakt der Granite wohl nicht.

- Im Raum Delitzsch sind mehrere Erzkörper an (vor allem mittel-)kambrische Nebengesteine gebunden (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.5, S. 11). Schwarzschiefer werden auch hier nicht explizit erwähnt, dafür aber im östlich davon gelegenen Erkundungsgebiet von Torgau-Herzberg-Doberlug, wo in kambrischen Gesteinen lokal die *„Umwandlung der kohlenstoffführenden Kieselschiefer in Quarzhornfelse“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.5, S. 14) beobachtet wurde.

- Silur

Silurische Schwarzschiefer – insbesondere die untersilurischen Kieselschiefer – sind offenbar die reichste Uranquelle Deutschlands. Jedenfalls sind die größten bekannten Uranlagerstätten hierzulande, die Erzfelder von Ronneburg und Schneeberg-Schlema-Alberoda, räumlich und genetisch an silurische Schwarzschiefer gebunden.

- Das Ronneburger Erzfeld ist die größte bekannte Uranlagerstätte Deutschlands. Ihr Metall leitet sich wie bereits gezeigt aus den untersilurischen Kieselschiefern ab. Die Umlagerung des Urans bei der hypergenen Erzbildung beschränkte sich auf relativ geringe Entfernungen. So liegen 85 % der Bilanzintervalle der Erkundungsbohrungen nicht weiter als 30 m von den nächstgelegenen Unteren Graptolithenschiefern entfernt (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.14.0.2, S. 21).

- Das Erzfeld von Schneeberg-Schlema-Alberoda liegt im Kreuzungsbereich der erzgebirgisch (NO) streichenden Löbnitz-Zwönitzer Mulde (und ihren silurischen Schwarzschiefern!) mit der herzynisch (NW) streichenden Störungszone Gera-Jachymov innerhalb des Kontakthofes der variszischen Granite. Das Uran hat sich auch bei der hydrothermalen Erzbildung größtenteils nicht weit von seiner Quelle entfernt. So sind 95 % der Vorräte an *„diverse dunkle Schiefervarietäten, Graphitschiefer und Amphibolgesteine oberordovizischen bis devonischen Alters“* (HILLER & SCHUPPAN, S. 12) gebunden.

„Außerhalb der Lagerstätte Schlema-Alberoda wurden in der Löbnitz-Zwönitzer Synklinalen auf Blatt Löbnitz zwar zahlreiche radioaktive Anomalien, aber keine weiteren bauwürdigen Uranvererzungen des ‚sächsischen Typs‘ nachgewiesen. Verantwortlich für diese negative Einschätzung ist vor allem die ungünstige Position der ‚produktiven Gesteine‘ zum Kontakthof der Granitmassive“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.12, S. 13). Die enge räumliche Bindung der U-Vererzung an den Kontakthof der Granite ist einerseits ein weiteres Indiz für die begrenzte Migration des Urans im hydrothermalen Milieu. Andererseits unterstreicht sie die Bedeutung der Granite als *„geomechanische Wegbereiter“* der Bildung der U-Gangerze.

- Bekannt sind weitere hydrothermale und zementative U-Vorkommen in Südost-Thüringen, Südwest-Sachsen und Nordost-Bayern. Die hydrothermale U-Lagerstätte Zobes im Vogtland ist an den Kontakthof des Bergener Granits gebunden. *„Im Ergebnis der Sucharbeiten konnte eine Reihe von Gängen nachgewiesen und festgestellt werden, daß die Uranvererzung in ihnen an die Kreuzungsbereiche mit NE-SW streichenden Diabasgängen und einem Schichtpaket von kohlenstoffreichen Schiefeln und verskarnten Kalken (sog. „Zobes-Horizont“) konzentriert ist“* (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.6.1, S. 4). Mit diesen „kohlenstoffreichen Schiefeln“ sind silurische Schwarzschiefer gemeint, die auch in dieser Lagerstätte die Haupturanlieferanten sind. Das Uran des zementativen U-Vorkommens von Hauptmannsgrün-Neumark im Vogtland stammt ebenfalls aus silurischen Schwarzschiefern.

5.2 Variszische U-Anreicherungen (Karbon – Rotliegend)

In variszischer Zeit entwickelten sich einige der älteren U-Voranreicherungen im prävariszischen Grundgebirge weiter bis hin zu Lagerstätten. Daneben entstanden neue U-Vorkommen. Die variszische Erzbildung brachte endogene und exogene U-Vorkommen in prävariszischen und variszischen Gesteinen hervor.

Metallogenetisch am bedeutsamsten sind in variszischer Zeit **hydrothermale, zementative und infiltrative Prozesse**. Uran wurde aber auch in Magmatogeniten angereichert.

Magmatogenite

Geochemisch und mineralogisch nachweisbare magmatogene Anreicherungen von Uran sind in Deutschland sowohl in Magmatiten als auch in Pegmatiten bekannt. Magmatogene U-Lagerstätten wurden hierzulande aber noch nicht entdeckt.

Saure (intrusive und effusive) Magmatite

Erhöhte (geochemische) **Urangehalte** sind in mehreren Graniten und Rhyolithen nachgewiesen worden: In Sachsen werden für den Syenit von Meißen durchschnittliche Urangehalte von 12,8 g/t, für den Markersbacher Granit 10,1 bis 13,1 g/t (TONNDORF, S. 18) und für den Eibenstocker Granit 13,7 g/t (TONNDORF, S. 19) angegeben. „Porphyre“ bei Pappenheim im Thüringer Wald enthalten 19 Gramm Uran pro Tonne Gestein (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.17, S. 16).

Im Markersbacher Granit wurde die Verteilung des Urans in den Mineralen dieses Gesteins analysiert: „Eine untersuchte Großprobe Markersbacher Granites mit einem Gesamtgehalt an Uran von 8,1 g/t setzte sich nach Gewichtsanteilen zu 93 % aus Quarz und Feldspat, 5 % Biotit und 1,9 % unmagnetischen Schwermineralen zusammen. Die durchschnittlichen Urangehalte der 3 Fraktionen betragen entsprechend je 4,6, 19,5 und 100 g/t. Danach sind Feldspat und Quarz mit 5,1 g bzw. 62,9 %, der Biotit mit 1,1 g bzw. 13,7 % und die Schwerminerale mit 1,9 g bzw. 23,3 % am summarischen Urangehalt des Granits beteiligt“ (TONNDORF, S. 127). Das Uran ist also auf unterschiedlich stabile Minerale verteilt und nur zum Teil epigenetischen Prozessen zugänglich. In der „Chronik der Wismut“ ist die Rede von bis zu 32 % mobilen Urans im Markersbacher Granit (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.11, S. 22). Dieser Wert korrespondiert mit Angaben sowjetischer Geologen, denen zufolge bei der Lateritverwitterung 16 bis 37 % des Urans aus Graniten ausgelaugt werden (AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 83).

In einigen Graniten wie im Fichtelgebirge (und im Schwarzwald) konnten sogar syngenetische **Uranminerale** nachgewiesen werden: „Primärer Uranträger der Uranvererzung am Rudolfstein ist das Uranoxid Uraninit. Dieser ist in 0,1 bis 0,3 mm großen Oktaedern im Zinngranit eingewachsen. Der Urangehalt beträgt ca. 9 g/t Zinngranit (Neuhaus, 1954). Drescher-Kaden gibt 0,003 % U_3O_8 an“ (MEIER, S. 4). Der erste Satz dieses Zitates ist etwas missverständlich ausgedrückt. Die Uranvererzung am Rudolfstein besteht nämlich nicht aus Uraninit, – dafür sind die Gehalte viel zu niedrig – sondern aus Torbernit in Ruschelzonen des Granits mit Urangehalten von 200 bis 2500 (maximal 6000) g/t. Das eigentliche Erz ist hier also keine magmatische, sondern eine exogene Bildung, die ihr Uran aus magmatischen Mineralen bezogen hat.

Auch in der Lagerstätte Krunkelbach im Schwarzwald treten „*idiomorphe Uraninitkristalle (...) als primärmagmatischer Bestandteil des Bärhaldegranits auf und stellen den wichtigsten Uranträger im Granit dar*“ (HOFMANN, S. 33). Die erhöhten Urangehalte (um 14 ppm) im Bärhaldegranit sind im Wesentlichen dem „*magmatischen Uraninit*“ (HOFMANN, S. III) geschuldet. „*Primärer Uraninit ist ein verbreitetes Mineral in Graniten; er wurde im Malsburger Granit [Südschwarzwald] (...) und im Böttsteiner Granit [Nordschweiz] (eigene Untersuchungen) festgestellt*“ (HOFMANN, S. 14). Auch im Schwarzwald besteht das Uranerz nicht aus magmatischem Uraninit. Die eigentlichen U-Erze sind dort hydrothermale Gangbildungen. Während andere Autoren den Bärhaldegranit mit seinem Uraninit als Quelle des Erzmetalls ansprechen (HOFMANN, S. 23), scheinen (mir) auch dort Saproelite die Haupturanlieferanten zu sein.

Uran kann sich also tatsächlich, nicht nur ausnahmsweise und nicht nur geochemisch in sauren Magmatiten anreichern. Zugleich machen die exemplarisch angeführten Urangehalte aber deutlich, dass die magmatischen U-Vorkommen in Deutschland viel zu uranarm sind, um die Parameter einer Lagerstätte zu erreichen.

(Saure) Pegmatite

Pegmatitische Bildungen gehören zum üblichen Inventar vieler (variszischer) Granite. In einigen Pegmatiten Ostbayerns wie am Hühnerkobel bei Rabenstein (Zwiesel) und an der Sägmühle bei Tirschenreuth treten (exogen gebildete) Uranglimmer neben (endogenem) Beryll und Columbit auf (LAUBMANN & STEINMETZ, S. 523). Auch im Hagendorfer Pegmatit waren Uranglimmer keine Seltenheit. Beryll, Niobit und Uranglimmer werden bereits 1920 von Heinrich LAUBMANN und Hermann STEINMETZ (S. 583) als Typminerale dieser Pegmatite hervorgehoben. Endogen-pegmatitische Uranminerale waren dort damals noch nicht gefunden worden (LAUBMANN & STEINMETZ, S. 585). Inzwischen wurde in den Pegmatiten von Hagendorf und am Hühnerkobel Uraninit nachgewiesen. Pegmatite weisen in Deutschland (und weltweit) allerdings nur leicht erhöhte U-Gehalte im Erz und relativ geringe Erzumfänge auf.

Hydrothermogenite

Während hydrothermale U-Vorkommen in Deutschland in großer Anzahl und Vielfalt auftreten, sind pneumatolytische hier (und weltweit) weniger (zahl)reich.

Pneumatolytische Erzstockwerke mit Urananreicherungen sind in einigen porphyrischen (Kupfer-)Lagerstätten außerhalb Deutschlands bekannt. Uran spielt in diesen Erzen bisher aber nur als Nebenkomponente eine Rolle. Hinweise auf skarngebundene U-Vererzungen in Deutschland liegen aus dem Raum Delitzsch (Sachsen) vor. Im Vorkommen von Quering wurden „*phlogopitisierte Skarne innerhalb der oberen karbonatischen Folge des Unterkambriums*“ angetroffen, in denen „*feindispers eingesprengt, thoriumhaltiger Uraninit und Brannerit in Verwachsung mit Rutil und Ilmenit*“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.5, S. 12) auftreten. Th-reiches Uraninit, Ti-Mineralparagenesen und das Skarmilieu an sich weisen auf hochthermale, eben pneumatolytische Prozesse hin. Hydrothermale Erzgänge und -stockwerke, in denen die Erzsubstanz mehr oder weniger weiträumig eingetragen wurde, stellen die bedeutendsten endogenen Uranerzbildungen in Deutschland dar. Als variszische hydrothermale Bildungen gelten die Erzgänge und -stockwerke der Kammquarz-Karbonat-Uran-Formation („kku“ nach der Wismut-Nomenklatur) beziehungsweise der Uran-Quarz-Kalzit-Formation („uqk“ nach der Freiburger Nomenklatur) im Erzgebirge und ihre Analoga in anderen Teilen Deutschlands. Die Mehrzahl der hydrothermalen Uranerzgänge ist (mehr oder weniger offensichtlich) an Sapropelite gebunden, aus denen sie ihr Erzmetall beziehen. Aber auch bei den in Graniten lokalisierten U-Vererzungen wie der Lagerstätte Krunkelbach im Schwarzwald (HOFMANN, S. 23) sind räumliche (und genetische) Beziehungen zu (präkambrischen, kambrischen und silurischen) Schwarzschiefern und Graphitgneisen erkennbar oder zumindest denkbar. Zeitlich noch nicht eindeutig zuordenbar sind die U-Mineralisationen der Magnesiumkarbonat-Uran-Formation („mgu“ nach der Wismut-Nomenklatur), die der Dolomit-Selenid-Formation („dse“) nach der Freiburger Nomenklatur entspricht. Diese Bildungen werden teils als spätvariszisch (BAUMANN et al., S. 65; AUTORENKOLLEKTIV, 1984, S. 56), teils als postvariszisch (BAUMANN et al., S. 82; HILLER & SCHUPPAN, S. 60) gedeutet.

Im Erzgebirge werden die Mineralparagenesen der (sulfidischen) Edlen Braunspat-Formation („eb“) und der (oxidisch-sulfidischen) „dse“ aktuell zur Karbonat-Silber-Antimon-Assoziation zusammengefasst (BAUMANN et al., S. 65). Genetisch aufschlussreich ist dabei die Feststellung: „*Beide Entwicklungen (eb-Typ und dse-Typ) schließen sich in ihrer regionalen Verbreitung gegenseitig weitgehend aus*“ (BAUMANN et al., S. 66). Die räumlich alternierende aber gleichzeitige Entwicklung der „dse“- und der „eb“-Formation ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass ein (zeitlich einheitlicher) hydrothermaler Energieimpuls (räumlich) unterschiedliche Mineralparagenesen hervorbringt in Abhängigkeit davon, ob Lösungen mit hohen Oxidationspotentialen daran beteiligt sind („dse“/„mgu“) oder nicht („eb“). Vom Urangehalt der Edukte (ältere Mineralisationen, Nebengesteine) hängt es dann ab, ob die oxidierenden hydrothermalen Lösungen Uranminerale bilden („mgu“) oder nicht („dse“). In diesem Sinne könnte auch die im spätvariszischen Mineralisationszyklus auf die Quarz-Polymetallsulfid-Assoziation („kb“) folgende Quarz-Hämatit-Assoziation (BAUMANN et al., S. 65) eine uranarme Varietät der (sich nach bisherigem Kenntnisstand daran anschließenden) Uran-Quarz-Calcit-Hämatit-Assoziation („uqk“/„kku“) sein. Dafür spräche auch, dass „*die Quarz-Hämatit-Assoziation (...) bevorzugt als Salbandmineralisation der jüngeren „kku“-Gänge entwickelt*“ (BAUMANN et al., S. 208) ist. Jedenfalls zeigen die spät- und postvariszischen Mineralisationszyklen eine gesetzmäßige geochemisch-metallogenetische Entwicklung, die wesentlich bestimmt wird von einem wellenartigen, zeitlich und räumlich differenzierten Auf und Ab der Energieimpulse und des Redoxpotentials. Uran spielt nur dann eine signifikante metallogenetische Rolle bei den hydrothermalen Prozessen, wenn sich ein hinreichend hohes Oxidationspotential einstellen kann und wenn U-reiche Bildungen (Sapropelite, ältere U-Mineralisationen) daran beteiligt sind.

Chemogenite

Unter den variszischen Chemogeniten finden sich sowohl infiltrative als auch zementative U-Vorkommen in Deutschland.

Zementative Erzlager im Grundgebirge

Im Laufe der variszischen Metallogeneese begann die hypergene Aufbereitung der silurischen Schwarzschiefer mit dem Resultat der Bildung von U-Vorkommen (vom Ronneburger Typ) und zwar dort, wo die Sapropelite damals an der Erdoberfläche lagen und den Atmosphären zugänglich waren. Das tropische Klima begünstigte eine intensive Verwitterung, die wohl am besten mit der Lateritbildung vergleichbar ist. Der Hauptprozess der U-Erzbildung fällt bei den Lagerstätten vom Ronneburger Typ allem Anschein nach in das Rotliegende und damit in variszische Zeit. Derartiger U-Vorkommen (Ronneburger Typ) sind auch an anderen Stellen des Thüringisch-Fränkischen Schiefergebirges bekannt wie bei Dittrichshütte, Steinach (beide in Thüringen) und Ludwigstadt (Nordbayern). Im benachbarten Vogtland liegt das Vorkommen von Hauptmannsgrün-Neumark.

Infiltrative Erzlager im Übergangsgebirge

Wesentlich syngenetisch entstanden die jungpaläozoischen Uran-Kohle-Lager im Döhlener Becken bei Freital in Sachsen. Geologisch analoge Vorkommen finden sich im Stockheimer Becken am Rande des Thüringisch-Fränkischen Schiefergebirges und im Weidener Becken am Rande des Oberpfälzer Waldes.

Bisher wohl noch nicht nachgewiesen aber nicht auszuschließen ist die Bildung von epigenetisch-infiltrativen U-Vorkommen (vom Sandsteintyp) in variszischer Zeit. Da die wenigen bisher vorliegenden Datierungen postvariszische Alter anzeigen, werden diese Bildungen im nächsten Abschnitt aufgeführt.

5.3 Postvariszische U-Anreicherungen (Zechstein – Quartär)

In postvariszischer Zeit führten metallogenetische Aktivierungen zur endogenen (magmatogenen, hydrothermogenen) und exogenen (zementativen, infiltrativen, klastischen) Neubildung und Weiterentwicklung von U-Vorkommen aus älteren Edukten. Postvariszische Erzbildungen sind im prävariszischen Grundgebirge, im variszischen Übergangsgebirge und im postvariszischen Deckgebirge zu finden.

Metallogenetisch am bedeutsamsten sind in postvariszischer Zeit **C h e m o g e n i t e (Infiltrate und Zementite)** sowie **H y d r o t h e r m o g e n i t e (Hydrothermalite)**. Uranreiche **K l a s t o g e n i t e (Seifen)** treten dagegen nur selten auf. Eventuell sind in dieser Zeit auch Uranerze in **M a g m a t o g e n i t e n** entstanden. Jedenfalls hat sich bei Storkwitz im Raum Delitzsch (Sachsen) „eine alpidische Seltene Erden-Niob-Mineralisation mit Uran-Thorium-Begleitung im Gefolge der Formation von ultramafischen Lamprophyren und Karbonatiten“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.5, S. 8) gebildet. Die genetischen Zusammenhänge sind noch nicht geklärt. Der Thoriumreichtum dieser Uranmineralisation und die Begleitparagenesen (Seltene Erden, Niob) sprechen aber für hochthermale (magmatische, pegmatitische oder pneumatolytische) Bildungen.

Chemogenite

In postvariszischer Zeit hat sich Uran in Deutschland sowohl infiltrativ (meist in Biolithen oder Klastiten) als auch zementativ angereichert.

Infiltrative Erzlager

Infiltrative U-Vorkommen finden sich sowohl im Übergangsstockwerk als auch im Deckgebirge. Epigenetisch entstanden sind die schichtgebundenen U-Erze vom Sandsteintyp. Sie kommen oft in (paläo)hydrodynamischen Systemen vom Typ der artesischen Becken vor. Dabei wird eine leichtdurchlässige grobklastische Schicht von schwerdurchlässigen (pelitischen oder magmatischen) Gesteinen im Hangenden und Liegenden abgedichtet. Viele Erzkörper erinnern morphologisch (und genetisch) an den Rollfront-Typ. Syngenetische U-Anreicherungen sind bevorzugt an Biolithe und Phosphorite gebunden.

Für die Bildung postvariszischer infiltrativer Erzlager eignen sich Nebengesteine unterschiedlichen Alters:

- Karbon

Zu den ältesten Nebengesteinen von Uranmineralisationen dieser Art zählen in Deutschland karbonische Sedimente. Im Vorkommen von Kyhna-Schenkenberg bei Delitzsch in Sachsen liegen solche (angeblich hydrothermalen) U-Vererzungen im Umfeld eines „Plagiogranitporphyrs“: „Die Vererzung ist hauptsächlich in unter- bis frühoberkarbonischen Frühmolasse-Sedimenten des variszischen tektonischen Zyklus (Klitschmarer Schichten) im Dach (Erzvorkommen Kyhna) bzw. unter dem Liegendkontakt (Erzvorkommen Schenkenberg) des Plagiogranitporphyrkörpers lokalisiert. Eine bedeutsame Rolle bei der Erzausfällung spielten stärker kohlenstoffhaltige Gesteinsvarietäten (kohlige Ton- und Schluffsteine) und die zumeist gestörten, flach einfallenden Kontakte der Sedimente gegen den Plagiogranitporphyrlakkolithen“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.5, S. 6). Die kohlig Substanzen in den Gesteinen wirken als Reduktionsbarrieren, an denen das (offenbar exogen-infiltrativ eingetragene) Uran reduziert und ausgefällt wurde.

Um eine ähnliche Vererzung in oberkarbonischen Gesteinen handelt es sich wohl bei dem Vorkommen von Müllenbach bei Baden-Baden. Auch dieses Vorkommen sprechen einige Autoren als hydrothermale Imprägnation an (Zuther, 1983). Andere (H. J. Ertle, 1976) sehen darin eine sedimentäre Vererzung. Genauer gesagt handelt es sich um eine epigenetische Infiltrationsvererzung. Belege dafür sind Bildungen vom Rollfront-Typ, die im Steckbrief dieses Vorkommens erwähnt werden: „Pechblende-Vererzung als Rollfront in Arkosen, schichtgebunden“ (FRITSCH & SCHMITZ, S. 277). Zwei Altersbestimmungen von Pechblenden (239 und 160 Ma, PFAFF et al., S. 833), erhärten die epigenetische (und mehrphasige) Genese der U-Erze von Müllenbach.

- Unterperm

Das U-Vorkommen von Ellweiler am Bühlkopf wurde von 1956 bis 1965 Uranerz im Tagebau abgebaut. Die Vererzung dieser ehemaligen Lagerstätte ist an Konglomerate des Unterrotliegenden (Kuseler Schichten) gebunden. Die „Porphyre“ und ihre Apophysen sind in der Regel erzfrei. Die Erze bestehen aus den (angeblich hydrothermal gebildeten) Mineralen Uranpecherz, Coffinit, Pyrit und Chalkopyrit. Auch Hämatit kommt vor. Alle genannten Minerale können auch exogen entstehen, was hier wohl naheliegender ist. In Oberflächennähe treten darüber hinaus Torbernit und Autunit auf. Genetisch ist dieses Vorkommen ein Infiltrat.

- Oberperm

In Sedimenten des Zechsteins liegen die Uranerzlager von Sorge, Culmitzsch, Gauern und Gera-Süd in Thüringen: „Im Normalprofil (Culmitzsch, Gauern, Gera-Süd) beginnen die Ablagerungen mit einem 0–6 m mächtigen, grauen Basiskonglomerat (BK) und konglomeratischen Sandsteinen mit einem nur kantengerundeten Geröllbestand von Tonschiefern, Phylliten, Quarz, Quarziten des unmittelbaren Untergrundes. Selten wurden Lydit, Grauwacken, Diabas, Granit, Quarzporphyr und Orthoklas beobachtet. Das sandige, oft karbonatische

Bindemittel enthält in der abgebauten Lagerstätte Culmitzsch besonders in tieferen Rinnen eine Uranvererzung, die mit einer Sulfidmineralisation verbunden war. Im Nordteil wurden 40 inkohlte Coniferenstämme mit einer intensiven Pechblende-Bleiglanzprägung gefunden“ (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.13, S. 6).

Uranvererzungen finden sich in der Unteren Grauen Folge („Unterer Uranerzhorizont“) über dem Zechstein-Basiskonglomerat und in der Oberen Grauen Folge („Oberer Uranerzhorizont“). In den Grauen Folgen treten Pflanzenhäcksel und -reste auf. Das Uran stammt wohl überwiegend aus dem Geraer Vorsprung.

- Trias

Infiltrative Anreicherungen von Uran (zusammen mit V, Cu, Pb, Co, Ni, As, Ag und Bi) sind im Buntsandstein bei Schleusingen bekannt (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.12.3, S. 4). Ihr absolutes Alter (20-58 Mio. Jahre) kennzeichnet sie erwartungsgemäß als epigenetische Bildungen.

Im fränkischen Keuper weisen phosphatreiche Lagen synsedimentär(-diagenetisch)e Urananomalien auf. In den uranreichen „Aktiv-Arkosen“ des Mittleren Burgsandsteins (Keuper) im Nürnberger Reichswald wurde klastischer Apatit als „Uran-Fänger“ identifiziert (BAIER).

- Jura

Phosphoritführende Horizonte im Jura (Dogger, Malm) sind in Süddeutschland lokal schwach mit Uran angereichert.

- Kreide

An (jurassisch-)kretazische phosphoritführende Transgressionshorizonte (Hauterive, Alb, Cenoman, Maastricht) sind in Norddeutschland (NO-Brandenburg, Vorpommern) Urananomalien gebunden (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.1, S. 1). Neben Phosphoritkonkretionen treten darin phosphatisierte Holzreste als „Uransammler“ auf. Die Urangelhalte liegen allerdings nur zwischen 40 und 200 g/t (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.1, S. 3).

Reichere Uranlagerstätten haben sich in kreidezeitlichen Sandsteinen bei Königstein in Sachsen gebildet.

- Tertiär

Metallogenetisch ähnlich entstanden wie die variszischen „Aktiv-Kohlen“ sind Urananomalien in Braunkohlen wie bei Wackersdorf.

Zementative Erzstockwerke

U-Vorkommen dieser genetischen Gruppe entstehen sowohl in der Zementationszone (U^{IV}-Minerale wie Uranschwärze, Pechblende, Coffinit) als auch in der Oxidationszone (U^{VI}-Minerale wie Uranglimmer). Zementationszonen-Erze sind bevorzugt an die (uranreichen) silurischen Schwarzschiefer gebunden, Oxidationszonen-Erze an saure Magmatite.

Die U-Vorkommen vom Ronneburger Typ können sich in postvariszischer Zeit (Kreide/Tertiär) zementativ weiterentwickelt haben.

In vielen sauren Magmatiten (Granite, Rhyolithe) sind zementative Anreicherungen von Uran zu beobachten bis hin zur Bildung von Oxidationszonen-U-Vorkommen. Nach den dort vorherrschenden, optisch auffälligen Erzmineralen wird diese Art von Vorkommen Uranglimmertyp genannt. Das U-Vorkommen von Rudolfstein im Fichtelgebirge, wo die Hauptvererzung aus Uranglimmern besteht, ist ein Beispiel für diesen Typ. Auch kleine Urananomalien in Graniten verraten ihre Anwesenheit oft durch Uranglimmer. So gehört Torbernit im Granitsteinbruch Henneberg (Thüringer Schiefergebirge) zu den häufigsten Uranmineralen und bei der Auffahrung des Wasserableitungsstollens (1978-1981) der Talsperre Eibenstock, der 5 km durch den Eibenstocker Granit verläuft, wurden 16 an tektonische Zonen gebundene Mineralisationen mit Uranglimmern (Torbernit, Autunit) angetroffen (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.12, S. 31).

Zementative Umlagerungen größerer Mengen von Uran aus hydrothermalen Erzgängen werden in einer Lagerstätte bei Johanngeorgenstadt (Seifenbach) im Westerbirge vermutet: *„Die Vererzung war aufgrund ihrer morphologischen und mineralogischen Ausbildung als infiltrativ zu deuten. Die Umlagerung hydrothermalen Gangvererzung aus dem erodierten Teil der Lagerstätte ist wahrscheinlich“*

(AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.2.8.5, S. 4). Diese an sich nicht ungewöhnliche, in ihrer Intensität aber doch seltenere Bildung wird zu den Zementiten gestellt, da das Uran dort zementativ (engräumig) umgelagert, nicht infiltrativ (weiträumig) eingetragen wurde und da die Zementation der Haupterzbildungsprozess war (worüber man streiten könnte).

Erhöhte U-Gehalte und Abscheidungen von Uranerzen sind auch in „Porphyren“ und (Epi-)Syeniten bekannt. Relativ gründlich untersucht worden ist das Erzvorkommen im Rhyolith („Liparitporphyr“) von Oberschöna im Thüringer Wald westlich von Oberhof. Die U-Erze sind dort an Störungen und Klüfte im Rhyolith gebunden.

Die (kleinen) Erzkörper liegen dicht an der Erdoberfläche. Die Vererzung besteht im Wesentlichen aus Uranglimmern (Carnotit, Zeunerit, Uranospinit, Torbernit). Die vererzten Klüfte und Störungen umgibt eine „hydrothermale Aureole“ der Argillitisierung. In ihr sind Feldspäte zu Hydroglimmern und Kaolinit umgewandelt worden. Darüber hinaus ist eine „autosomatische“ Verquarzung, Bleichung, Hämatitisierung der Nebengesteine zu beobachten (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.17, S. 9 ff.). Alle diese (angeblich hydrothermalen) Erscheinungen können ebenso gut exogen entstanden sein. Für eine exogene Genese dieser Vererzungen und ihrer Begleiterscheinungen sprechen auch ihre räumliche Begrenzung auf erdoberflächennahe Bereiche der „Porphyre“ sowie das „wurzellose“ Auskeilen der Erzkörper und der Aureolen der

Gesteinsveränderungen nach unten. Das Uran dieser Vererzungen stammt wohl überwiegend aus den Rhyolithen selbst. So werden für „Porphyre“ im Gebiet Pappenheim durchschnittliche Urangelhalte von 19 g/t angegeben (AUTORENKOLLEKTIV, 2002, 2.1.17, S. 16).

Auch im (saproelitischen) Kupferschiefer finden sich U-Anreicherungen. Im Mansfelder und Sangerhäuser Revier kommen im Grenzbereich von Grober und Feiner Lette („Körnige Naht“) Bitumenkügelchen vor, die mit Uran angereichert sind. Die Bergleute nannten sie Erdpechhieken oder Mauseugen, bei denen es sich um zementative Bildungen handelt. Die Oxidationsfront der Roten Fäule bietet geochemisch beste Voraussetzungen für die Mobilisation von Uran aus den bituminösen Kupferschiefern, die in mehr oder weniger unverändertem Zustand zugleich ein günstiges Medium für seine Ablagerung sind. Die Entwicklung der U-Vererzung bleibt aber begrenzt, da die Uranquelle (Kupferschiefer) nur wenige Dezimeter mächtig und relativ schwach mit Uran angereichert ist.

Auch wenn zementative Umlagerungen von Uranerzen praktisch in allen erdoberflächennahen (Teilen von) U-Lagerstätten zu beobachten sind, so beeinflussen sie deren Genese doch nur in relativ wenigen Vorkommen wesentlich und damit bestimmend für ihre Klassifizierung als Zementite.

Hydrothermogenite

Zweifelsfrei postvariszisch entstanden die hydrothermalen U-Mineralisationen der „biconi“-Formation. Das belegen vor allem paragenetische Beobachtungen und absolute Mineralalter.

Noch nicht sicher geklärt ist das Alter der „mgu“-Formation. Eventuell erstreckte sich die Bildung dieser (wahrscheinlich spätvariszischen) Mineralparagenesen bis in die postvariszische Zeit hinein (HILLER & SCHUPPAN, S. 60; BAUMANN et al., S. 70, 82).

Die Verbreitung der postvariszischen hydrothermalen U-Erzgänge scheint auf das Grundgebirge beschränkt zu sein, obwohl sie theoretisch auch im Deckgebirge auftreten könnten. Ein Grund für ihre bevorzugte Lage im Grundgebirge könnte sein, dass in den jüngeren („mgu“- und „biconi“-)Gängen nur das aus älteren („kku“) mobilisierte Uran zur Ablagerung kam und dass diese Umlagerungen nur räumlich begrenzt erfolgt sind. Nicht selten liegen alte („kku“) und junge Bildungen („mgu“, „biconi“) in ein und demselben Gang (Teleskopung). Auf Grund der generell (aszendent) aufsteigenden Bewegung der hydrothermalen Lösungen ergibt sich innerhalb der Bi-Co-Ni-Ag-U-Formation eine vertikale Zonalität von Ag-reichen Erzen (oben) über Bi-Co-Ni-reiche Erze (darunter) zu Uranerzen (noch weiter unten), die in vielen Ganglagerstätten zu beobachten ist. Dieselben Gründe müssten auch zwischen den U-reichen Formationen tendenziell zu einer Zonalität von „biconi“ (oben) über „mgu“ (darunter) zur „kku“ (ganz unten) führen. Diese Zonalität kann als Suchkriterium genutzt werden nach dem Vorbild von Franz Kirchheimer, der für den Sophia-Gangzug im Schwarzwald unter der „biconi“-Vererzung „*unbekannte Mengen reicher Uranerze*“ (KIRCHHEIMER, S. 64) postuliert.

Klastogenite

Uranmineralführende (Paläo-)Seifen sind in Deutschland zwar bekannt (etwa in cenomanen Basissedimenten des sächsisch-böhmischen Kreidebeckens), erreichen aber nicht die Konditionen einer Lagerstätte.

5.4 Metallogenetisches Schema

Zusammenfassend ergibt sich für Deutschland nach gegenwärtigem Kenntnisstand das in Tabelle 2 dargestellte metallogenetische Schema der Bildung von U-Vorkommen.

Tab. 2: Metallogenetisches Schema der Uranvorkommen in Deutschland

Zeitabfolge	Genetischer U-Erztyp	Morphogenetischer U-Erztyp		
		Lager	Stockwerke	Gänge
Quartär				
Tertiär	Infiltrate, epigenetische	Rollfrontartige Lager im Buntsandstein		
	Infiltrate, syngenetische	Kohlen		
	Zementite		Imprägnations- und Klüfterze in Kreidesandsteinen	
Kreide	Hydrothermalite			„biconi“-Gänge
	Infiltrate, epigenetische	Rollfrontartige Lager in Kreidestandsteinen		
	Klastite	Seifen in Kreidestandsteinen		
Jura	Hydrothermalite			„mgu“-Gänge und Analoga
Trias				
Zechstein	Infiltrate	Erzlager in den Grauen Folgen		„kku“-Gänge und Analoga
Karbon-Rotliegend	Infiltrate, epigenetische	Rollfrontartige Lager in Molassen		
	Infiltrate, syngenetische	Kohlen		
	Zementite		Erze vom Ronneburger Typ	
	Hydrothermalite			
	Pneumatolyte		Skarne	
	Pegmatite		Pegmatite	
	Magmatite		Granitoide, Syenite, Rhyolithe	
Devon				
Silur	Infiltrate, syngenetische	Schwarzschiefer		
Ordovizium				
Kambrium	Infiltrate, syngenetische	Schwarzschiefer		
Präkambrium	Infiltrate, syngenetische	Schwarzschiefer und Graphitgneise		

Grau unterlegt sind Typen von U-Vorkommen, die auch als Lagerstätten in Abbau standen. Einige schwächere Urananreicherungen (etwa in Phosphoriten) sind hier nicht aufgeführt. Die chronologische Zuordnung und Reihenfolge einiger U-Erztypen (vor allem innerhalb einzelner Intervalle der Zeitabfolge) ist teilweise noch unsicher.

6. Resümee

- Weltweit sind **saure Magmatogenite** die (erdgeschichtlich älteste) „Urquelle“ der Uranvorkommen. In ihnen vollzieht sich eine metallogenetisch relativ schwache aber signifikante Anreicherung des Urans, die im Mittel bei 4-5 g/t und damit über den Werten der kontinentalen (2,5 g/t) und der ozeanischen Erdkruste (0,5 g/t) liegt. Diese extensive Anreicherung beruht auf den lithophilen Eigenschaften und dem inkompatiblen Verhalten des Urans in magmatischen Schmelzen.

- Im Ergebnis von Verwitterungsprozessen haben sich saure Magmatogenite zu infiltrativen, zementativen und klastischen U-Anreicherungen weiterentwickelt. Von besonderer metallogenetischer Bedeutung unter diesen

Bildungen sind (infiltrativ entstehende) **Sapropelite**, da sie Uran relativ hoch und für epigenetische Prozesse leicht verfügbar anreichern können.

- Sapropelite sind (allem Anschein nach) eine notwendige Voraussetzung für die Bildung der (am höchsten angereicherten) hydrothermalen U-Vorkommen. Das Uran der **Hydrothermalite** – der wirtschaftlich weltweit bedeutendsten Gruppe von U-Lagerstätten – stammt im Wesentlichen aus Sapropeliten, nicht (direkt) aus Graniten, nicht aus (deren) magmatischen Restlösungen und nicht aus imaginären „Tiefen der Erdkruste“. Eine weitere notwendige Voraussetzung für die Bildung hydrothermalen U-Vorkommen ist ein hinreichend hohes Oxidationspotential der erzbildenden Fluide. Da die (aszendent) aufsteigenden Wärme- und Fluidströme ihrer Herkunft nach zumindest in ihren Kernbereichen generell reduzierende (und damit für die hydrothermale Mobilisation und Migration von Uran ungünstige) Milieus bilden, sind für die Genese von U-Hydrothermaliten insbesondere weniger tiefe und periphere Bereiche der erzbildenden Systeme geeignet, wo oxidierende (und damit uranmobilisierende) Fluide deszendenter-lateraler Zugang finden können.

Zu diesem Modell der zeitlich und räumlich differenzierten Erhöhung des Oxidationspotentials bei der hydrothermalen U-Erzbildung passt die Vorstellung von großräumig verteilten metallogenetischen Energieimpulsen, die je nach den (vor allem stofflichen und thermodynamischen) Eigenschaften der jeweils beteiligten Fluide und Nebengesteine diese oder jene Mineralparagenesen hervorbringen und so das zeitliche Nacheinander und räumliche Nebeneinander der Mineralisationen jedes einzelnen, mehr oder weniger isoliert betrachteten Rohstoffs oder gar Vorkommens zu einem großen genetischen Ganzen verbinden. Dabei könnte sich beispielsweise herausstellen, dass die Uran-Quarz-Karbonat- („uqk“-) Assoziation, die (in Deutschland) nach der Quarz-Polymetall- („kb“-) und vor der Karbonatischen Silber-Sulfid- („eb“-) Assoziation entstand, vielleicht ein oxidatives „Nachspiel“ der „kb“- oder „Vorspiel“ der „eb“- oder „Intermezzo“ einer integrierten „kb“- „eb“- Assoziation im Sinne der aktuellen Deutung der „eq“-Assoziation (BAUMANN et al., S. 98) ist.

- Diese Arbeit versteht sich auch als ein Beitrag zur Würdigung des Modells der „**Lateralsekretion**“ und der diesbezüglichen Pionierarbeiten von Christoph Traugott Delius (1770) und Fridolin von Sandberger (1880).

Danksagung

Mein aufrichtiger, herzlicher Dank gebührt meiner Ehefrau Karin Schade(†), die mich trotz ihrer lebensbedrohlichen Erkrankung zum Schreiben dieses Beitrages angeregt und mir dafür zeitliche Freiräume geschaffen hat, solange sie noch konnte. Nur so war es mir möglich, über dieses für das tägliche Leben weitgehend belanglose Thema in hinreichender Ruhe nachzudenken.

Dankbar bin ich auch Herrn Hermann Josef Giesen (Eschweiler), der es auf sich genommen hat, aus meiner Ideenskizze mit viel fachlichem Gespür und graphischer Kreativität die Reinzeichnung der Abbildung 2 anzufertigen und dabei meine (mehrfachen) Korrekturwünsche geduldig umzusetzen.

Literaturverzeichnis:

AUTORENKOLLEKTIV (1984): Uranlagerstätten der Tschechoslowakei [russ.]. – „Nedra“, 445 S., Moskau.

AUTORENKOLLEKTIV (2002): Chronik der Wismut. – CD-ROM, 2 739 S., Wismut GmbH, Chemnitz.

AUTORENTEAM (1966): De Uraniumvoorraden in de Europese Gemeenschap. – EUR 2961.n, Europese Gemeenschap voor Atoomenergie, Euratom, Voorzieningsagentschap, 40 S., Brüssel.

AUTORENTEAM (1984): Uranerzförderung in der Bundesrepublik Deutschland. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sauerlich, Frau Reetz und der Fraktion DIE GRÜNEN. – Deutscher Bundestag, Drucksache 10/861 – Drucksache 10/943, 8 S.

AUTORENTEAM (1986): Vein Type Uranium Deposits. – Report of the working group on uranium geology organized by the International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-361, 423 S., Wien.

AUTORENTEAM (2009): World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposit Classification. – IAEA-TECDOC-1629, 117 S., Wien.

BAIER, A. (2004): Geogene und anthropogene Beeinflussungen zweier naturnaher Fließgewässer am Südrand des Nürnberger Beckens. – Geol. Bl. NO-Bayern, 54, 1-4, S. 101-168, Erlangen.

- BAUMANN, L.; KUSCHKA, E. & SEIFERT, T. (2000): Lagerstätten des Erzgebirges. – Enke im Georg Thieme Verlag, 300 S., Stuttgart.
- BOYLE, R. W. (1982): Geochemical Prospecting for Thorium and Uranium Deposits. – Developments in economic geology, 16, Elsevier Scientific Publishing Company, 498 S., Amsterdam.
- BRÜCKMANN, F. E. (1727): *Magnalia Dei In Locis Subterraneis Oder Unterirdische Schatz-Cammer Aller Königreiche und Länder.* – 328 S., Braunschweig.
- BÜLTEMANN, H. W. & BÜLTEMANN, W. D. (1986): The Uranium Deposit 'Krunkelbach' in the Southern Black Forest, Federal Republic of Germany. – Vein Type Uranium Deposits, IAEA-TECDOC-361, S. 247-260, Wien.
- DILL, H. (1985): Genesis and Timing of Secondary Uranium Mineralization in Northern Bavaria (F. R. of Germany) with Special Reference to Geomorphology. – Uranium, 2, Elsevier Science Publishers B. V., S. 1-16, Amsterdam.
- DILL, H. G. (1986): Fault-Controlled Uranium Black Ore Mineralization from the Western Edge of the Bohemian Massif (NE Bavaria, FR Germany). – Vein Type Uranium Deposits, IAEA-TECDOC-361, S. 275-291, Wien.
- DILL, H. G. & KOLB, S. G. (1986): The Großschloppen-Hebanz Uranium Occurrences - a Prototype of Mineralized Structure Zones Characterized by Desilicification and Silicification. – Vein Type Uranium Deposits, IAEA-TECDOC-361, S. 261-274, Wien.
- FRITSCH, R. & SCHMITZ, J. (1996): Bestandsaufnahme von Rückstandshalden aus Bergbau und Erzaufbereitung in Baden-Württemberg. Band I: Nördlicher Teil. – Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5768B, 340 S., Karlsruhe.
- GEZEWA, R. W. (1958): Zur Charakteristik des sedimentär-metamorphen Typs der Uranvererzung. – Zeitschrift für angewandte Geologie, Band 4, Heft 10, S. 458-466, Berlin.
- GOTTE, W. (1985): Lagerstätten als Bestandteile geologischer Einheiten – Konsequenzen für die Erkundung und Bewertung. Ganglagerstätten und ihre Nebengesteine. – Zeitschrift für angewandte Geologie, Band 31, Heft 8, S. 199-207, Berlin.
- HILLER, A. & SCHUPPAN, W. (2008): Geologie und Uranbergbau im Revier Schlema-Alberoda. – Bergbau in Sachsen, Band 14, Bergbaumonographie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsisches Oberbergamt, 171 S., Freiberg.
- HOFMANN, B. (1989): Genese, Alteration und rezentes Fliess-System der Uranlagerstätte Krunkelbach (Menzenschwand, Südschwarzwald). – Nagra, Technischer Bericht 88-30, 195 S., Baden, Schweiz.
- ILGNER, E.-M. & HAHN, W. (1998): Die Schwerspatlagerstätte Brunndöbra und das Schwerspatvorkommen Schnarrtanne im Ostvogtland/Westerzgebirge. – Bergbau in Sachsen, Band 5, Bergbaumonographie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsisches Oberbergamt, 114 S., Freiberg.
- KASANSKI, V. I.; LAWEROW, N. P. & TUGARINOW, A. I. (1978): Evolution der Uran-Erzbildung [russ.]. – "Atomisdat", 208 S., Moskau.
- KENTMANN, J. (1566): *Arca Rerum Fossilium Ioan. Kentmani.* – In: *De Omni Rerum Fossilium Genere, Gemmis, Lapidibus, Metallis, Et Huiusmodi, Libri Aliquot*, 95 S., Tiguri (Zürich).
- KIEBLING, F. & DILL, H. (1990): Die Geschichte des Urans in Nordbayern. Teil I. – Bergbau, 41, S. 415-421, Zürich.
- KIRCHHEIMER, F. (1951): Die Uranvorkommen im mittleren Schwarzwald. – Mitteilungsblatt der Badischen Geologischen Landesanstalt, S. 1-74, Freiburg i. B.
- LAUBMANN, H. & STEINMETZ, H. (1920): Phosphatführende Pegmatite des Oberpfälzer und Bayrischen Waldes. – Zeitschrift für Kristallographie, 55, S. 523-586, Leipzig.

- LEHMANN, B. (2008): Uran-Lagerstätten. – Berichte zur Rohstoffgeologie, Ausgabe 02, Technische Universität Clausthal, S. 16-26, Clausthal.
- LIPP, U. (2003): Wismut-, Kobalt-, Nickel- und Silbererze im Nordteil des Schneeberger Lagerstättenbezirkes. – Bergbau in Sachsen, Band 70, Bergbaumonographie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsisches Oberbergamt, 209 S., Dresden, Freiberg.
- MCKAY, A. D. & MIEZITIS, Y. (2001): Australia's uranium resources, geology and development of deposits. – AGSO – Geoscience Australia, Mineral Resource Report 1, 184 S., Canberra.
- MELKOW, W. G.; PUCHALSKI, L. T. & GERMANOW, A. I. (1957): Uranlagerstättensuche [russ.]. – „Gosgeoltechisdat“, 219 S., Moskau.
- MEIER, S. (2012): Montanhistorische Exkursion. Der Zinnerzbergbau im Fichtelgebirge. – <http://www.fichtelgebirgs-mineralien.de/media/4030f31e54ff12cdf803affffffef.pdf>, 8 S., Marktredwitz.
- PFAFF, K.; ROMER, R. L. & Markl, G. (2009): U-Pb ages of ferberite, chalcedony, agate, 'U-mica' and pitchblende: constraints on the mineralization history of the Schwarzwald ore district. – Eur. J. Mineral., 21, S. 817-836.
- POTY, B.; LEROY, J.; CATHELINEAU, M.; CUNNEY, M.; FRIEDRICH, M.; LESPINASSE, M. & TURPIN, L. (1986): Uranium Deposits Spatially Related to Granites in the French Part of the Hercynian Orogen. – Vein Type Uranium Deposits, IAEA-TECDOC-361, S. 215-246, Wien.
- SCHADE, M. (1982): Zur thermodynamischen Analyse des geochemischen Verhaltens des Urans in der Hypergenesezone. – Z. angew. Geol., Bd. 28, S. 524-530, Berlin.
- SCHADE, M. (1984): Die Rolle hypergener Prozesse bei der Bildung der Uran-Lagerstätten des Ronneburger Erzfeldes [russ.]. – Dissertation unveröffentlicht, 4 Exemplare, "MGRI", 202 S., Moskau.
- SCHADE, M. (2014): Gold- und Platinoid-Vorkommen in Deutschland. – Eigenverlag, 499 S., Theuern.
- SCHNEIDERHÖHN, H. (1951): Vergleich der Uranvorkommen des mittleren Schwarzwaldes mit anderen Lagerstätten. – Mitteilungsblatt der Badischen Geologischen Landesanstalt, S. 84-105, Freiburg i. B.
- SCHWARZMAIER, H.; TADDEY, G. & MERTENS, D. [Hrsg.] (2007): Handbuch der baden-württembergischen Geschichte, Band 5. – Klett-Cotta, 1001 S., Stuttgart.
- SEBASTIAN, U. (2013): Die Geologie des Erzgebirges. – Springer Verlag, 270 S., Berlin Heidelberg.
- SØRENSEN, E & LUNDGAARD, T. (1966): Selektive Flotation of Steenstrupine and Monazite from Kvanefjeld Lujavrite. – Danish Atomic Energy Commission, Risø Report No. 133, 17 S., Kopenhagen.
- SZUROWSKI, H.; WEISE, W. & SCHADE, M. (1978): Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen hypergenen Gesteinsveränderungen und der Uranvererzung im Ronneburger Erzfeld. – SDAG Wismut, unveröffentlichter Bericht, Gera.
- TONNDORF, H. (2000): Die Uranlagerstätte Königstein. – Bergbau in Sachsen, Band 7, Bergbaumonographie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsisches Oberbergamt, 208 S., Freiberg.
- WIMMENAUER, W. (1951): Mikroskopische Untersuchungen an Uranerzen aus dem mittleren Schwarzwald. – Mitteilungsblatt der Badischen Geologischen Landesanstalt, S. 75-83, Freiburg i. B.
- WNA (World Nuclear Association) (2010): Geology of Uranium Deposits. – <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Geology-of-Uranium-Deposits/>.
- WOLFSON, F. I. (1978): Hydrothermale Uran-Lagerstätten [russ.]. – „Nedra“, 446 S.; Moskau