

Uran-Lagerstätten

Uran-Lagerstätten treten in vielerlei geologischen Milieus auf. Die gegenwärtig wirtschaftlich wichtigsten Lagerstättentypen sind proterozoische Diskordanz-Lagerstätten (hauptsächlich in Kanada und Australien), „Roll front“-Lagerstätten in mesozoisch-känozoischen Sandsteinen (Kasachstan und USA), und IOCG („Iron Oxide-Copper-Gold“-Lagerstätten in hämatitischen Granit-Brekzien, in denen Uran als Beiprodukt von Kupfer-Bergbau auftritt (Olympic Dam, Australien). Der elementare Hintergrund der Uran-Lagerstättenbildung ist bestimmt durch die gute Löslichkeit von sechswertigem Uran in wässrigen Lösungen, und die konträr hierzu sehr geringe Löslichkeit im vierwertigen Zustand. Dies erlaubt grossräumige Auslaugung von Uran durch oxidierende meteorische und Formations-Wässer, und Ausfällung von Uraninit (UO_2 , auch als Pechblende bekannt) an Redox-Fronten. Evapotranspiration unter ariden Klimabedingungen kann zur Bildung von oberflächennahen „Calcrete“-Lagerstätten führen (Namibia und Australien). Paläo-Seifen von klastischem Uraninit sind auf das späte Archaikum bis frühes Proterozoikum beschränkt und enthalten sehr grosse Ressourcen bei niedrigem Uran-Gehalt (Südafrika, Kanada). Die heute bekannten Uran-Ressourcen der Erde genügen für die Stromerzeugung aus Nuklearenergie für rund 100 Jahre. Fortgeschrittenere Kernkraft-Technologien können die Lebensdauer auf mehr als 1000 Jahre erweitern.

Einführung

Uran wird im wesentlichen zur Stromerzeugung in Kernreaktoren verwendet, nach einer ersten Periode von 1945-1960, in der der militärische Bedarf für Kernwaffen im Vordergrund stand. Die zivile Nutzung von Kernenergie begann mit sehr starken Zuwachsraten in den 1960er Jahren, und ist seit dem Chernobyl-Reaktorunfall 1986 in der Ukraine auf etwa gleich bleibendem Niveau. Rund 35 % der Elektrizität in der Europäischen Union werden heute aus Kernenergie gewonnen, aber seit etwa 20 Jahren wurden keine neuen Reaktoren in Betrieb genommen. Gegenwärtig hat das Interesse an Kernenergie weltweit wieder zugenommen, da diese Form der Energiegewinnung Klima-neutral ist und punktuelle Stromerzeugung im grossen Stil bei im Vergleich zu anderen Techniken günstigen Kosten erlaubt. AREVA,

der französische Weltmarktführer für Kernreaktoren, baut zur Zeit zwei EPR-Kernreaktoren der dritten Generation („European Pressurised Water Reactor“) in China, sowie einen weiteren 1,6-GW-Reaktor in Finnland. Die größeren Industrienationen entwickeln zur Zeit Reaktoren der vierten Generation, die mit schnellen Neutronen arbeiten, und eine um mehrere Grössenordnungen höhere Effizienz haben als die konventionelle Technik. ►

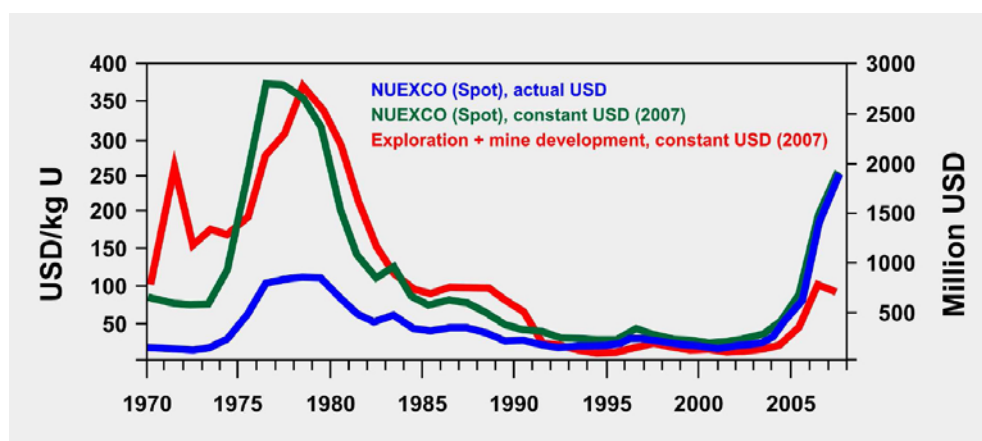


Abb. 1: Spot-Preis für Uran und Ausgaben für Exploration und Bergbauentwicklung. (Quelle: Nuclear Energy Agency 2008).

Solche Kernenergie-Systeme werden langfristig vermutlich eine wichtige Rolle in der Welt-Energiebilanz spielen.

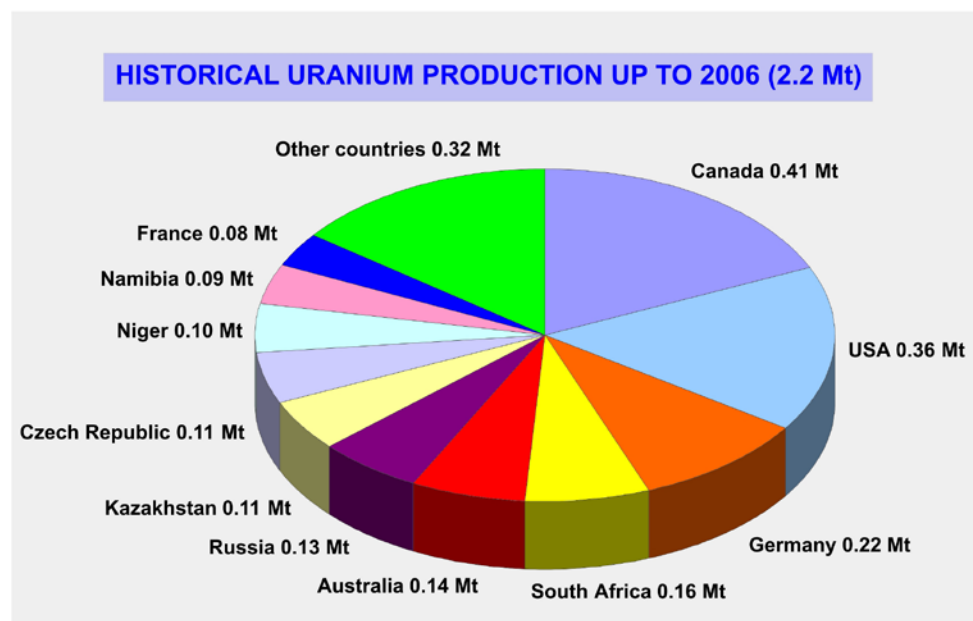
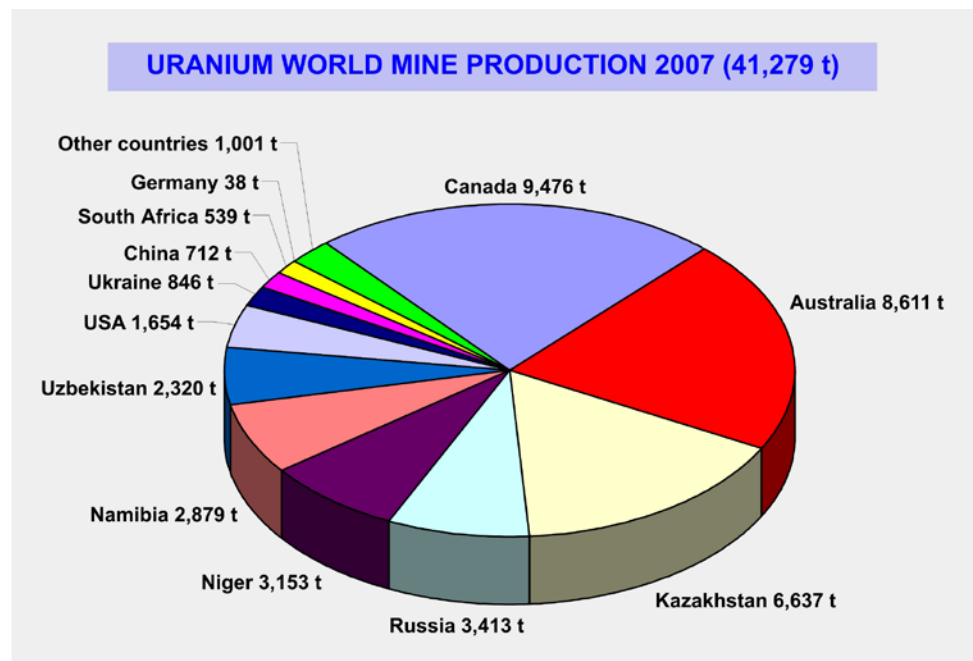
Gegenwärtig erlebt die Exploration auf Uran-Lagerstätten einen Boom, mit globalen Ausgaben in 2007 von rund 720 Millionen USD (**Abb. 1**), nachdem dieser Bereich rund 20 Jahre lang auf sehr niedrigem Niveau stagnierte.

Natürliches Uran besteht im wesentlichen aus zwei Isotopen, ^{238}U mit einer Häufigkeit von 99,3 % und ^{235}U mit einer Häufigkeit von 0,7 %, die beide langsam auf stabiles ^{206}Pb beziehungsweise ^{207}Pb zerfallen ($T_{1/2}$ ^{238}U 4,5 Ga; $T_{1/2}$ ^{235}U 710 Ma). Nur ^{235}U kann in konventionellen Kernreaktoren zur Energienutzung verwendet werden, und die meisten Reaktoren (Leichtwasser-Reaktoren) verwenden angereichertes Uran, in dem das ^{235}U -Isotop auf 3-5 Gew.% angereichert wurde (zum Vergleich: Uran für Nuklearwaffen muss auf mindestens 90 Gew.% ^{235}U angereichert sein). Der Welt-Verbrauch von natürlichem Uran (nicht angereichert) für die insgesamt 439 in Betrieb stehenden Reaktoren (September 2008) liegt bei etwa 65.000 t U pro Jahr, aus dem 2.600 TWh (1 TWh = 1 Milliarde KWh) Strom erzeugt werden, äquivalent zu 16 % der Welt-Stromerzeugung.

Die Bergbauproduktion von Uran in 2007 ist in **Abb. 2** gezeigt, wobei Kanada (23 %), Australien (21 %) und Kasachstan (16 %) dominieren. Deutschland hat 0,1 % beigetragen, die aus Entwässerung von ehemaligen Uran-Bergbaubetrieben in Ost-Deutschland stammen. Historisch haben Ost-Deutschland und die Tschechei während den Zeiten der DDR und der Tschechoslowakei wesentlich für das sowjetische Kernwaffen-Arsenal produziert. Seit den 1990er Jahren besteht eine deutliche Differenz zwischen Uran-Verbrauch (65.000 t U/a) und Uran-Bergbauproduktion (41.300 t U/a), die durch Auflösung der militärischen Depots der USA und Russlands sowie durch Wiederaufarbeitung von Brennstäben gedeckt wird (**Abb. 3**).

Abb. 2:
Heutige und historische Uran-Bergbauproduktion.

Die gegenwärtig identifizierten Uran-Ressourcen genügen sowohl für die Lebensdauer der heutigen Kernkraftwerke sowie für eine bis 2030 um bis zu 80 % erwartete Kernkraftwerks-Expansion für rund hundert Jahre. Engpässe im Angebot sind allerdings möglich, nach der langen Zeit der Stagnation des Uranmarkts bei sehr niedrigen Preisen, die Exploration und Bergbauentwicklung unrentabel machten. Einsatz von fortgeschrittener Reaktortechnik und Brennstoff-Wiederaufarbeitung könnte die Verfügbarkeit von Nuklearenergie von etwa einem Jahrhundert auf ein Jahrtausend verlängern. Derartige Technologie würde schnelle Neutronen nutzen, die auch ^{238}U spalten können, und damit die 99,3 % von natürlichem Uran nutzen, die heute vergeudet oder auf Halde gelegt werden. ▶



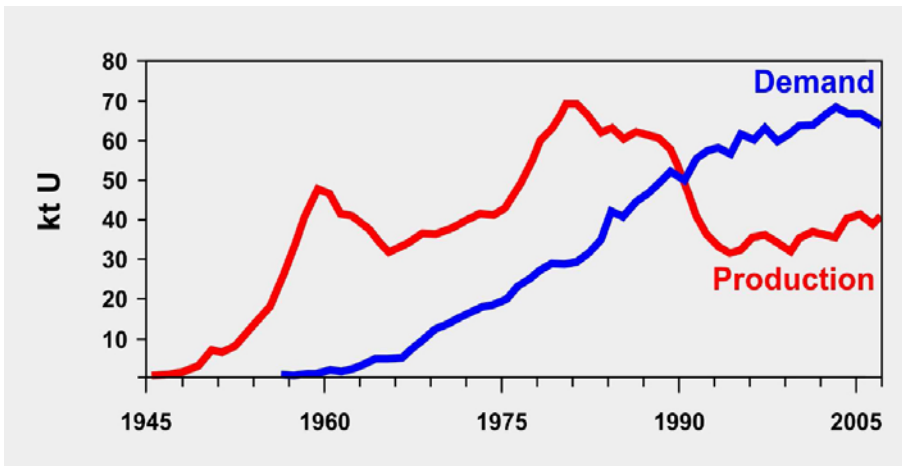


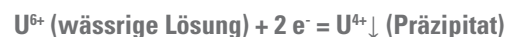
Abb. 3: Uran-Bergbauproduktion und zivile Nachfrage seit 1945. Seit 1990 besteht eine Schere zwischen Nachfrage und Bergbau-Angebot, die durch Wiederaufarbeitung und Rückführung von Uran aus militärischen Beständen gedeckt wird. (Quelle: Nuclear Energy Agency 2008).

Uran wurde 1789 von dem Berliner Apotheker Klaproth in Pechblende-Erz von Johanngeorgenstadt im Erzgebirge entdeckt und wurde erst 150 Jahre später allgemein interessant, als Hahn und Strassmann, wiederum in Berlin, 1938 die Kernspaltung von ^{235}U entdeckten. Diese Reaktion setzt mehr Neutronen frei, als sie verbraucht, womit eine Kettenreaktion möglich ist, vorausgesetzt, dass eine kritische Masse von einigen kg ^{235}U vorhanden ist. Es dauerte nur vier Jahre, um einen ersten Kernreaktor an der Universität von Chicago zu bauen, und weitere drei Jahre, um die erste Atombombe in Nevada zu testen. Im Anschluss daran wurden die Städte Hiroshima und Nagasaki mit jeweils einer Uranbombe (60 kg ^{235}U) bzw. Plutonium-Bombe (8 kg ^{239}Pu) zerstört. Hierauf setzte ein frenetisches und einzigartig kostspieliges Wettrüsten über rund 30 Jahre ein, während dem mehrere Länder ein weites Spektrum von Nuklear-Technologie entwickelten und Tausende von nuklearen Sprengköpfen herstellten, von denen ein Teil gegenwärtig wieder in Kernbrennstoff konvertiert wird. Als Ironie des Schicksals wird heute die Hälfte der kommerziellen Reaktoren in den USA mit Brennstoff aus russischen Kernwaffen betrieben.

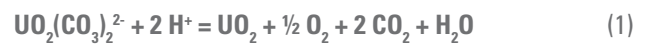
Geochemischer Hintergrund

Die oberen 10 km der kontinentalen Erdkruste haben eine durchschnittliche Häufigkeit von 2,7 g/t U (Rudnick & Gao 2003). Der Uran-Gehalt in Lagerstätten reicht von ein paar hundert g/t U bis zu mehr als 20 % U. Entsprechend muss für die Bildung von Uran-Lagerstätten ein Prozess wirksam sein, der Uran um den Faktor 100 bis 10.000 über den globalen geochemischen Hintergrund anreichert. Eine derartige Anreicherung ist möglich durch Auslaugen von grossen Gesteinsvolumina durch oxidierendes warmes Wasser und Ausfällung von Uran

(meistens in der Form von Uraninit $[\text{UO}_2]$, der auch wegen der schwarzen Farbe als Pechblende bekannt ist) an solchen Orten, wo sich die Löslichkeit von Uran ändert. Uran tritt in zwei Oxidationszuständen auf: Uran mit der Wertigkeit 6+ ist leicht löslich, während Uran in der Wertigkeit 4+ stark unlöslich ist. Dieser Zusammenhang kann in die allgemeine geochemische Formulierung kondensiert werden:



Oder, in einem natürlichen System



Es bestehen viele weitere Komplexbildungsmechanismen, aber das grundlegende Thema ist jeweils die leicht lösliche U-Spezies im 6+ Zustand, während die ausgefällte U-Spezies im 4+ Zustand vorliegt. Die Löslichkeit von U^{4+} bei niedrigen Temperaturen ist extrem gering, ähnlich zu Thorium als Th^{4+} . Jedoch hat Thorium im Unterschied zu Uran keine oxidierte Spezies, weshalb es nicht in niedrigtemperierten hydrothermalen Lagerstätten angereichert wird. Nur unter Hochtemperatur-Bedingungen, insbesondere in Silikat-Schmelzen, können Uran und Thorium aufgrund ihres grossen Ionenradius und hoher Ladung gemeinsam angereichert werden und dann U-Th-Lagerstätten in Granit-Pegmatiten und Alkali-Graniten bilden.

Gleichung (1) beschreibt hinreichend sowohl die Bildung von hydrothermalen Uran-Lagerstätten (Reaktion von links nach rechts), als auch den Abbau solcher Lagerstätten durch „In-Situ Leach“ (ISL) Techniken (Reaktion von rechts nach links).

Die Löslichkeit von Uran nach (1) kann formuliert werden als:

$$\begin{aligned} \log K &= \log [\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}] + 2 \log [\text{H}^+] - \frac{1}{2} \log [\text{O}_2] - 2 \log [\text{CO}_2] \\ \log [\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}] &= \log K + 2 \text{pH} + \frac{1}{2} \log [\text{O}_2] + 2 \log [\text{CO}_2] \end{aligned}$$

Diese Gleichung beschreibt die Löslichkeit von Uran als Funktion von pH, Oxidationszustand und CO_2 -Fugazität. Unter der Normalsituation, dass der pH durch die Gesteins-Mineralogie gepuffert ist, wird die Löslichkeit von Uran somit durch die Fugazität von Sauerstoff und CO_2 kontrolliert. Ein praktisches Beispiel dieses zunächst akademisch erscheinenden Zusammenhangs ist in Form des Handstücks von Uran-Erz in **Abb. 4** gegeben, wo der Übergang von oxidierendem Milieu zu reduzierendem Milieu direkt ►

vom Gestein abgelesen werden kann. Uran-Erzbildung (Ausfällung von Uraninit) markiert den Übergangsbereich von oxidiertem zu reduziertem Milieu. ISL („In-Situ Leach“) Mining kehrt diesen Prozess um, wobei Uraninit in der Lagerstätte (inhärent reduziertes Milieu) durch Injektion von mit O_2 und CO_2 gesättigtem Wasser in Lösung gebracht wird.

Hydrothermale Mobilität von Uran verlangt ein oxidierendes Milieu der Fluid-Zirkulation. (Der Begriff „hydrothermal“ meint grundsätzlich warmes Wasser, ohne genetische Festlegung, woher dieses Wasser stammt.) Nennenswerte Mengen von Sauerstoff in der Erdatmosphäre sind erst seit rund 2,4 Ga gegeben. Vor dieser Zeit sind keine hydrothermalen Uran-Lagerstätten bekannt, wohl aber magmatische Anreicherung von Uran in Graniten und Granit-Pegmatiten, die sich über den gesamten Zeitraum der Erdentwicklung verfolgen lässt. Uran verhält sich in silikatischen Schmelzsystemen als inkompatibles Element, d.h. es wird nicht in die gesteinsbildenden Silikatminerale eingebaut und somit in Restschmelzen angereichert. Bei der Verwitterung solcher Gesteine in der Zeit vor 2,4 Ga wurde Uraninit mit hohem Thorium-Gehalt als unlösliches Schwermineral in fluvialen Seifen angereichert. Beispiele sind die Lagerstättenprovinzen von Witwatersrand, Südafrika, und Blind River/Elliott Lake, Kanada. Diese Uran-Seifen konnten sich nur in der archaischen Sauerstoff-freien Atmosphäre bilden. Unter heutigen Atmosphären-Bedingungen löst sich Uraninit leicht im Regenwasser, und die Erosion von Uran-

Lagerstätten oder von U-reichen Graniten (10 - 20 g/t U), produziert weite sekundäre Dispersionsaureolen, die zur Lagerstättensuche genutzt werden.

Die hohe Löslichkeit von Uran unter oxidierenden Bedingungen auch bei niedriger Temperatur erlaubt die oberflächennahe Bildung von Uran-Lagerstätten unter ariden bis semi-ariden Bedingungen durch Evapotranspiration. In solchen Milieus wird sechswertiges Uran oft zusammen mit Kalium und Vanadium in Form von einer Reihe von kanariengelben bis giftgrünen Mineralen ausgefällt. Typische Beispiele sind Carnotit $[K_2(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 3H_2O]$ und Tyuyamunit $[Ca(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 5-8\frac{1}{2} H_2O]$ (Abb. 5). Die weite Verbreitung von Uran-Vanadaten in diesen Lagerstätten beruht auf deren deutlich geringerer Löslichkeit im Vergleich zu allen anderen $(UO_2)^{2+}$ -Mineralen.

Wichtige Uran-Lagerstättentypen

Uran-Lagerstätten bilden sich in einem weiten Spektrum von geologischen Environments. Gang-Lagerstätten waren historisch besonders wichtig, gefolgt von Paläo-Seifen. Diese Lagerstättentypen haben allerdings niedrige Gehalte (zumeist $< 1\%$ U), und die Entdeckung von hoch-haltigen Diskordanz-gebundenen Lagerstätten in Kanada in den 1960er Jahren, sowie von noch höher-prozentigen Lagerstätten bis zu rund 20% U des gleichen Typs brachte eine Wende im Uran-Markt. Trotzdem sind auch weiterhin noch viele „low-grade“ und „very-low grade“ ($< 0.05\%$ U) ►



Abb. 4: Uran-Erz aus der Lagerstätte Bertholène (ausgeerzt) im Massif Central, Frankreich. Diese Granit-Brekzie besteht aus hämatitisierten Granit-Bruchstücken (rot), zementiert durch einen dünnen Saum von Uraninit (schwarz), gefolgt von Pyrit (gelblich). Das Handstück demonstriert den Wechsel im Oxidationszustand von oxidierend (Hämatit) zu reduzierend (Pyrit). Uraninit wird im Wechsel der Redox-Bedingungen ausgefällt. Das Erz tritt nahe der Diskordanz von verwittertem herzynischem Granit (Karbon) und überlagernden permischen Sedimentgesteinen mit dünnen Kohle-führenden Flözen auf. (Sammlung Lehmann).



Abb. 5: Uran-Erz aus Verwitterung und Evapotranspiration: Tyuyamunit, ein hydratisiertes Ca-U-Vanadat, in karbonischem Kalkstein, Wyoming, USA. (Sammlung Lehmann).



Abb. 7: Diskordanz-gebundenes Uranerz im Athabasca-Sandstein: Bohrkern vom Pod 2-Bereich der Lagerstätte McArthur River, Saskatchewan, Kanada. DDH 301 besteht über mehrere Bohrmeter aus höchst-prozentigem Erz (> 50 % U) aus Uraninit und Tonmineralen. (Photo: Lehmann).

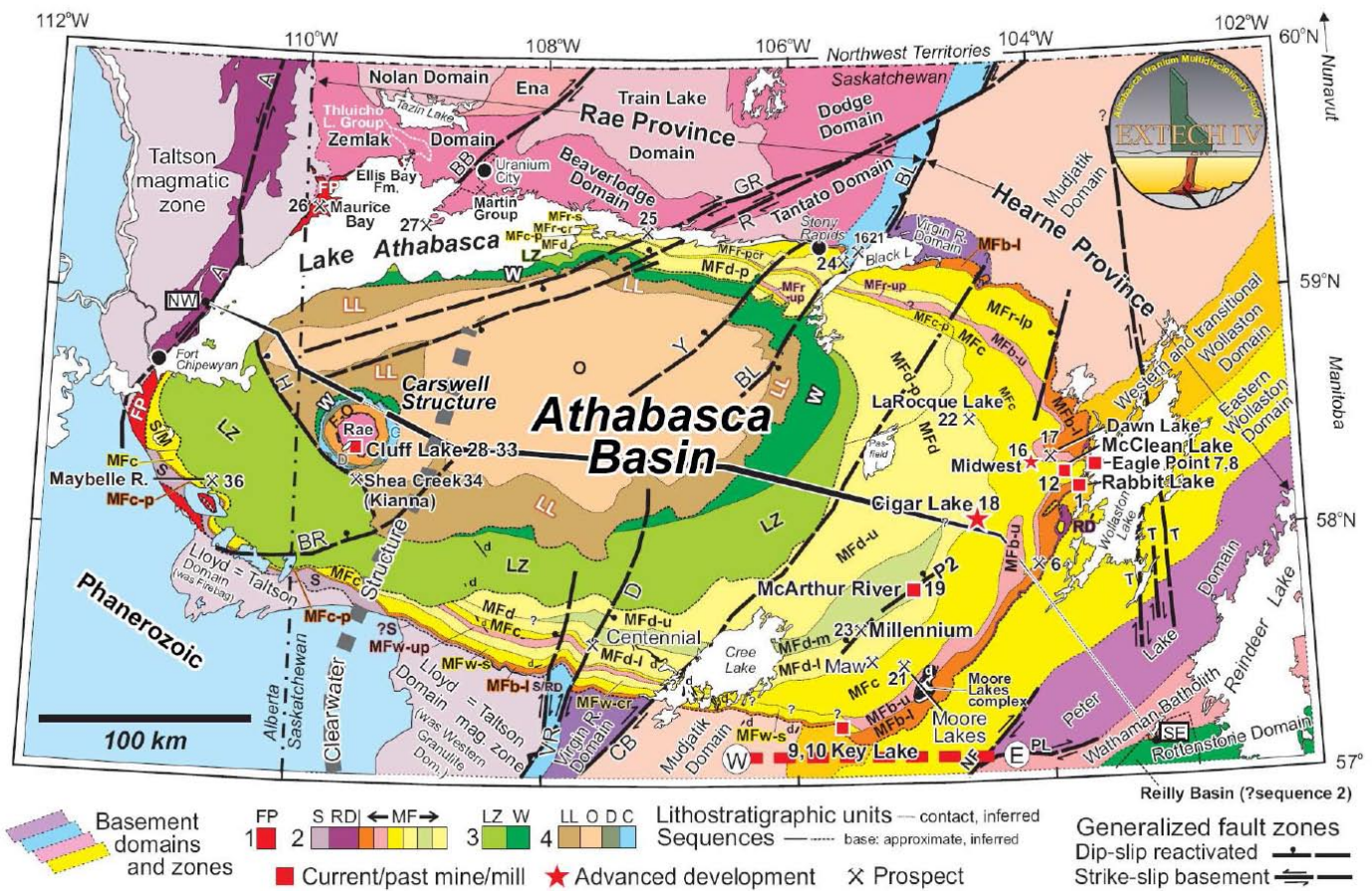
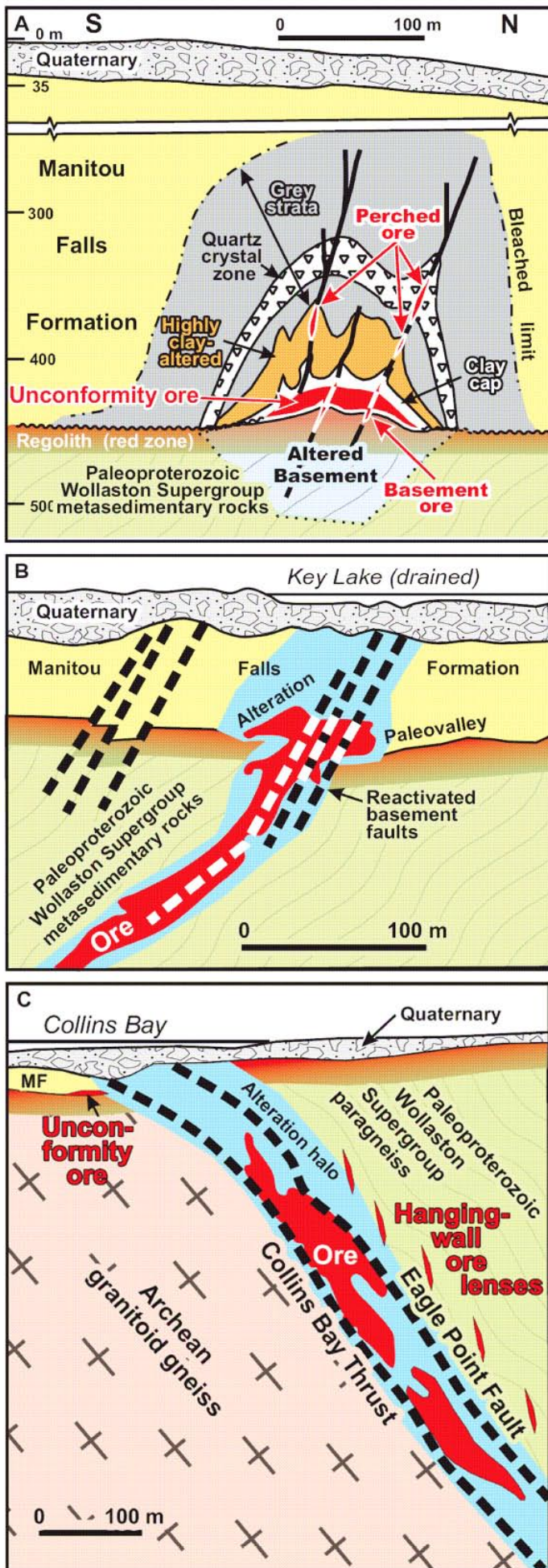


Abb. 8: Geologische Überblickskarte des Diskordanz-Lagerstättengebiets vom mittel-proterozoischen Athabasca-Becken in Saskatchewan mit einer Gesamt-Ressource von rund 600.000 t U bei einem Durchschnittsgehalt von etwa 2 %. „MF“ bezeichnet die Manitou Falls-Formation, die den unteren Teil der Sedimentsequenz des Athabasca-Beckens ausmacht. Die wichtigsten Vorkommen liegen am 200 km langen südöstlichen Beckenrand zum paläo-proterozoischen und archaischen metamorphen Basement. Hauptvorkommen: Key Lake (70.000 t U, 2%, abgebaut), McArthur River (nachgewiesen 80.000 t U, 15 %, + wahrscheinlich 62.600 t U, 22 %, im Abbau), Cigar Lake (87.000 t U, 21 % U, in Entwicklung). (Aus Jefferson et al. 2007: 276).



Dem grundsätzlich gleichen Bildungsprozess folgen auch die klassischen Sandstein- oder „Roll front“-Lagerstätten in den westlichen USA, wo Uran in Sandstein-Aquifers am Fazieswechsel von oxidiert zu reduziert ausgefällt ist (Abb. 10). Das reduzierte Milieu ist hier durch organische Komponenten (Pflanzenreste) oder syngedimentär-diagenetischen Pyrit gegeben. Eine noch effektivere Redox-Falle kann durch Öl oder Erdgas (Methan) gegeben sein. Eine derartige Situation scheint in Zentral-Kasachstan gegeben zu sein, wo viele kleine bis mittlere Uran-Vorkommen in wenig konsolidiertem spät-kretazischem bis tertiärem Sandstein eine riesige Uran-Provinz mit einer Gesamt-Ressource von 1,1 Gt U bilden, die mit Erdgas-Feldern im gleichen Raum assoziiert ist. Diese Lagerstätten haben niedrige Gehalte (~0.03 - 0.05 % U), können aber sehr günstig durch ISL/„In-Situ Leach“-Technik abgebaut werden (Abb. 11). ▶

Abb. 9: Drei Beispiele von Diskordanz-Uran-Lagerstätten im südöstlichen Athabasca-Becken, Kanada.

(A) Cigar Lake (Untertagebetrieb in Entwicklung) liegt hauptsächlich unmittelbar über der Diskordanz in hydrothermal alteriertem Sandstein;

(B) Deilmann (Tagebau, erschöpft) in Key Lake ist sowohl im Basement und im überlagernden Sandstein.

(C) Eagle Point liegt unterhalb der Diskordanz im metamorphen Basement (ursprünglich Tagebau und Tiefbau, heute Tiefbau auf einige Erz-Linsen in der Dachzone im Basement).

Alle Vorkommen sind gebunden an Graphit-führende Metasediment-Horizonte im Basement. Vertikaler Maßstab=horizontaler Maßstab.
(Aus Jefferson et al. 2007: 287).

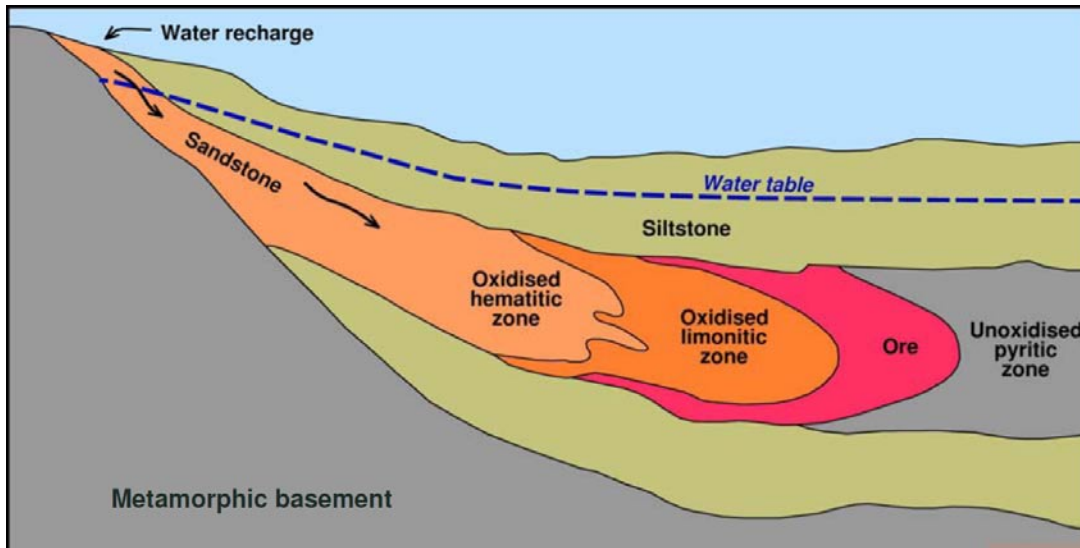


Abb. 10: Schematische Darstellung einer „Roll front“-Uran-Lagerstätte. Der Halbmond-förmige Uran-erzkörper bildet sich an der dynamischen Reaktionsfront im Sandstein-Aquifer im Übergang von oxidierter zu reduzierter Fazies. Die Redox-Front verlagert sich im hydraulischen Gradienten mehr und mehr in die ursprünglich reduzierte Gesteinseinheit.

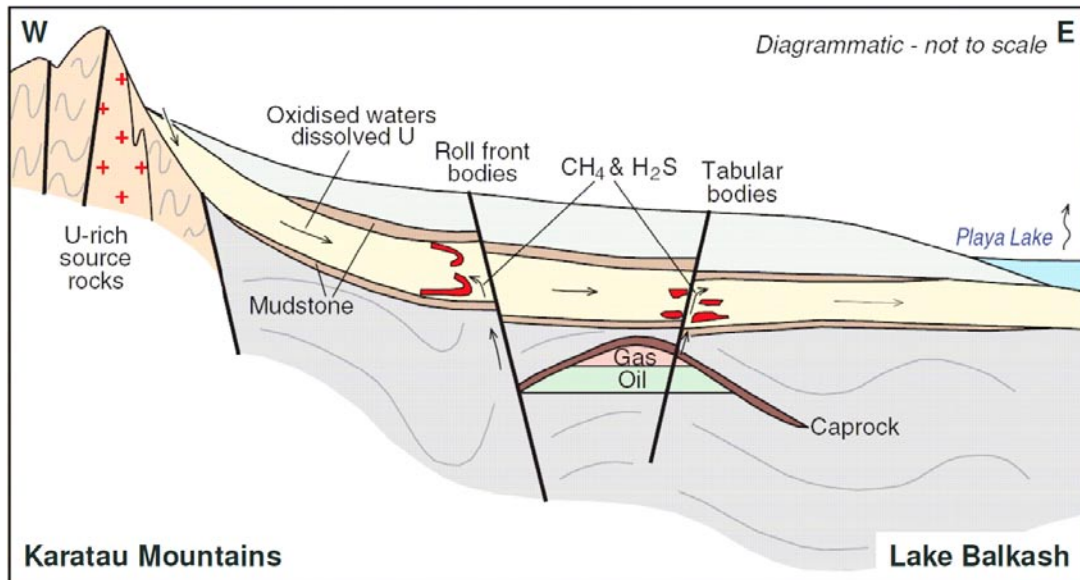


Abb. 11: Schematisches Querprofil über 500 km vom Karatau-Gebirge bis zum Balkash-See (Zentral-Kasachstan). Uran-Lagerstätten vom Sandstein-Typ bildeten sich dort, wo regionale Grundwasser-Strömung in kretazisch-tertiären Sandstein-Aquifers mit Methan und H_2S aus den unterlagernden Erdgas-Feldern in Kontakt kam. Diese Lagerstätten enthalten etwa 1.1 Gt U bei niedrigem Gehalt von ~0,03-0,05 % U, wobei Uran durch ISL („In-Situ Leach“)-Bergbau gewonnen wird. Modifiziert aus Jaireth et al. (2008).

Der IOCG („Iron Oxide-Copper-Gold)-Lagerstättentyp ist hauptsächlich vom Gawler-Kraton im südlichen Australien bekannt, wo die Riesen-Lagerstätte Olympic Dam hervorsticht. Die neusten Ressourcen-Angaben machen diese Lagerstätte zum grössten bekannten Uran-Vorkommen der Erde, obwohl Uran hier nur ein Beiprodukt des Kupfer-Bergbaus ist: 8,3 Gt @ 0,88 % Cu, 0,24 kg/t U, 0,31 g/t Au, 1,50 g/t Ag (BHP Billiton Annual Report 2008). Der Abbau ist zur Zeit noch unter Tage, aber ein Multi-Milliarden Tagebauprojekt mit aussergewöhnlichen Dimensionen ist in Planung. Die Cu-U-Au-Lagerstätte von Olympic Dam besteht aus einem mesoproterozoischen (~1.590 Ma) Granit-Brekzienkomplex mit sehr viel Hämatit (bis zu 90 %), sowie Magnetit und Sulfiden. Die Bildung ist umstritten. Die Mine hat im vergangenen Jahr 3.500 t U produziert (Juli 2007 bis Juni 2008, entsprechend Geschäftsjahr im BHP Billiton Jahresbericht) und ist der einzige wichtige Uran-Produzent vom IOCG-Typ.

Es gibt zahlreiche weitere Uran-Lagerstättentypen, die allerdings gegenwärtig wenig ökonomische Bedeutung haben. Klassische Gang- und Scherzonen-Lagerstätten waren in den frühen Tagen des Uran-Bergbaus wichtig. Ein grosser Teil der europäischen Uran-Produktion kam aus solchen Gangsystemen in den herzynischen Orogenzonen der Böhmisches Masse und des Erzgebirges (Tschechien und Deutschland), sowie des Massif Central in Frankreich. Ein wichtiger Teil der ostdeutschen Uranförderung kam aus frühpaläozoischen Schwarzschiefern im Revier von Ronneburg, wo Uran synsedimentär (euxinisches Sedimentationsmilieu) angereichert wurde, und durch Verwitterung weiter konzentriert wurde. Dieser Lagerstättentyp ist insbesondere auch vom kambrischen Alaunschiefer in Schweden bekannt, wo der Urangehalt von etwa 0,1 % U allerdings unterhalb der wirtschaftlichen Machbarkeit liegt (s. **Abb. 6**). ▶



Abb. 12: Gold-Uran-Erz als Paläo-Seife (Meta-Konglomerat), Venterdorp Contact Reef, Witwatersrand, Südafrika. Dieses typische Handstück zeigt milchig-weiße Quarz-Kiesel in feiner Matrix aus Chlorit und Pyrit (gelblich). Uraninit und Gold sind nur im mikroskopischen Bild sichtbar. Der durchschnittliche Gehalt der 3,1 Ga-alten Witwatersrand Meta-Konglomerate liegt bei rund 10 g/t Au + 210 g/t U, während die sehr ähnlichen Paläo-Seifen im Blind River/Elliott Lake-Bezirk in Ontario, Kanada, etwa 900 g/t U führen, aber kein Gold enthalten. (Sammlung Lehmann).

Uraninit ist ein Schwermineral (Dichte 9.0-9.7), das in Seifen unter reduzierenden Bedingungen angereichert werden kann. Solche Bedingungen existieren heute bei 20 % Sauerstoff in der Atmosphäre nicht. Vor etwa 2,4 Ga war allerdings der Sauerstoff-Gehalt der Paläo-Atmosphäre sehr niedrig ($\ll 1\% \text{ O}_2$), wodurch Anreicherung von klastischem Uraninit sowie von Pyrit im exogenen Kreislauf möglich war. Sehr grosse Uran-Paläo-Seifen, auch als Meta-Quarz-Konglomerate bekannt, treten im 3,1 - 2,7 Ga-alten Witwatersrand-Becken in Südafrika auf, sowie im 2,45 Ga-alten Blind River/Elliott Lake-Distrikt in Ontario, Kanada. Der klastische Uraninit hat einen hohen Thorium-Gehalt, der die granitische oder pegmatitische Herkunft anzeigt. Ein Teil der Uraninit-Komponente hat mit Bitumen zu amorphem „Thucholit“ reagiert (synthetischer Name für die charakteristische Th-U-CHO-Assoziation). Unter dem Mikroskop zeigen die gerundeten Uraninit-Klasten winzige Einschlüsse von Bleiglanz, der sich aus radioogenem Blei herleitet. Diese Beobachtung erlaubte eine erste Mikroskopie-basierte Altersschätzung, die später

durch Isotopen-Mikroanalytik verfeinert wurde.

Uran ist in granitischen Gesteinen angereichert. Aufgrund des grossen Ionenradius und der hohen Ladung wird Uran nicht in die Haupt-Silikatminerale eingebaut und in Restschmelzen angereichert. Hierbei verhält sich Uran wie Thorium, das ähnliche kristallchemische Eigenschaften hat. Granitische Gesteine haben zumeist einen Teil ihres magmatischen Uran-Gehalts durch Auslaugung verloren, während Thorium weitgehend immobil noch die magmatische Situation widerspiegelt. In besonders hochentwickelten granitischen Gesteinen können Uran- (und Thorium-) Gehalte bis zur Abbauwürdigkeit erreichen, d.h. einige hundert g/t. Solche Gesteine sind Pegmatite, sowie Leukogranite und Alkaligranite. Das gegenwärtig einzige Beispiel eines wirtschaftlichen Vorkommens diesen Typs ist der sehr grosse Tagebau von Rössing in Namibia, wo in 2007 rund 3.000 t U bei einem Erzgehalt von nur 300 g/t U produziert wurden. ►

Natürliche Kernreaktoren

Wider der landläufigen Meinung sind Kernreaktoren keine menschliche Erfindung, sondern waren bereits in der geologischen Entwicklung der Erde während eines kurzen Zeitfensters und unter aussergewöhnlichen Bedingungen auf natürlicher Basis aktiv. Hierzu musste in der Erdatmosphäre genügend Sauerstoff vorhanden sein, damit sich hochgradige hydrothermale Uran-Lagerstätten bilden konnten ($\leq 2,4$ Ga), und zudem musste der Anteil von ^{235}U am natürlichen Uran bei $\geq 3,5\%$ liegen, also ähnlich wie in den Brennstäben der heutigen Kernreaktoren. Dem heutigen angereicherten Uran entspricht natürliches Uran vor $\geq 2,0$ Ga, was sich aus der rund sechs mal kürzeren Halbwertszeit von ^{235}U gegenüber ^{238}U ergibt. Tatsächlich konnten im paläo-proterozoischen Franceville-Becken im östlichen Gabun 1972 beim Abbau von hochgradigen Uran-Vorkommen in 2,0 Ga-alten Sandsteinen 16 natürliche Kernreaktoren identifiziert werden, die durch ihre exotische Isotopenzusammensetzung auffielen. Diese Reaktoren funktionierten in Uranerz-Körpern in Sandstein mit $\geq 20\%$ U und mit damals 3,7 % ^{235}U . Grundwasser wirkte als Moderator, um hoch-energetische Neutronen abzubremesen, damit diese in ^{235}U -Atomen Kernspaltung auslösen konnten. Im Verlauf der Kettenreaktion wird Wärme frei ge-

setzt, die zum Sieden des Wassers und zur Trockenlegung und damit Abschaltung des Reaktor führt. Ähnlich zu Geysiren in Geothermalfeldern kann der Prozess dann wieder starten, wenn genügend kaltes Grundwasser nachgeflossen ist. Die Isotopenzusammensetzung von radiogenem Xenon und Krypton, das in Alumino-Phosphaten festgehalten wurde, erlaubt eine detaillierte Rekonstruktion dieser Reaktorzyklen, wobei 30-minütige Aktivität jeweils mit einer rund 2,5-stündigen Ruhephase gekoppelt ist (Meshik et al. 2004). Die Energie-Produktion dieser Reaktoren während ihrer insgesamt 150.000-jährigen Lebensdauer kann auf ~ 15 GWa geschätzt werden, wobei rund 50 % dieser Energie aus „Brüten“ stammt, d.h. interner Produktion von ^{239}Pu aus Neutronen-Einfang von ^{238}U , und α -Zerfall von ^{239}Pu zu ^{235}U . Es ist besonders erstaunlich, dass diese Brutreaktoren als offene Systeme nur im m-Bereich zu Kontamination führten, und dass ihre toxischen und radioaktiven Komponenten im Laufe der 2-Ga-Erdgeschichte bis heute im wesentlichen immobil waren. Dieses natürliche Analogon eines nuklearen Endlagers ist für die aktuelle Diskussion zur Endlager-Sicherheit von Bedeutung. ►

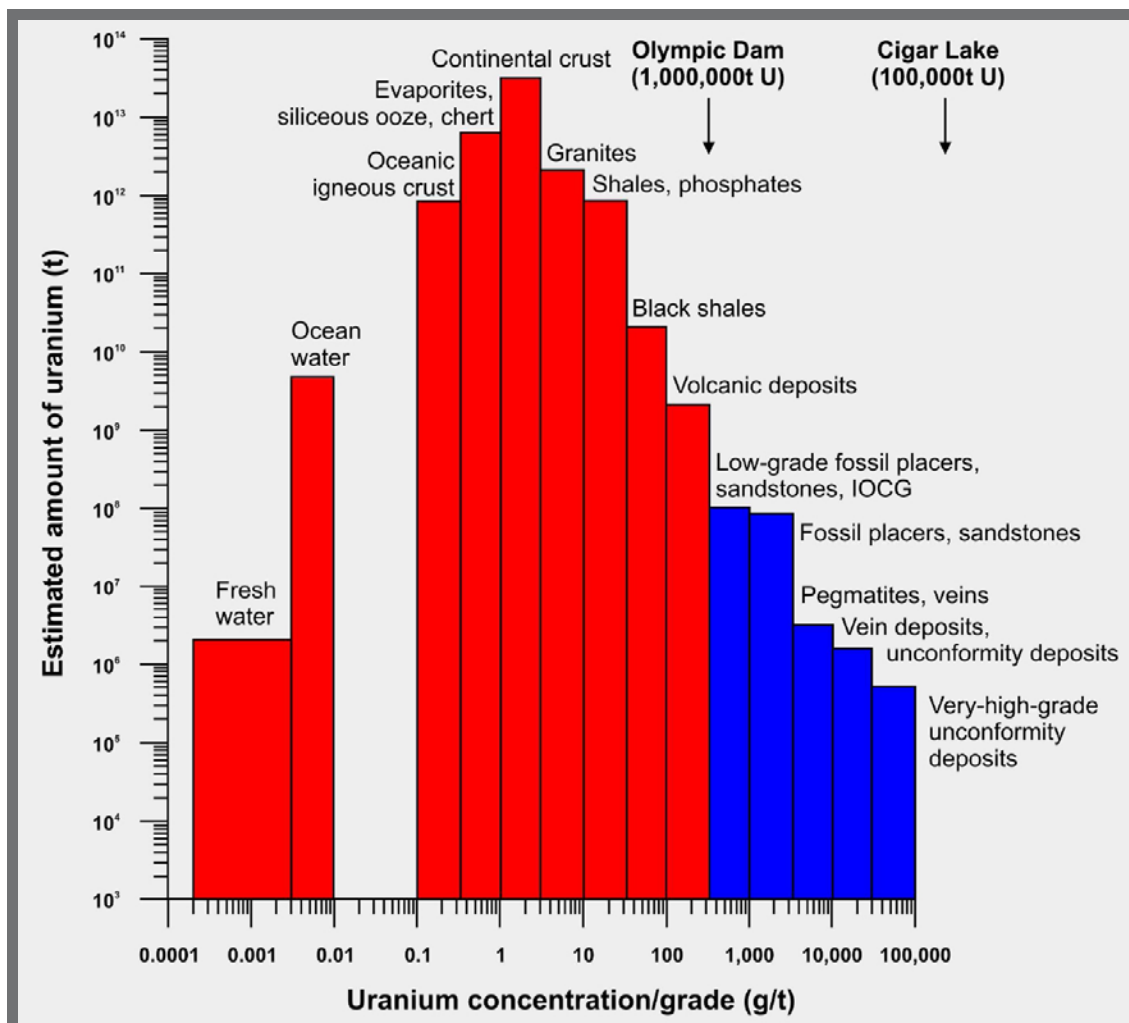


Abb. 13: Uran-Verteilung in wichtigen Einheiten der Erdkruste. Die Säulen repräsentieren verschiedene Kategorien von Uran-Vorkommen (in blau) oder geologische Reservoiren von Uran (in rot). Die gegenwärtig in Abbau stehenden Uran-Lagerstätten haben eine weite Variation in Bezug auf den Metall-Gehalt von wenigen Hundert g/t bis zu 20 % U. Die beiden Pfeile markieren die Endpunkte dieses Spektrums, mit der „low-grade“ Riesen-Lagerstätte Olympic Dam (Cu-U-Au) in Australien, and der „very-high-grade“ Diskordanz-Lagerstätte Cigar Lake in Kanada (in Entwicklung). Modifiziert von Deffeyes & MacGregor (1980).

Ressourcen-Ausblick

Die geologische Langzeit-Verfügbarkeit von Uran wird dann wichtig, wenn Klima-Veränderungen und Öl-/Gas-Knappheit in der weiten Öffentlichkeit als besonders unangenehm empfunden werden, und wenn Nuklearenergie als die kostengünstigste Variante der Stromerzeugung an Raum gewinnen sollte. **Abb. 13** gibt einen Überblick zur Verfügbarkeit von Uran in Lithosphäre und Hydrosphäre der Erde. Die Menge von Uran nimmt mit abnehmendem Gehalt der verschiedenen Reservoirs stark zu. Bei den gegenwärtigen Abbauraten würde Uran in Ressourcen mit mehr als 0,1 % U für mehr als 100 Jahre reichen. Ein grosser Teil dieser Menge ist bei den gegenwärtigen Preisen nicht wirtschaftlich gewinnbar. Die Uran-Ressourcen, die heute mit bis zu 130 USD/kg U gewonnen werden können, sind auf 5,5 Mt U geschätzt (NEA 2008), womit sich eine statische Lebensdauer von rund 100 Jahren ergibt.

Durchschnittliches Meerwasser hat eine Konzentration von 3,2 ppb (ng/g) U, die einer in den Ozeanen gelösten Gesamtmenge von rund 4,5 Gt U in Form von Uranyl-Trikarbonat $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ entspricht (Gesamtmasse Meerwasser: $1,4 \times 10^{18}$ t). Uran-Gewinnung durch ionenselektive Adsorptionsfolien wurde erfolgreich experimentell getestet und Meeres-Bergbau könnte ohne externe Energiezufuhr durch Ausnutzung von Ozean-Strömungen ablaufen. Bergbau im industriellen Stil wurde bisher nicht versucht, und wird vermutlich bei einem Uranpreis von 400-1.200 USD/kg U rentabel (Macfarlane & Miller 2007).

Wirtschaftlicher Ausblick

Die Produktionskosten der Stromerzeugung aus Kernkraft lagen in 2005 bei 1,7 US ct/kWh, verglichen mit 2,2 US ct für Kohle, 7,5 ct für Erdgas, und 8,1 ct für Erdöl (Betrieb, Brennstoff, Unterhalt; USA-Daten in NEA 2008). Da die Rohstoff-Kosten für Uran nur 3-5 % der Gesamtkosten pro Kilowatt-Stunde von nuklear erzeugtem Strom betragen, verglichen mit 78 % für Kohle, 94 % für Erdgas und 91 % für Erdöl, hat ein starker Preisanstieg für natürliches Uran einen wesentlich geringeren Impact als Preisanstiege bei den fossilen Brennstoffen. Es ist daher zu erwarten, dass nuklear erzeugter Strom im Vergleich zu anderen Stromarten zunehmend kostengünstiger wird, trotz der erforderlichen hohen Anfangs-Investitionen.

Eine einfache Überschlagsrechnung kann den Einfluss von Preis-Fluktuationen für verschiedene Rohstoffe bei der Energieerzeugung abschätzen: Das Verhältnis von Energie-Output aus gleichen Mengen von Natururan und Kesselkohle beträgt rund 10.000, während das heutige Preis-Verhältnis von gleichen Mengen von Uran (150 USD/kg U) und Kohle (150 USD/t steam coal) bei 1.000 liegt. Entsprechend

wird eine Verdoppelung der Preise beider Rohstoffe sich für Kohle zehn mal stärker im Strompreis auswirken als für Uran. Bei dieser Erhöhung des Uran-Preises würden diverse Uran-Vorkommen mit nur geringer Uran-Anreicherung wirtschaftlich gewinnbar, und Meerwasser-Bergbau wäre interessant. Die gleiche Rechenmethode unterstreicht die Bedeutung der unvergleichlich günstigeren Sonnenenergie, die als Rohstoff kostenlos verfügbar ist, deren Konversion in Strom allerdings weiterhin extrem teuer ist.

Kernkraft bietet ein enormes Potential für kostengünstige Stromerzeugung, das zwar durch Ressourcenmangel geologisch nicht begrenzt ist, wohl aber durch politische und Umwelt-Überlegungen, die sich erfahrungsgemäss schnell ändern können. Sollte der politische Wille bestehen, die neue Brüter-Technologie zu entwickeln, könnte theoretisch der gesamte Energie-Bedarf der Erde in dauerhafter und nachhaltiger Weise gedeckt werden, wie schon von Cohen (1983) vorgeschlagen.

Literatur

1. Cohen BL (1983): Breeder reactors: a renewable energy source. *American Journal of Physics* 51: 75-76
2. Deffeyes KS, MacGregor ID (1980) World uranium resources. *Scientific American* 242: 66-76
3. Jaireth S, McKay A, Lambert I (2008): Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons. http://www.ga.gov.au/image_cache/GA11094.pdf
4. Jefferson CW, Thomas DJ, Gandhi SS, Ramaekers P, Delaney G, Brisbin D, Cutts C, Quirt D, Portella P, Olson RA (2007): Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. In: *Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods* (Goodfellow WD, ed), 273-305. Geological Association of Canada, Special Publication 5.
5. Macfarlane AM, Miller M (2007): Nuclear Energy and uranium resources. *Elements* 3: 185-192
6. Meshik AP, Hohenberg CM, Pravdivtseva OV (2004): Record of cycling operation of the natural nuclear reactor in the Oklo/Okelobondo area in Gabon. *Physical Review Letters* 93 (18): Paper 182302, 4 p.
7. NEA (2008) Uranium 2007: Resources, production and demand. A joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. OECD, Paris.

Dr. Bernd Lehmann studierte Geologie in Heidelberg und an der FU Berlin (Promotion 1979 über Zinn-Lagerstätten in Bolivien), und war dann Postdoc an der Harvard University. Nach einigen Jahren als Explorationsgeologe in Zentral-Afrika und Südost-Asien habilitierte er sich 1990 an der FU Berlin, und wurde 1991 auf den Lehrstuhl für Lagerstätten und Rohstoffe am Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe nach Clausthal berufen. Sein Arbeitsgebiet umfasst das ganze Feld der mineralischen Lagerstätten mit Schwerpunkt Südamerika.



lehmann@min.tu-clausthal.de | www.tu-clausthal.de/~mrbl