

## **Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte**

### **Kurzfassung**

Bei der Einschätzung des zukünftigen Verhaltens geologischer Strukturen und Formationen ist die Betrachtung vergangener geologischer Abläufe ein wesentliches Hilfsmittel. Der Verweis auf natürliche Analoga vermag dabei die wissenschaftliche Argumentationslinie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen zu unterstützen. Wissenschaftliches Durchdringen der Prozesse der natürlichen Analoga liefert einen wesentlichen Beitrag für Aussagen zu langen geologischen Zeiträumen. Da in der Natur ähnliche Prozesse stattfanden, wie sie in einem Endlagersystem erwartet werden, können Analogstudien dazu dienen, sowohl diese bei der Endlagerung zu betrachtenden langen Zeithorizonte für die Nachbetriebsphase (Prognose der Langzeitsicherheit) zu belegen, als auch daraus abgeleitete Empfehlungen verständlich zu machen.

In erster Linie können Uranerzlagerstätten zu Analogstudien herangezogen werden. Die hier betrachteten Analogstandorte stellen günstige geologische Gesamtsituationen im Sinne des vom Arbeitskreis postulierten Konfigurationstyp dar, in dem das Wirtsgestein hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist und der Wirtsgesteinskörper bezüglich seiner hydraulischen Eigenschaften offen ist. Wichtiger Bestandteil dieser günstigen geologischen Gesamtsituation sind entweder ein toniger Verwitterungshorizont des Paläoreliefs, ein toniger Alterationsmantel der Lagerstätte selbst oder tonige Formationen im Deckgebirge. Sie wirken als Isolationskörper und sind eine effiziente lithologische und geochemische Barriere gegenüber einer Migration von natürlichem Uran, U/Th-Isotopen und REE. Im Gesteinsverband sind Tonminerale entscheidend für das Rückhaltevermögen von Radionukliden. Stabile sorptive Bindungen bestehen auch mit organischem und glasreichem Material.

Bei den aufgeführten Analoga zeigen sich hohe Stabilitäten für U/Th-Isotope und REE in günstig gepuffertem Milieu bei reduzierenden Bedingungen mit pH-Werten zwischen 6,5 bis 8,5, Eh-Werten von - 300 bis - 400 mV sowie bei niedrigen Gebirgstemperaturen (ca. 70 Grad Celsius).

Die zweite wesentliche Konfiguration natürlicher Analoga sind Salzstrukturen, die einem Barrieretyp entsprechen, bei dem das Wirtsgestein hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit wichtiger Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist. In Untersuchungen von Salzstöcken konnte nachgewiesen werden, dass syndementäre Fluide eingeschlossen und im Salzstock isoliert wurden.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
1 Fragestellung	3
2 Natürliche Analoga	3
3 Analogiestudien	4
3.1 Uranerzlagerstätten	6
3.1.1 Diskordanz- und schicht-gebundene Uranerzanreicherungen	6
Cigar-Lake (Kanada)	7
Oklo (Gabun)	8
Tono-Mine (Japan)	9
Koongara Lagerstätte (Australien)	9
3.1.2 Magmatogene Uranerzanreicherungen	10
Morro do Ferro (Brasilien)	10
Palmottu (Finnland)	10
Äspö (Schweden)	11
3.1.3 Oberflächennahe/supergene Uranerzanreicherungen	12
3.2 Besondere Charakteristika weiterer Analogstandorte	12
Tonvorkommen in Italien	13
Kupfererzvorkommen in Finnland	13
3.3 Analogstandorte mit günstigen Grundwasserverhältnissen	14
Untersuchungen an Wässern in tiefer Beckenlage Norddeutschlands	15
Untersuchung von Fluiden mariner Evaporite in Norddeutschland	15
Untersuchungen an Wässern im subsedimentären Gebirge	15
4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	16
5 Anhang Tabelle: Zusammenfassung der ausgewählten Analoga	20
6 Anhang Blockdiagramm: Schicht- und diskordanzgebundene Uranerzlagerstätten	23
7 Schriftenverzeichnis	24

## **1 Fragestellung**

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist die Prognose einer langzeitlichen geologischen Entwicklung wesentlicher Bestandteil bei der Beurteilung eines Standortes. Die Einschätzung des zukünftigen Verhaltens geologischer Strukturen und Formationen wird anhand nachvollziehbarer geologischer Abläufe aus der Vergangenheit erleichtert. Dabei liefern natürliche Analoga als Indikatoren wichtige Erkenntnisse zum langzeitigen Ablauf der beteiligten Prozesse, die auch der Öffentlichkeit als nachvollziehbare Beispiele vorgestellt werden können.

Diese Studie wurde mit besonderem Blick auf den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte erstellt. Es war zu prüfen, welche Auswahl natürlicher Analoga für die Fragestellung des Arbeitskreises identifiziert und welche Schlussfolgerungen daraus für die Verfahrens- und Kriterienentwicklung abgeleitet werden können.

## **2 Natürliche Analoga**

Der Gebrauch des Begriffs „natürliche Analoga“ ist im Zusammenhang mit der Endlagerforschung dem englischen Sprachmodus entlehnt („natural analogues“), stammt jedoch ursprünglich aus dem Griechischen und bedeutet soviel wie Entsprechung oder Ähnlichkeit von Verhältnissen.

Sinngemäß handelt es sich dabei um Beobachtungen, die in der Natur gemacht werden (Herrmann 1994: „Naturbeobachtungen“, „natural observations“) und welche die erdgeschichtliche Entwicklung eines Standortes beschreiben, um daraus Prognosen für die geologische Zukunft eines potentiellen Endlagerstandortes abzuleiten (Knipping 1995: „natürliche Modelle“, „natural models“).

Zum einheitlichen Verständnis des Begriffs „natürliche Analoge“ formulierte der „Expertenkreis Natürliche Analoga“ 1993, anlässlich eines Workshops im Forschungszentrum Karlsruhe, folgende Definition:

*„Natürliche Analoga sind Systeme in der Natur, in denen über historische oder geologische Zeiträume physikalische und chemische Prozesse ablaufen oder abgelaufen sind, wie sie ähnlich in Endlagersystemen oder deren Teilsystemen (Nahfeld, Fernfeld, Biosphäre) zu erwarten sind.“*

Die Experten waren sich jedoch darüber einig, dass ein perfektes Analogon mit Übereinstimmungen in allen wesentlichen Anforderungen an ein gesuchtes Endlagersystem nicht in der Natur zu finden ist, vielmehr wird jeder Standort gleichsam genetisch bedingte phänomenologische Verschiedenheiten wie Entsprechungen aufweisen.

### **3 Analogiestudien**

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte geht davon aus, dass für eine Standortsuche zunächst eine klare Vorstellung über günstige geologische Strukturen existieren muss. Für die Klassifizierung werden folgende Definitionen vorgegeben /AKE 00/:

**Wirtsgestein:** Das Gestein, in das die Abfälle eingelagert werden.

**Einschlusswirksamer Gebirgsbereich:** Teil der geologischen Barriere, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum – im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren – den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich kann aus mehreren (z.B. stratigraphisch unterschiedlichen) Gesteinskörpern bestehen, die allerdings hinsichtlich ihrer Barrierewirksamkeit übereinstimmende Eigenschaften aufweisen müssen. Er muss allseits von weiteren Teilen der geologischen Barriere umgeben sein.

**Konfiguration:** Durch Ausdehnung und Funktion (Wirtsgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich) charakterisierter Gesteinskörper oder geometrische Anordnung mehrerer durch Ausdehnung und Funktion charakterisierter Gesteinskörper.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

### **Günstige Konfigurationen** von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

- Typ A: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches. Typ A entspricht als „günstige geologische Gesamtsituation“ nur dem Medium Steinsalz (ggf. Mergelstein).
- Typ B: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches.
- Typ Ba: Geschlossene Konfiguration (einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird von Wirtsgestein umschlossen). Typ Ba wird als konfiguratives Optimum angesehen (Nuklidfalle).
- Typ Bb: Offene Konfiguration (Wirtsgesteinskörper ist unvollständig). Typ Bb: Wird als nachteilig bezüglich seiner hydraulischen Eigenschaften eingestuft und hängt ab von der konfigurationsbedingten Position der Öffnung(en).

Hier werden natürliche Analoga vorgestellt, die Aussagen ermöglichen bezüglich

1. geologischer Systeme, die als natürliche Barrieren wirken,
2. günstiger Gesteinseigenschaften von geologischen Systemen und
3. hohes Grundwasseralter bzw. hohe Grundwasserlaufzeiten .

Die Analogiestudien sollen dazu dienen, aufzuzeigen:

- dass in der Natur ähnliche Prozesse abgelaufen sind, wie in einem Endlager erwartet werden,
- in der Natur über lange Zeiträume geologische Verhältnisse herrschen, die sich durch eine hohe Stabilität auszeichnen und
- dass die bei der Endlagerung zu betrachtenden langen Zeithorizonte für die Nachbetriebsphase (Prognose der Langzeitsicherheit) sich in den natürlichen Analoga wiederfinden lassen.

### **3.1 Uranerzlagerstätten**

Uranerzlagerstätten in tiefen geologischen Formationen sind deshalb als Analoga besonders interessant, da sie seit z.T. 2000 Mio. Jahren in der Geosphäre vorkommen und, wie zahlreiche, weltweite Explorationsarbeiten zeigen, oftmals nicht durch geochemische, z. T. auch geophysikalische Signale an der Erdoberfläche auffallen und nur durch aufwendige Erkundungsarbeiten zu identifizieren sind (z.B. Mc. Arthur Lagerstätte, Kanada). Wenn sich an der Erdoberfläche kein Nachweis einer vorhandenen Lagerstätte durch das Auftreten messbarer Radioisotope durchpaust (blinde Lagerstätte, blind ore body), kann davon ausgegangen werden, dass diese Lagerstätte in einer günstigen Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich (für Uranerz) entwickelt ist.

#### **3.1.1 Diskordanz- und schicht- gebundene Uranerzanreicherungen**

Nur in erdgeschichtlicher Zeit, in der noch kein freier Sauerstoff vorhanden war (älter als mittleres Unterproterozoikum vor ca.  $\geq 2000$  Mio. Jahren) konnte Uran mechanisch (in Kornform) abgelagert werden. Danach wurde es vorwiegend aus wässriger Lösung gefällt.

Zum Ende des Unterproterozoikums (ab ca. 2000 Mio. Jahren) kam es erstmals zu einer stark oxidativen Verwitterung der kontinentalen Landmassen, verbunden mit einer mächtigen Lateritbildung mit tiefgründiger Verwitterung (Paläolaterit/Regolith) und ersten, z.T. hochgradigen Ausfällungen von Uranerzen. Der Uranerzniederschlag fand aufgrund von tektonisch bedingten Störungen/Verstellungen oder aufgrund von Gesteinsdiskordanzen dort statt, wo hydraulische Wegsamkeiten und geochemische Schwankungen Lösungs- und Fällungsprozesse verursachten. Zur Oberfläche hin reichte die Vererzung bis in die Reduktions-/Oxidationsfront des Regoliths. Um die Erzkörper ist heute mitunter eine sehr intensive Veränderung (Alteration) der Wirtsgesteine zu beobachten: In der unmittelbaren Umgebung einiger massiver Erzkörper wurden die ursprünglichen Gesteinsminerale zu Ton umgebildet (Tonmantel, Alterationszone, Clay Envelop) /SCH 88/.

Seit dem mittleren Proterozoikum lagerten sich in großräumigen Beckenstrukturen, gebunden an das Paläorelief, über dem Regolith mächtige marine, lakustrine, z.T. auch fluviatile

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

und terrestrische Sedimente (z. B. Sand-, Ton-, Kalk-, Mergelgestein) ab. Im Kontaktbereich oxidierender/reduzierender Zonen entstanden infolge von fortdauernden Lösungs- und Fällungsprozessen weitere, z.T. sehr uranerzreiche Lagerstätten /FUC 94/.

Die Lagerstätten sind entweder syngenetische Bildungen, entstanden während der Gesteinsgenese/Diagenese oder epigenetische Bildungen, entstanden infolge von Umlösung und nachfolgender Fällung.

Die Uranerzlagerstätten werden wie folgt unterschieden (Anhang 6: Abb. Blockdiagramm):

1. Unconformity contact Lagerstätten, entstanden in Gesteinsbereichen mit tektonisch bedingten Störungen und/oder Gesteinsdiskordanzen (z.B. Kanada, Cigar Lake).
2. Subconformity (strata/structure bound) Lagerstätten, entstanden in Gesteinsbereichen mit sedimentationsbedingter Wechsellagerung oder Inhomogenität, wie schichtkonkordante Anreicherung in Sand-/Tonsteinen (z.B. Gabun, Oklo; Japan, Tono-Mine).
3. Mischformen (z.B. Koongara, Kanada).

### **Cigar Lake (Kanada)**

Der Cigar Lake Uranerzkörper (Nordsaskatschewan) ist ein ca. 1300 Mio. Jahre altes Uranerzvorkommen mit 1 bis 20 Meter Mächtigkeit, welches in etwa 500 m unter GOF im Hangenden von einem ca. 10 bis 30 m mächtigen Alterationsmantel aus Illit, Kaolinit und Quarz überdeckt ist (basal werden geringere Mächtigkeiten der Alterationszone angenommen). Diese Lagerstätte weist einen hochgradigen Uranerzgehalt auf (12 bis 20; max. 40 bis 60 Gew. % ) auf /BAL 94/; /SCH 88/. Sie bildete sich im Grenzbereich des kristallinen Basements (Gneis/Graphitgneis und Metasedimente) und der Sedimentfolge des Athabasca-Beckens (Sand-/Tonstein/Mergel-/Siltstein). Die Erzkörper sind an steilstehende Störungen gebunden. Aufgrund der hohen Urankonzentration wird das Vorkommen allgemein als Analogon für im Granit zu lagernde abgebrannte Brennelemente betrachtet /IAEA 89/.

Die Untersuchungen dieses Vorkommens haben ergeben, dass Pechblende (Uranitit) bei niedrigen Temperaturen in einer reduzierenden Umgebung über viele Millionen von Jahren

stabil ist /CRA 91/. Lösungsprozesse treten nur bei erhöhten Temperaturen und unter oxidierenden Bedingungen auf /LIU 96/. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass der Alterationsmantel der Lagerstätte weitgehend undurchlässig ist /SCH 88/ und er somit den Erzkörper von seiner Umgebung isoliert. Die Uran- und Schwermineralanreicherung ruft nahezu keine direkten Signale an der Oberfläche hervor. Hier liegen also insgesamt günstige physikochemische Bedingungen vor.

Anderenorts in Kanada, im früh-proterozoischen Allik-Kristallin von Labrador, werden Uranerzlagerstätten beschrieben, die ihre ausgesprochene Stabilität dem Vorkommen im tonigen Paläo-Verwitterungshorizont (Regolith) eines tuffitischen Rhyoliths verdanken /GAN 84/.

### **Oklo (Gabun)**

Vor ca. 2000 bis 1800 Mio. Jahren fanden unter natürlichen Bedingungen am Standort Oklo, Gabun (West-Afrika), Kernspaltungsprozesse statt, die wie heutige Reaktoren, Plutonium und Transurane produzierten /GAU 86/. Wichtigster Faktor war das Vorhandensein von Grundwasser in der Rolle als Kühlmittel. Es bewirkte sowohl, dass sich der Spaltprozess langsam abspielte, als auch, dass die Spaltprodukte kontinuierlich abgeführt wurden. Die Spaltreaktionen fanden im Grenzbereich zwischen liegendem Gneis und hangendem Sandsteinkomplex mit Wechsellagerungen aus schiefrigen, pelitischen und konglomeratischen Sedimentpartien statt.

Eine Analyse des Verhaltens der Uranisotope  $U^{235}$  und  $U^{238}$  unter den vor Ort bestehenden heutigen Grundwasserbedingungen in 400 m unter Geländeoberfläche und in 15 m unter GOF ergab, dass sich die Uranisotope durch eine ausgesprochen hohe Stabilität auszeichnen. Diese Stabilität wird in direktem Zusammenhang mit einem insgesamt günstig gepufferten Milieu bei reduzierenden Bedingungen und in Verbindung mit dem Vorhandensein großer Mengen von Tonmineralien (insbesondere Kaolinit) gesehen /SME 99/; /TOU 96/. Zudem wird angenommen, dass organisches Material (Bitumen, Kerogen) als Falle für Spaltprodukte wirkt /BRC 98/.



### **Tono Mine (Japan)**

In Zentral-Japan, im Mizunami Becken, wurde das gesamte Landschaftsinventar des Tono Minen-Uranerzvorkommens paläogeowissenschaftlich rekonstruiert.

Die Arbeiten zeigen sehr anschaulich die Zusammenhänge einzelner entwicklungsgeschichtlicher Prozesse auf und verdeutlichen insbesondere unter welchen Bedingungen die damalige Landschaft entstanden ist, welche paläoklimatischen Verhältnisse vorlagen und welche geologischen Voraussetzungen sowie hydrologischen/geochemischen Regime geherrscht haben, die zur Bildung der Uranerzvorkommen geführt haben.

Die Uranerzvorkommen wurden in wechsellagernden, miozänen (vor 18 bis 15 Mio. Jahren) und pliozänen (vor 5 bis 0,7 Mio. Jahren) Tertiär-Sedimenten ausgefällt, welche den kretazischen Toki-Granitkomplex (65 bis 100 Mio. Jahre) überlagern. Die Ausfällungen sind an konglomeratische, braunkohle-führende und tuffitische Sandsteinsfolgen gebunden. Sie entstanden vor ca. 10 Mio. Jahren /YUS 92/.

### **Koongarra Lagerstätte (Alligator Rivers, Australien)**

In den Nord-West-Territories stehen zwei Uranerzkörper oberflächennah an. Während die eine, etwas tiefer liegende Lagerstätte mineralisch unverändert vorliegt, zeigt sich der höher anstehende Standort durch Oberflächenverwitterung mineralisch verändert. Die Lagerstätten wurden insbesondere im Hinblick auf geochemische Prozesse, wie Grundwasser- Gesteins- Wechselwirkungen, relative Verteilung von Uran-/ Thoriumnukliden, Nuklidtransport und Retentionsmechanismen untersucht.

Dieses Analogon ermöglichte einen Vergleich der vor Ort bestimmten Residenz- und Migrationszeiten von Uran und seinen Töchtern in der oberen Verwitterungsdecke des Erzkörpers. Daraus abgeleitet wurden Prognosen für das Langzeitverhalten eines solchen Standortes.

### **3.1.2 Magmatogene Uranerzanreicherungen**

In einem Magma nimmt die Uranhäufigkeit mit der Zunahme des Kieselsäure- und Kaliumanteils zu, weshalb in sauren Magmatiten und Vulkaniten eine relative Urananreicherung stattgefunden hat (z.B. Namibia). Aufgrund ihres Ursprungs (intraintrusiv, vulkanogen, z.T. gangförmig oder als Brekzien /FUC 94/) sind ihre Vorkommen nicht an regelhafte Gesteins-Konfigurationen gebunden.

#### **Morro do Ferro (Brasilien)**

Morro do Ferro ist eine Thorium- und Seltene-Erden (REE) Lagerstätte, welche sich für Untersuchungen der Thoriummobilität unter oxidierenden Bedingungen eignet. Thorium gilt als chemisches Analogon für Plutonium. Der Erzkörper steht als Hügel oberflächennah an und wird durch einen korrespondierenden Hang-/Grundwasserstrom entwässert, der die Gesamtmenge mobilisierten Thoriums abführt.

Geologisch gehört der Morro do Ferro zum Pocos de Caldas Plateau, einer tief erodierten Caldera. Vor ca. 75 Mio. Jahren durchstießen geschmolzene Gesteinsmassen auflagernde Gneisschichten. Mit Versiegen der vulkanischen Aktivität brach der Zentralkörper ein (collapse breccia pipe deposit /OEC 99/). Die stark verwitterten Gesteine (mineralisierte vulkanische Brekzien) bestehen überwiegend aus Zirkon, Monazit, Coffinite, Pyrit, Flurit und Baddelyte, jedoch ist der größte Teil des Thoriums nicht etwa in besonders stabilen Kristallen eingebaut, sondern liegt in amorpher Form an Tonpartikeln absorbiert vor. Die Untersuchungen ergaben, dass sich das tongebundene Thorium sehr immobil verhält und nur 8% des im Wasser vorkommenden Thoriums in gelöster Form vorliegt.

#### **Palmottu (Finnland)**

Das Vorkommen Palmottu in Südfinnland verfügt über ca. 1000 t Uran, welches zum größten Teil in ca. 300 m unter GOF im anstehenden, bruchtektonisch beanspruchten und z.T.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

verwitterten Kristallin angereichert ist (vein/orebody deposits /OEC 99/). Der Standort wird von jungglazialen/postglazialen Sedimenten überdeckt. Das Grundwasserregime reicht bis in die Bereiche des anstehenden Kristallins.

Der Standort Palmottu dient vor allem der Erkundung der Beweglichkeit von Uran und Thorium-Isotopen unter natürlichen Bedingungen und der Bestimmung entsprechender Zeitfenster und Rahmenbedingungen, in denen Umlösungs-/Ausfällungsprozesse in erdgeschichtlicher Vergangenheit stattgefunden haben, bzw. in jüngerer Vergangenheit und heute stattfinden.

U/Th liegen entweder silikatisch gebunden im Mineralverband der Gesteine vor, oder sie sind im Kristallgitter zusätzlicher Mineralien wie Apatit und Monazit fixiert. Das Alter dieser Vorkommen liegt bei ca. 1700 bis 1800 Mio. Jahren /RÄI 89/.

Gesteinsporen und Mikrofissuren weisen Calcit-Beläge auf, die ebenfalls hohe Mengen von sorptiv gebundenem U (bis 73%) aufweisen. Das sorptiv gebundene Uran auf den Calcit-Belägen hat ein Alter von ca. 80.000 bis 300.000 Jahren /SUK 96/.

Zur Beurteilung des aktuellen Verhaltens von U/Th werden gegenwärtig die Pfade sowie die Transportzeiten und der Mengenumsatz von in wässriger Phase gelösten mobilen Radionukliden aus dem Bereich des Kristallins bis zur Geländeoberfläche verfolgt.

## **Äspö (Schweden)**

Bei Betrachtungen bezüglich des Rückhaltevermögens von durchströmten Graniten gegenüber Radionukliden (Uranium, Thorium, Seltene-Erden [REE]) wurde in neueren Untersuchungen die Mineralgruppe Epidot-Allanit betrachtet. Allanit ist ein REE-reiches Parageneseprodukt des Epidots, das durch hydrothermale Überprägung von Graniten entstehen kann, wobei das Ca des Epidots durch U, Th oder REE ersetzt wird /JOH 00/.

Im Rahmen der Endlagerung in Graniten wird im Hinblick auf ein mögliches Rückhaltevermögen von Actiniden insbesondere das Epidot-Allanit-System unter hydrothermalen Bedin-

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

gungen untersucht. Natürliche Epidot-Allanit-Paragenesen sind beispielsweise im Äspö-Diorit (Schweden) zu finden /STO 99/.

### **3.1.3 Oberflächennahe/supergene Uranerzanreicherungen**

Oberflächennahe Uranerzanreicherungen bilden sich fast ausschließlich in heißen, trockenen Gebieten und dort bevorzugt in karbonatischen, gipsreichen Talfüllungen, in Endpfannen und Trockensee-Sedimenten (z.B. Australien). Diese Standorte werden aufgrund ihrer rezenten Entstehungsgeschichte und ihres oberflächennahen Auftretens im weiteren nicht berücksichtigt.

### **3.2 Besondere Charakteristika weiterer Analogstandorte**

In vielen Ländern der OECD werden tonige Gesteinsformationen als Wirtsgestein für Endlager radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. Tonige Medien (z. B. Bentonit) sind ebenfalls als Bestandteil von Endlagersystemen (Verfüllmaterial) vorgesehen.

Tonsteine haben einige günstige Eigenschaften, wie sie für die Endlagerung gefordert werden. Sie zeigen beispielsweise häufig eine geringe lithologische Varietät, weisen eine geringe Permeabilität auf, bieten eine günstige chemische Pufferkapazität und neigen zu plastischer Deformation, weshalb das Gestein zur Selbstheilung von Klüften und Rissen durch Quellung bei Wasserzutritt in der Lage ist.

Als Natur-Analoga beweisen sich tonige Gesteine als undurchlässige Deckschichten über Eröl- und Erdgasvorkommen ebenso, wie über Erzlagerstätten, wo sie als effiziente Barriere gegen eine Migration verschiedener chemischer Stoffe wirken.

## **Tonvorkommen in Italien**

In Italien gibt es in der Provinz Umbrien z.T. mächtige und sehr dichte Tonvorkommen. Bei Dunarobba, im Tiber-Tal, wurde vor mehr als 2 Mio. Jahren ein Sequoia-Wald aufrecht verwurzelt luftdicht in einem Tonsediment eingeschlossen. Er überdauerte den Zeitraum bis heute unbeschadet, d.h. als erhaltene nicht silifizierte organische Holzsubstanz /LAM 97/.

Im Gebiet der heutigen Toscana, nahe dem Dorf Ortiatico, durchbrach eine kleine Intrusion von Magma vor ca. 4 Mio. Jahren eine rund 2 Mio. Jahre früher abgelagerte pliozäne Tonschicht. Am Kontakt der gegen 800 Grad Celsius heißen Gesteinsschmelze entstand eine thermometamorphe Reaktionszone mit maximal 15 Meter Ausdehnung. Es bildete sich ein Saum mit quellfähigem Smectit, der dieser Zone ein erhöhtes Abdichtungspotential verleiht. Außerhalb dieser thermisch bedingten Reaktionszone blieb das ursprüngliche Tonsediment in seinem Mineralbestand erhalten.

Die geologische Situation wird so interpretiert, dass der Ton bei Temperaturschock sowie beim Zutritt hydrothermalen Gase und Flüssigkeiten offensichtlich belastbar reagiert; d. h. auch nach thermischer Einwirkung zeigt sich der Tonstandort immer noch gering permeabel.

## **Kupfererzvorkommen in Finnland**

Das geologische Umfeld natürlicher Lagerstätten in „stabilem“ Zustand über lange geologische Zeiträume im Kristallin wird bezüglich der Bildungs- und Entwicklungsgeschichte eines Kupfererzvorkommens in Hyrkkölä, SW Finnland, untersucht /MAR 99/. Hier wird insbesondere das Langzeitverhalten von natürlichem Kupfer als Analogon für Kupferbehältnisse (Schwedisches Konzept: Hauptlast technische Barriere) betrachtet.

Im anstehenden Pegmatit liegt gediegenes Kupfer mit einem Alter von ca. 1700 Mio. Jahren vor. Untersuchungen anhand von Bohrungen haben in ca. 100 Meter Teufe ergeben, dass Kluftsysteme und Störungen des wassergesättigten, tektonisch beanspruchten Gesteinskomplexes mit dem Tonmineral Smectit (Auslösung aus dem Mineralverband des Pegmatits infolge mechanischer Beanspruchung) ausgekleidet sind. Die Tonbeläge enthalten sekundär

gebildetes, sowohl z. T. unverwittertes, als auch verwittertes (korrodiertes) Kupfer. Außer Cu liegen Seltene Erden-Elemente (REE) sowie verschiedene U-Isotope im Ton-Kupfer-Mineral-Komplex gebunden vor. Die Ausfällung von REE und U-Isotopen wird bei mindestens 350.000 Jahren bis zu einem Entstehungsalter von mehr als 1 Mio. Jahren angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass U (VI) zu U (IV) an der Oberfläche von Kupfersulfiden reduziert wurde und entsprechend das Umfeld von Smectit-Kupfer-Mineralkomplexen migrierendes U auch im wassergesättigten Milieu über lange Zeiträume zu immobilisieren vermag. Gleichzeitig wird damit dokumentiert, dass Korrosionsprozesse an reinem Kupfer unter stabilen gesteins- und hydrochemischen Bedingungen auch in oxidierendem Milieu sehr langsam ablaufen.

### **3.3 Analogstandorte mit günstigen Grundwasserverhältnissen**

Bezüglich der Grundwasserverhältnisse spielen bei Analogie-Betrachtungen Herkunft und Alter von Wasser, wässrigen Lösungen (Fluiden) und Gasen in tiefen geologischen Formationen eine besondere Rolle, insbesondere bei solchen Wässern/Flüssigkeitseinschlüssen, bei denen eine genetische, alterbestimmende Zuordnung möglich ist bzw. die nachweislich auf hohe Verweilzeiten/lange Grundwasserlaufzeiten im Gesteinkörper schließen lassen.

Tiefe geologische Formationen mit Erzlagerstätten weisen nur sehr langsame Grundwasserbewegungen auf, die darauf hindeuten, daß über sehr lange Zeiträume die Stoffumsätze (Mineralisation, Umlösungs- und Ausfällungsprozesse) allein in der Geosphäre stattgefunden haben /BEC 91/. Erdöl- und Erdgasstandorte werden von Tiefenwässern begleitet, die zeitlich mit dem Alter der Lagerstättenbildungen übereinstimmen /PEK 93/. Auch marine Evaporite sind von gleichen Grundwasserverhältnissen gekennzeichnet.

Die Messung der Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopenzusammensetzung von Wässern und wässrigen Lösungen in tiefen geologischen Formationen ermöglicht eine Einschätzung der Verweilzeiten im geologischen Umfeld ihres Vorkommens.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

Wässer aus dem biosphärischen hydrologischen Kreislauf gruppieren sich im 18-O und Deuterium-Diagramm entlang einer Regressionsgeraden, der sogenannten Global Meteoric Waterline (GMWL). Bei salinen Wässern in tiefen geologischen Formationen weicht die Gerade oft signifikant von der GMWL ab. In typischer Weise enthalten diese Wässer kein Tritium und  $^{14}\text{C}$  /STI 88/. Als Ursache werden sehr langsame Austauschprozesse mit den Mineralien des Grundwasserleiters angenommen, so daß von sehr langen Verweilzeiten im tiefen geologischen System ausgegangen werden kann.

### **Untersuchungen an Wässern in tiefer Beckenlage Norddeutschlands**

Untersuchungen an Wässern in tiefer Beckenlage der Norddeutschen Senke haben folgendes gezeigt: Die Formationswässer weichen mit zunehmender Tiefe und Temperatur in steigendem Maße von der GMWL-Linie ab. Die Beobachtungen lassen auf Verweilzeiten von Hunderttausenden bis Millionen von Jahren schließen /BRN 88/. Lange Grundwasserlaufzeiten kennzeichnen z.B. am Standort Konrad die Grundwasserpfade der unterschiedlichen Sedimentdecken des Untersuchungsgebietes: Unterkreidepfad: 430.000 Jahre; Oxfordpfad: 300.000 Jahre; Cornbrashpfad: 1,1 Mio. Jahre.

### **Untersuchungen von Fluiden mariner Evaporite in Norddeutschland**

Fluide aus marinen Evaporiten in Norddeutschland zeigen, dass die Flüssigkeitseinschlüsse keine salzstockfremden Lösungen enthalten. Vielmehr handelt es sich um Restlösungen von hochkonzentriertem, diagenetisch verändertem Meerwasser, welches ein Alter von etwa 250 Mio. Jahren aufweist /HER 91/, /BOR 93/.

### **Untersuchungen an Wässern im subsedimentären Gebirge**

Für das subsedimentäre Gebirge wird der Zusammenhang und die Genese von Ca-Cl-Basement-Brines mit sedimentären Na-Cl-Formationswässern, hydrothermalen Mineralisa-

tionen aus Ca-Na-Cl-Lösungen und Ca-Na-Cl-reichen Flüssigkeitseinschlüssen im kristallinen Gestein beispielsweise im Rahmen der Tiefbohrung KOLA SG3 betrachtet /BEH.93/.

Interessant ist die Beobachtung hochsalinarer Tiefenlösungen, die sich nicht aus dem Mineralbestand des Wasserleiters erklären lassen. Es wird davon ausgegangen, dass im Zuge von Uplift-Prozessen marine Wässer aus dem auflagernden Deckgebirge in das Grundgebirge eingedrungen sind. Die Tiefeninvasion dieser Fluide endet in etwa 6 bis 10 km Tiefe. Analog ihrer mineralischen Zusammensetzung könnten solche Ca-Na-Cl-reichen Lösungen im Kristallin über den Zeitpunkt des Upliftings genauer zugeordnet werden. Sie unterlagen entsprechend seit mindestens dieser Zeit tendenziell abwärtsgerichteten Strömungen bzw. deuten auf lange Verweilzeiten in der Geosphäre hin (sofern sie nicht entlang tektonischer Störungen als mineralsalzreiche Thermalquellen wieder an die Oberfläche gelangen).

#### **4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Die Analogiestudien dienen dazu, aufzuzeigen, dass

- in der Natur ähnliche Prozesse abgelaufen sind, wie in einem Endlager erwartet werden,
- in der Natur über lange Zeiträume geologische Verhältnisse herrschen, die sich durch eine hohe Stabilität auszeichnen und
- die bei der Endlagerung zu betrachtenden Prozesse mit langen Zeithorizonten für die Nachbetriebsphase (Prognose der Langzeitsicherheit) sich in den natürlichen Analoga nachvollziehen lassen.

Die aufgeführten Beispiele wurden insbesondere mit Blick auf die vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte gesuchten günstigen geologischen Gesamtsituationen ausgewertet. Die vorgestellten natürlichen Analoga ermöglichen Aussagen bezüglich

1. geologischer Systeme, die als natürliche Barrieren wirken,
2. günstiger Gesteinseigenschaften von geologischen Systemen und
3. hoher Grundwasseralter bzw. hoher Grundwasserlaufzeiten.



Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

1. Für die Betrachtung der Langzeitentwicklung geologischer Systeme mit hoher Barrierenwirksamkeit dienen insbesondere Uranerzlagerstätten als natürliche Analoga:

- Die ältesten (hier betrachteten) Uranerzlagerstätten sind in Geosynklinalstrukturen der kontinentalen Landmassen entstanden. Weitere Lagerstätten entwickelten sich in auflagernden Beckensedimenten.
- Die Lagerstätten sind entweder syngenetische Bildungen, entstanden während der Gesteinsgenese/Diagenese oder epigenetische Bildungen, entstanden infolge von Umlösung und nachfolgender Fällung.
- Der Uranerzniederschlag fand dort statt, wo hydraulische Wegsamkeiten und geochemische Schwankungen Lösungs- und Fällungsprozesse auslösten.
- Die Erzausfällungen sind im Kontaktbereich von reduzierenden zu oxidierenden Zonen entstanden.
- Die betrachteten Analogstandorte stellen günstige geologische Gesamtsituationen im Sinne eines vom Arbeitskreis postulierten Konfigurationstyps dar, wobei das Wirtsgestein hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist.
- Da die Uranerzlagerstätten z.T. mehrphasige Umlösungs-/Ausfällungsprozesse aufzeigen bzw. Lagerstätten-Generationen nachweisbar sind, muss grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass der Wirtsgesteinskörper bezüglich seiner hydraulischen Eigenschaften offen ist.
- Die offene Gesteins-Konfiguration zeigt sich als nicht nachteilig, wenn ein abdichtender toniger Paläo-Verwitterungshorizont (Regolith) oder ein Tonmantel (Alterationszone der Lagerstätte) oder abdichtende tonige Formationen im Deckgebirge entscheidender Bestandteil einer günstigen geologischen Gesamtsituation sind. Tonsteine wirken sowohl als lithologische wie auch als geochemische Barriere.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

2. Die Uranerzlagerstätten sowie weitere Analoga (Tonvorkommen, Kupfererzstandort) wurden bezüglich ihrer günstigen Gesteinseigenschaften ausgewertet.

- Für Radionuklide muss das Rückhaltevermögen unterschiedlicher Tonminerale im Gesteinsverband (Poren, Mikrofissuren), in Kluffüllungen oder Verwitterungsdecken als besonders hoch und über lange Zeiträume stabil eingestuft werden.
- Eine stabile sorptive Bindung von Radionukliden an Tonminerale ist auch in wassergesättigtem Milieu und bei oxidierenden Bedingungen zu beobachten.
- Tonsedimente und Tonsteine der betrachteten Analogstandorte sind im Einzelfall bei hohen Temperaturen sowie beim Zutritt hydrothormaler Gase und Flüssigkeiten offensichtlich belastbar; d.h. auch nach thermischer Einwirkung ist die Permeabilität immer noch gering.
- Für eine genau Charakterisierung sind weitere Untersuchungen notwendig.
- Stabile sorptive Bindungen bestehen auch mit organischem und glasreichem Material.

3. Ein hohes Grundwasseralter bzw. lange Grundwasserlaufzeiten/sehr langsame Grundwasserbewegungen kennzeichnen die betrachteten Analogstandorte.

- Beobachtungen am Standort Konrad (Deckgebirge) lassen auf Verweilzeiten des Grundwassers von Hunderttausenden bis Millionen von Jahren schließen.
- Lange Grundwasserlaufzeiten kennzeichnen die Grundwasserpfade der unterschiedlichen Sedimentdecken des Untersuchungsgebietes.
- Ca-Na-Cl-reiche Lösungen im Kristallin (Grundgebirge), die nicht identisch sind mit dem Mineralbestand des Wasserleiters, deuten auf ein Eindringen aus dem Deckgebirge im Zuge von Uplifting Prozessen hin.
- Diese Lösungen unterlagen entsprechend seit mindestens der Zeit des Upliftings tendenziell abwärtsgerichteten Strömungen bzw. deuten auf lange Verweilzeiten in der Geosphäre hin.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

- Die Konfiguration betrachteter Salzstrukturen in Norddeutschland entspricht einem Barrieretyp, bei dem das Wirtsgestein hinsichtlich der Barrierewirksamkeit wichtiger Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist. Hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften handelt es sich um ein geschlossenes System.
- Fluid-Einschlüsse haben synsedimentäres Alter (ca. 250 Mio. Jahre).

Da sich aus den Analogie-Studien ableiten lässt, dass Tonsteine über ein hohes Isolationspotential verfügen und Tonmineralien im Gesteinsverband entscheidend sind für das Rückhaltevermögen von Radionukliden, sollte der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte den Themenkomplex „Ton“ vertiefen. Analogie-Studien im Ton, insbesondere zum Limit der Stabilität bei thermischer Belastung, zum Reaktionsverhalten bei Erhöhung des Gasdruckes, zur Rolle als Sorbent in Spalten und Klüften, zur Durchlässigkeit und zum Quellvermögen, sind derzeit beispielsweise am Standort Bure in Frankreich oder am Standort Mont Terri, Schweiz, geplant bzw. werden bereits durchgeführt. Ein „Andocken“ an die Untersuchungsprogramme könnte hilfreich sein.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

## 5 Anhang Tabelle: Zusammenfassung der ausgewählten Analoga

Standort	Geologie	Struktur	Konfiguration	Analoga für geologische Systeme, die als natürliche Barriere wirken
Oklo (Gabun)	Sandsteinkomplex (Wechselagerung) über Gneis	Beckenstruktur über Kontinental-schild	Barriere Typ offen	Natürliche Kernspaltungsprozesse vor ca. 2000 Mio. Jahren; Stabilitätsnachweis der Uranisotope in günstig gepuffertem Milieu bei reduzierenden Bedingungen; hohe sorptive Bindung an Tonmineralien und organischem Material (pH: 6,5 bis 8,5; Eh: - 300 bis - 400 mV; 70 Grad C)
Cigar Lake (Kanada)	Meta-sedimente/Gneise/Alterationszone (Alterationsmantel)	Beckenstruktur über Kontinental-schild	Barriere Typ offen	Nachweis hoher Stabilität von Pechblende (Uranitit) bei niedrigen Gebirgstemperaturen und in reduzierendem Milieu; Nachweis der Isolationswirkung der Verwitterungsdecke; Alter der Lagerstätte: 1300 Mio. Jahre
Koongara/Aligators River (Australien)	Verwitterungsdecke	Kristallin; Kontinental-schild	Oberflächen-naher Standort	Resistenz- und Migrationszeiten von Uran und Uranisotopen in der Verwitterungsdecke eines Erzkörpers
Palmottu (Finnland)	Granit/Pegmatit/Gneis Migmatit	Kristallin; Kontinentalschild	Barriere Typ offen	Mobilisierungs-/Immobilisierungsverhalten von U/Th im silikatischen Gesteinsverband bzw. ihre Bindungsfähigkeit an Calcit-Beläge in Gesteinsporen und Mikrofissuren; Alter des Calcit-gebundenen U: 80.000 bis 300.000 Jahre; Entstehungsalter der Primär-Lagerstätten im Migmatit/Gneis: 1700-1800 Mio. Jahre
Morro do Ferro (Brasilien)	Vulkanische Gesteine/Verwitterungsdecke	Kaldera in Kristallin	Oberflächen-naher Standort	Untersuchung der Thoriummobilität unter oxidierenden Bedingungen; Thorium weitgehend an Tonpartikel absorbiert; Alter der Lagerstätte: $\leq 75$ Mio. Jahre
Äspö (Schweden)	Diorit	Kristallin; Kontinental-schild	Barriere Typ offen	Rückhaltevermögen kristalliner Gesteine gegenüber Actiniden abgeleitet aus natürlichen Epidot-Allanit Paragenesen in Abhängigkeit der hydrothermalen Verhältnisse

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

**Tabelle: Zusammenfassung der ausgewählten Analoga**

<b>Standort</b>	<b>Geologie</b>	<b>Struktur</b>	<b>Konfiguration</b>	<b>Analoga für geologische Systeme, die als natürliche Barriere wirken</b>
Tono-Mine (Japan)	Sandstein-komplex (Wechsel-lagerung) über Granit	Becken-struktur über kreta-zischem Schild	Barriere Typ offen	Rekonstruktion der paläoklimatischen, -topographischen, -geologischen, -hydrologischen und -geochemischen Verhältnisse der Region; Alter der Uranlagerstätte: 5 bis 18 Mio. Jahre

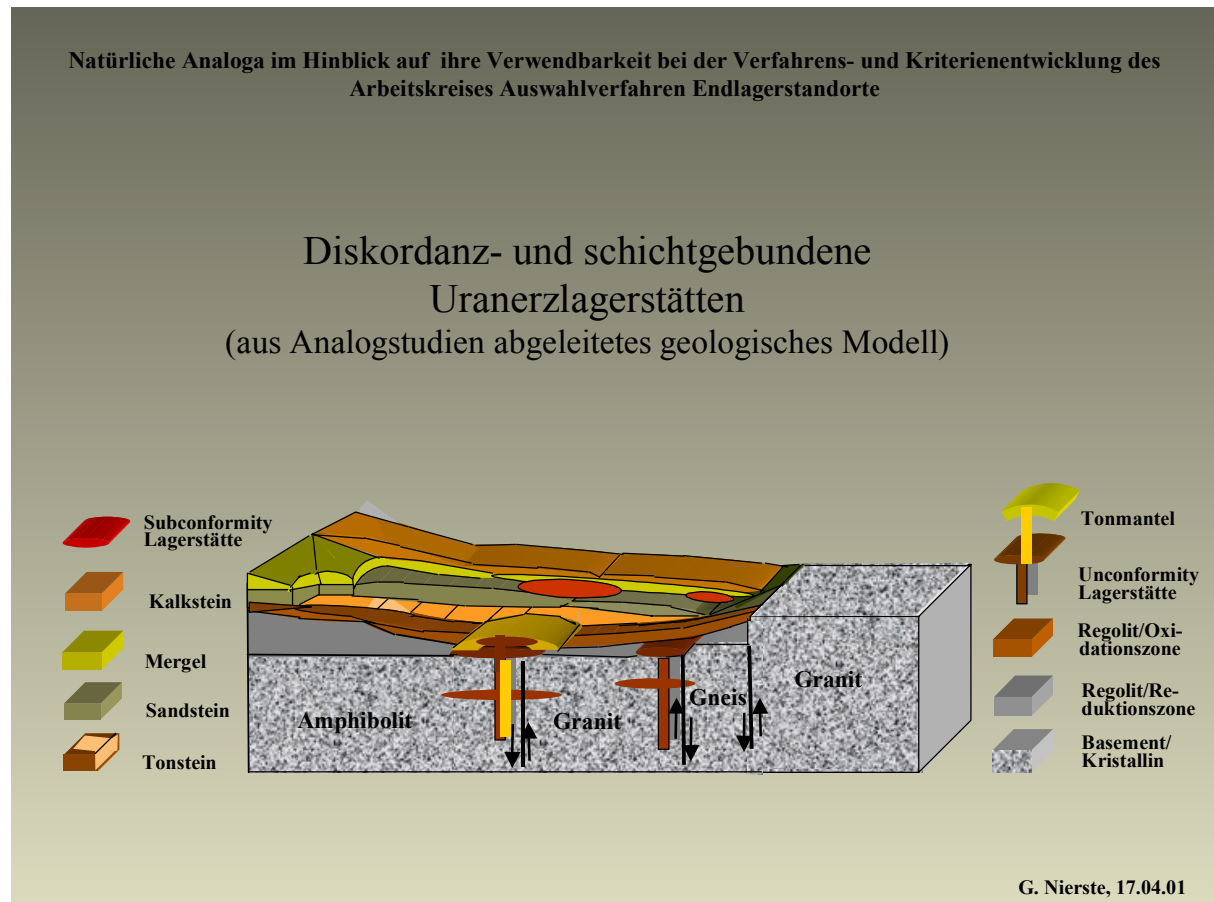
<b>Standort</b>	<b>Geologie</b>	<b>Struktur</b>	<b>Konfiguration</b>	<b>Analoga für günstige Gesteinseigenschaften</b>
Dunarobba (Italien)	Ton	Alpidische Falten-struktur	Barriere Typ offen	Isolations- und Dichtigkeitsnachweis für Tonvorkommen, auch unter thermischer Belastung; Alter der Fossilwälder: 2 Mio. Jahre
Ortiatico (Italien)	Magmatit/Ton	Intrusion; Becken-struktur	Barrieretyp offen	Reaktionsvermögen von Ton bei Belastung durch hohe Temperaturen (800 Grad Celsius) und bei Zutritt hydrothermalen Gase und Flüssigkeiten. Bildung von quellfähigem Smectit mit erhöhtem Abdichtungspotential; Alter der Intrusion: vor 4 Mio. Jahren
Hyrkkölä (Finnland)	Pegmatit	Kristallin, Kontinental-schild	Barriere Typ offen	Untersuchungen zur Stabilität von Kupfer in smectitischen Kluftfüllungen in wassergesättigtem Gesteinsverband; Nachweis reduzierter REE- und U-Isotope im Tonmineral-Kupfer-Komplex; Alter: mindestens 350.000 bis älter 1 Mio. Jahre.

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

<b>Standort</b>	<b>Geologie</b>	<b>Struktur</b>	<b>Konfiguration</b>	<b>Analoga für günstige Grundwasserverhältnisse</b>
Randsenke; Norddeutsches Tiefland	Unterkreide- tone über Juraschichten	Becken- struktur	Barriere Typ offen	Lange Grundwasserlaufzeiten: Unterkreidepfad: 430.000 Jahre; Oxfordpfad: 300.000 Jahre; Cornbrashpfad: 1,1 Mio. Jahre
Salzstock; Nord- deutschland	Steinsalz	Diapir	Barriere Typ geschlossen	Fluide Einschlüsse in Einzelhohl- räumen; Größenordnung: mehrere 100 m <sup>2</sup> ; Alter: 250 Mio. Jahre
KTB (KOLA SG3; BRD)	Sedimentge- steine über Kristallin	Becken- struktur über Kon- tinentalschild	Barriere Typ offen	Untersuchung der Tiefengrund- wässer; Untersuchung von flui- den/gasförmigen Mikro-Ein- schlüssen (isotopengeochemi- sche Analysen und Altersdatie- rungen)

Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

## 6 Anhang Blockdiagramm: Diskordanz- und schichtgebundene Uranerzlagertstätten



## 7 Schriftenverzeichnis

- /AKE 00/: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Interner Zwischenbericht 2000 anlässlich des 1. Workshops am 15. und 16. September in Kassel; Stand Juni 2000 (BMU, Bonn); 2000.
- /BAL 94/: Baltes, B. & Wernicke, R. S.: Die Bedeutung von natürlichen Analoga für die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Stoffe. - Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle am 4. Und 5. November 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK); 1994.
- /BEC 91/: Becksmann, E.: Das Alter des Grundwassers. - Mém. Assoc. Int. Hydrogéologues. Réunion génétique à Rome, 4 S.; (Napoli); 1991.
- /BOR 93/: Borstel, L. E. v.: Lösungen in marinen Evaporiten. - BfS-Schriften 10/93, 314 S., 72 Abb., 74 Tab. (Salzgitter); 1993.
- /BUR 83/: Burkart, W.: Das natürliche Äquivalent einer Lagerstätte für hochradioaktive Abfälle.- Neue Züricher Zeitung vom 15.6.1983.
- /BRA/ 93/: Brammer, K. J. & Knipping, B. J.: The origin of formation waters in the abandoned Konrad iron ore mine.- Eur. J. Mineral. 5: 787-797; (Salzgitter, Germany); 1993.
- /BRC 98/: Bracke, G. & Gautier-Lafaye, F.: Bagombé – A unique natural site for studying the Migration of fission Products under surface weathering conditions.- Uranium Mining and Hydrology II. Proceedings of the International Conference and Workshop im September 1998: 527-536, TU Bergakademie Freiberg, (Verlag Sven von Loga, Köln); 1998.



- /BRE 94/: Brewitz, W.: Natürliche Analoga: Eine zusätzliche Möglichkeit zum Langzeitsicherheitsnachweis für geologische Endlager; Überblick über bisherige nationale und internationale Arbeiten.- Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle am 4. Und 5. November 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK); 1994.
- /BRN 88/: Brennecke, P.: Chemische Untersuchungen und Altersbestimmungen an tiefen Grundwässern der Schachanlage Konrad. -Jahresbericht Physikalische Technische Bundesanstalt (PTB), 228; 1988.
- /FUC 94/: Fuchs, H.: Zusammenfassende Gliederung von Uranlagerstätten.- Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle am 4. Und 5. November 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK); 1994.
- /GAN 84/: Ghandi, S.S.: Uranium in Early Proterozoic Aillik Group, Labrador.- Proterozoic unconformity and stratabound uranium deposits, IAEA-TECDOC-315: 35-68, (IAEA, Wien) 1984.
- /GAU 86/: Gauthier-Lafaye, F.: Les gisements d'Uranium du Gabon et les réacteurs d'Oklo.- Sciences Géologiques, Mém. 78: 206 S. ( ULP/CNRS, Strasbourg); 1986.
- /GRA 94/: Grambow, B.: Natürliche Analoga für HAW-Abfallgebinde.- Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle am 4. und 5. November 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK); 1994.
- /HER 91/: Herrmann, A. G. & Borstel, L. E. v.: The composition and origin of fluid inclusions in Zechstein evaporites of Germany.- N. Jb. Miner. Mh., 6: 263-269, (Stuttgart); 1991.

- /HER 93/: Herrmann, A. G. & Knipping, B.: Fluide Komponenten als Teile des Stoffbestandes der Evaporite im Salzstock Gorleben - Vorkommen, Herkunft, Entstehung und Wechselwirkungen mit den Salzgesteinen. - Gutachten für das Niedersächsische Umweltministerium; 1993.
- /HOF 89/: Hofmann, B.: Genese, Alteration und rezentes Fließsystem der Uranlagerstätte Kunkelbach (Menzenschwand, Südschwarzwald); 1989.
- /IAE 97/: IAEA: Changes and events in uranium deposit development, exploration, resources, production and the world supply-demand relationship. - Bericht der OECD/NEA/IAEA, Wien; 1997.
- /LAM 97/: Lambert, A.: Ton: kleine Teilchen – große Wirkung. -nagra informiert 31: 6-18; (CH-Wettingen); 1997.
- /JOH 00/: Johannes, K.: Das Rückhaltevermögen alterierter Granite für endlagerrelevante Seltene Erden. Naturbeobachtungen und Experimente. - Berichte aus der Geowissenschaft D 104, Dissertation Universität Clausthal; 2000.
- /LIU 96/: Liu, J. & al.: Transport modelling in the natural analogue study of the Cigar Lake uranium deposit (Saskatchewan, Canada). - Journal of Contaminant Hydrology 21: 3-17; (Elsevier, Amsterdam); 1996.
- /MAR 99/: Marcos, N. & Ahonen, L.: New data on the Hyrkkölä U-Cu mineralisation: The behavior of native copper in a natural environment. -POSIVA 99-23, 77S.; (Helsinki); 1999.
- /OEC 99/: OECD/IAEA: Uranium 1999 Resources, Production and Demand. - Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency; 340 S. (Paris); 2000.

- /PEK 93/: Pekdeker, A. & Thomas, L.: Genese von Tiefenwässern verschiedener geologischer Einheiten unter besonderer Berücksichtigung der Erdöl begleitenden Wässer.- Berichte Deutsche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.(DGMK); Vorträge der Frühjahrstagung am 13. und 14. Mai in Celle; (Hamburg); 1993.
- /RÖT 94/: Röthemeyer, H.: Die Bedeutung natürlicher Analoga für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern aus Sicht des BfS.- Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle am 4. und 5. November 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK); 1994.
- /RÄI 89/: Räisänen, E: Uraniferous granitic veins in the Sevefennian Shist Belt in Nummi-Pusula, Southern Finland.-Uranium Deposits in Magmatic and Metamorphic Rocks. Proceedings of a Technical Committee Meeting 29. September to 3.October 1986, Salamaca (IAEA-TC-571/3, Wien); 1989.
- /SCH 88/: Schmidt, Chr.: Methodenentwicklung zum untertägigen Abbau extrem reicher Uranlagerstätten.- Abschlußbericht BMFT-FB (UR 1905 2); Uranerzbergbau GMBH (Bonn); 1988.
- /SME 99/: Smellie, J.A.T. & Karlson, S.:The use of natural analogues to assess radionuclide transport.- Engineering Geology 52: 193-220; (Amsterdam, Elsevier); 1999.
- /STI 88/: Stier-Friedland & Schuhmacher, C.: Isotopenuntersuchungen aus tiefen Grundwässern aus der Schachtanlage Konrad. - Jahresbericht Physikalische Technische Bundesanstalt (PTB): 228; 1988.
- /STO 99/: Stosnach, H.: Eine Einschätzung der Verteilung von Spurenelementen in Äspö-Granitoiden und ihrer Bedeutung für die Verwendung von Graniten als geologische Barriere.- Dissertation TU Clausthal; 1999.

- /SUK 96/: Suksi, J. & al.: Selective extractions in uranium migration studies – findings from a natural analogue study at Palmottu, southern Finland. - Journal of Contaminant Hydrology 21: 47-58; 1996 (Elsevier, Amsterdam).
- /TOU 96/: Toulhoat, P. & al.: Preliminary studies of groundwater flow and migration of uranium isotopes around the Oklo natural reactors (Gabon).- Journal of Contaminant Hydrology 21: 19-34; 1996 (Elsevier, Amsterdam).
- /WIS 99/ Chronik der Wismut.- Gründung und Entwicklung der staatlichen Aktiengesellschaft der Buntmetallindustrie (SAG Wismut); Wismut GmbH; 1999.
- /YUS 92/: Yusa & al.: Geological and Geochemical Indicators of Paläohydrogeology in Tono Uranium Deposits, Japan- Paläohydrogeological methods and their applications.- Disposal of Radioactive Waste: Proceedings of an NEA Workshop the 9th. and 10th. November, NEA (Paris); 1992.