

# Zeolithe – Entstehung und Vorkommen

## Fallbeispiel Tschernobyl

Anna Malsy, Nicola Doebelin

18. August 2004

### Inhaltsverzeichnis

|          |                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Geschichte der Zeolith-Forschung</b>             | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Entstehung und Vorkommen</b>                     | <b>2</b>  |
| 2.1      | Zeolithe in Lavaströmen . . . . .                   | 2         |
| 2.2      | Salzsee . . . . .                                   | 3         |
| 2.3      | Tiefseesedimente . . . . .                          | 3         |
| 2.4      | Vulkanische Aschen und Tuffe . . . . .              | 5         |
| 2.5      | Zeolithe in der Schweiz . . . . .                   | 6         |
| <b>3</b> | <b>Fallbeispiel Tschernobyl</b>                     | <b>6</b>  |
| 3.1      | Der Reaktorunfall – das fatale Experiment . . . . . | 6         |
| 3.2      | Die Folgen des Unfalls . . . . .                    | 7         |
| 3.3      | Einsatz von Zeolithen in Tschernobyl . . . . .      | 8         |
| 3.4      | Natürliche Barrieren . . . . .                      | 9         |
| <b>4</b> | <b>Radioaktivität in der Schweiz</b>                | <b>10</b> |
| 4.1      | Politische Betrachtung . . . . .                    | 10        |
| <b>5</b> | <b>Was bringt die Zukunft</b>                       | <b>11</b> |

### 1 Geschichte der Zeolith-Forschung

Bereits 1756 entdeckte der schwedische Mineraloge Freiherr Axel Frederick Cronstedt eine Gruppe von Mineralen mit besonderen Eigenschaften: Wenn sie mit einer Flamme erhitzt werden verlieren sie Wasser, scheinen zu sieden und schmelzen zu einer weißen Glasperle. Deshalb gab er ihnen den Namen Zeolithe, was übersetzt „Siedende Steine“ heißt (*zei*n: sieden; *litho*s: Stein). In den 200 darauffolgenden Jahre wurde den Zeolithen keine besondere Beachtung geschenkt. Sie galten als mineralogische Kuriosität und waren als sekundär gebildete Mineralien in Hohlräumen und hydrothermalen Adern von vulkanischen Laven bekannt. Vor der Entdeckung der Röntgen-Diffraktometrie, einer Analyse-methode, mit der sich die Kristallstruktur bestimmen lässt, um 1920

wurden Mineralien nur mit dem Mikroskop, das heißt nach ihrer äußeren Form, einigen physikalischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung beschrieben. Da aber Zeolith-Mineralien relativ feinkörnig sind, wurden sie oft übersehen oder falsch klassifiziert.

Anfangs des 20. Jahrhunderts begannen die Chemiker intensiv die Adsorptions- und Ionenaustauschfähigkeiten der Zeolithe zu erforschen. Da die natürlichen Zeolith-Vorkommen in Lavaströmen zu klein und zu schwer zugänglich waren um von kommerziellem Interesse zu sein, wurde vor allem in den 1950er Jahren viel Energie in die Erforschung der Synthese von Zeolithen gesteckt. Gleichzeitig, und vor allem aufgrund der Tatsache, dass die Röntgen-Diffraktometrie nun routinemäßig eingesetzt wurde, fanden Geologen große Mengen an Zeolith-Mineralien, die durch die Reaktion vulkanischer Tuffe mit Seewasser, Meereswasser oder Grundwasser entstanden waren. Der Zeolith-Anteil in solchen Gesteinen kann fast 100 % erreichen. Häufig sind die Kristalle so feinkörnig, dass man sie bisher nicht als Zeolithe erkannt hatte.

Die Entdeckung, dass Zeolithe in solch großen Mengen gebildet werden, war ein Meilenstein in den Erdwissenschaften. Nun bot sich auf einmal die Möglichkeit, Anwendungen, die man aufgrund des hohen Preises synthetischer Zeolithe für unrealisierbar hielt in die Praxis umzusetzen. Das Rohmaterial dazu war plötzlich billig und in grossen Mengen verfügbar. Dieser Umstand verhalf den Zeolith-Mineralien von der ursprünglich mineralogischen Kuriosität zu einem wichtigen industriellen Rohstoff. Die Gruppe der Zeolith-Mineralien gehört heute zu den größten Mineralgruppen, es wurden mehr als 40 Spezies gefunden und fast 100 weitere, in der Natur nicht vorkommende Arten wurden im Labor synthetisiert.

Im Folgenden wollen wir uns jedoch auf drei Arten von Zeolithen beschränken: *Phillipsit* ( $K_2(Na, Ca_{0.5})_3[Al_5Si_{11}O_{32}] \cdot 12 H_2O$ ), *Klinoptilolith* ( $(Na,K,Ca_{0.5})_7[Al_7Si_{29}O_{72}] \cdot 22 H_2O$ ) und *Analcim* ( $Na_{16}[Al_{16}Si_{32}O_{96}] \cdot 16 H_2O$ )

## 2 Entstehung und Vorkommen

Die drei grundlegenden Voraussetzungen für die Bildung von Zeolith-Mineralien sind:

- alkaline pH-Bedingungen
- Verfügbarkeit von Si und Al, sowie Na oder K oder Ca
- Wasser und relativ niedrige Temperatur

Zur Bildung von Zeolithen kommen verschiedenen Ausgangsmaterialien in Frage: vulkanisches Glas, siliziumreiche Tiefseesedimente, Alumosilikat-Mineralien, Tonminerale (Smektit und Kaolinit) sowie Impakt-Glas (Glasbildung in Zusammenhang mit einem Meteoriteneinschlag).

### 2.1 Zeolithe in Lavaströmen

Schöne Zeolith-Kristalle entstehen, wenn heiße Lavaströme unter Wasserkontakt (meist Oberflächen-Wasser) zu vulkanischem Glas erstarren. Durch in den Spalten zirkulierendes Wasser wird das Glas stark zersetzt und die für die Zeolith-Bildung benötigten Elemente gehen in Lösung. Beim Aufsteigen der heißen Flüssigkeit werden in den blasigen Hohlräumen („eingefrorene“ Gasblasen) der erstarrten Lava Zeolithe ausgefällt (Abb. 1).

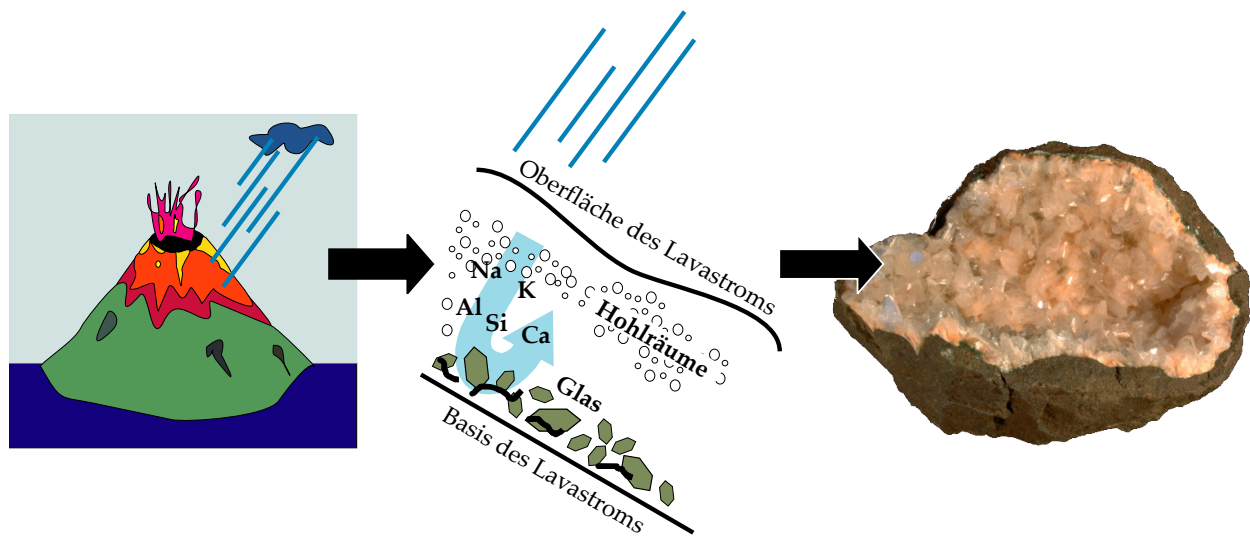


Abbildung 1: Durch die Zirkulation von meteorischem Wasser (von außen eindringendes Regenwasser) werden Elemente aus dem Vulkangestein gelöst, und in den Hohlräumen des abkühlenden Lavastroms bilden sich Zeolithe. Rechts: Heulandit aus dem Fasstal, Österreich.

## 2.2 Salzsee

Zeolithe entstehen oft in Ablagerungen von alkalischen Salzseen wo sich glasig Tuffe zu fast reinen Zeolith-Ablagerungen und Feldspat umwandeln. Solche Seen sind in isolierten Becken in ariden und semiariden Regionen zu finden. Das Seewasser ist reich an gelöstem Na-Karbonat und -Bikarbonat und hat einen pH-Wert von  $\approx 9.5$ . Bei diesen Bedingungen wird viel Al und Si gelöst, dies wiederum erlaubt die Bildung von Zeolithen. Die übrigen Ionen (Na, Ca, K) werden durch  $\text{CO}_2$ -haltigen Regen aus dem Nebengestein ausgewaschen. Die Reaktion verläuft relativ schnell, so kann sich glasiger Tuff in nur 1000 Jahren zu Zeolith umwandeln. Eine saline Seeablagerung, die einige 100'000 Jahre alt ist, zeigt eine mineralogische Zonierung: a) äußere Frischwasserzone mit unverwittertem vulkanischem Glas, b) saline Zone mit den Zeolithen Phillipsit und Klinoptilolith, c) stärker saline Zone mit Analcim, und d) Zone im Zentrum des Beckens mit Feldspat-Mineralien (Abb. 2).

## 2.3 Tiefseesedimente

In Tiefseesedimenten gebildete Zeolithe machen wahrscheinlich einen riesigen Anteil der weltweiten Zeolithvorkommen aus. Der Zugang zu diesen Ablagerungen ist jedoch naturgemäß etwas schwierig, und somit ist auch die tatsächliche Verbreitung nicht exakt bekannt. Tiefseebohrungen bestätigen jedoch, dass in weiten Teilen der Weltmeere Zeolithablagerungen mit sehr hohem Reinheitsgrad zu finden sind. Das Quellmaterial ist in diesem Fall jedoch nicht immer vulkanische Asche, sondern auch silizium- und fossilreiche Sedimente (kieselige Fossilien, rote Tone). Diese reagieren mit dem salzhaltigen Meerwasser, wodurch der pH-Wert steigt und sich schon bei tiefen Temperaturen Zeolithe bilden können. An der Grenze zwischen Sediment und Wasser bildet sich zunächst Phillipsit, die häufigste Zeolithspezies im Indischen Ozean und im Pazifik. Ab einigen

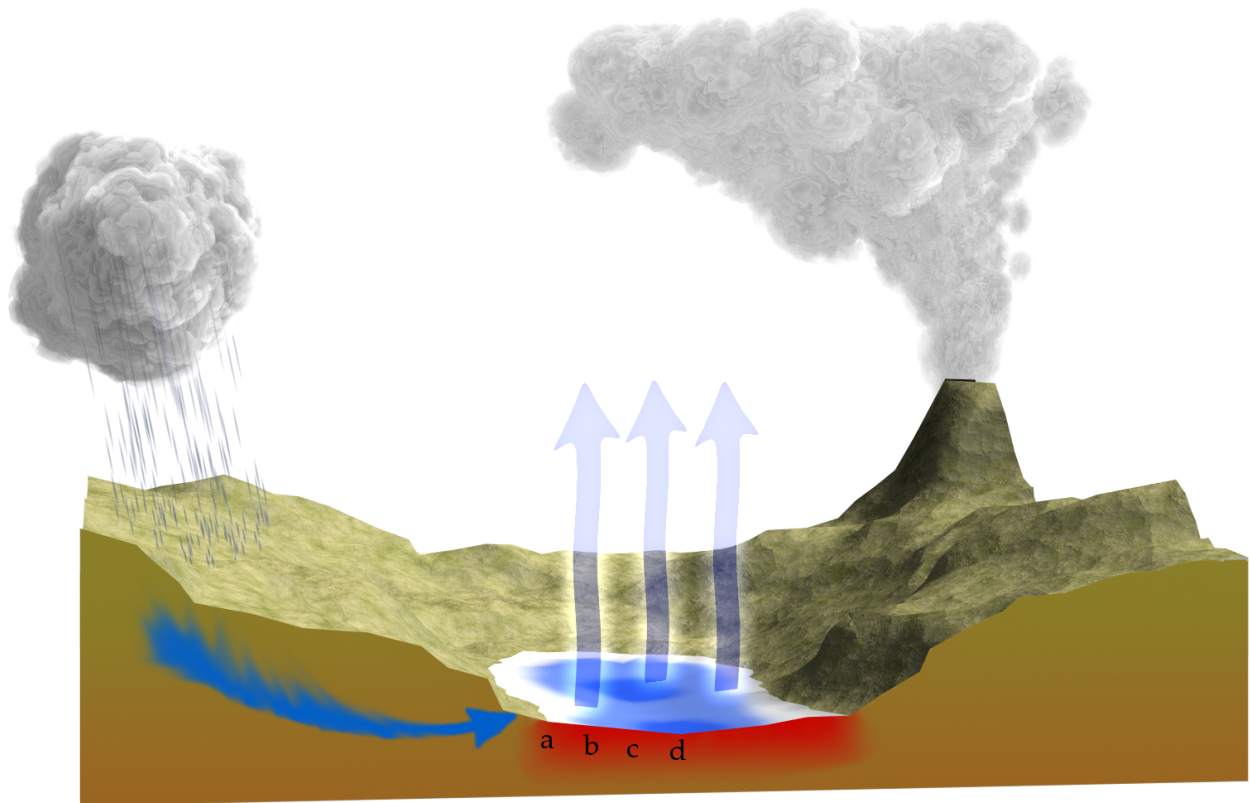


Abbildung 2: Zeolithbildung in austrocknenden Salzseen. Durch die hohe Verdunstungsrate und den fehlenden Abfluss steigt der pH-Wert des Wassers stark an. Die Kationen (Na, Ca, K) werden durch Regenwasser aus dem Nebengestein ausgewaschen, und schließlich bilden sich in den vulkanischen Ablagerungen Zeolithe. Je nach Wasserstand bilden sich unterschiedliche Spezies, so entsteht eine Zonierung (a–d).



Abbildung 3: Zeolithablagerungen in Idaho, USA. Horizontale Schichten von vulkanischen Tuffen wurden zu Zeolithen, hauptsächlich Klinoptilolith, umgewandelt. Die dunkleren Schichten enthalten etwas mehr Tonmineralien.

Metern Tiefe nimmt jedoch die Phillipsit-Konzentration deutlich ab, stattdessen tritt Klinoptilolith in großen Mengen auf. Die Klinoptilolith-Schichten sind bis zu einige hundert Meter mächtig, äußerst rein (bis zu 80 %) und vor allem im Atlantik anzutreffen. Noch tiefer im Sediment bildet sich neben Klinoptilolith und Phillipsit, bedingt durch höheren Druck und Temperatur, eine weitere Spezies, Analcim. Alle in Tiefseesedimenten gebildeten Zeolithe sind jedoch sehr feinkörnig. Es ist anzunehmen, dass die mächtigen Zeolithvorkommen in der Tiefsee bei der Reaktion mit dem Meerwasser durch die Ionenaustauschfähigkeit auch dessen Chemie beeinflussen.

## 2.4 Vulkanische Aschen und Tuffe

Bei explosiven vulkanischen Ereignissen werden große Mengen von glasiger Asche produziert. Die auf dem Land abgelagerten und verfestigten Sedimente (Tuffe) sind der Witterung ausgesetzt und werden im Laufe der Zeit von Regenwasser und Grundwasser durchdrungen. Das eindringende meteorische Wasser erhöht den pH-Wert und löst die zur Zeolithbildung benötigten Bestandteile aus dem Gestein. Abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsgesteins bilden sich unterschiedliche Zeolith-Spezies. Die Bildung erfolgt in relativ kurzer Zeit, einige tausend bis hunderttausend Jahre, und bei tiefen Temperaturen von etwa 4 bis 40 °C. Ein Beispiel von solchen Ablagerungen zeigt Abbildung 3.



## 2.5 Zeolithe in der Schweiz

Auch in den schweizer Alpen gibt es Zeolithvorkommen, allerdings entstanden diese weder aus vulkanischen Gesteinen, noch sind die Vorkommen besonders groß. Der bedeutendste Aufschluss liegt beim Gibelsbach auf 1380 M. ü. M, nordwestlich von Fiesch (VS). Dort findet man Zeolithe in einer stark deformierten Graniteinheit, die zwischen den grobkörnigen Graniten des Aarmassivs im Norden und Sedimentgesteinen im Süden liegt. Durch die starke Deformation enthält der Granit viele Brüche und Klüfte von einigen Millimetern Breite, in denen sich durch Wasserzirkulation Zeolithe bilden konnten. Der Aufschluss liegt jedoch in einer steilen Felswand und ist nur schwer zugänglich. Da in dieser Gegend außerdem schon seit 150 Jahren intensiv nach Mineralien gesucht wird – die Fundstücke wurden an schweizer Mineralbörsen verkauft – findet man heute wohl nur mit viel Glück, Ausdauer und Wagemut größere Kristalle.

## 3 Fallbeispiel Tschernobyl

### 3.1 Der Reaktorunfall – das fatale Experiment

Das Kernkraftwerk Tschernobyl liegt rund 130 km nordwestlich von Kiew (Ukraine), nicht weit von der Grenze zu Weißrussland. Den Reaktor vom Typ RBMK stufen Experten als nicht auf westliches Sicherheitsniveau nachrüstbar ein, zumal keine Schutzhülle (Containment) vorhanden ist und sich außerdem zu große Mengen an Graphit (Graphit ist leicht brennbar) im Kernbereich befinden. Am 26. April 1986 ereignete sich im Block 4 des Kernreaktors Tschernobyl eine katastrophale Kernschmelze und Explosion. Der Hergang des „Unfalls“, vor allem aber auch die Folgen, sind auch heute noch nicht zweifelsfrei geklärt, da viele Informationen von der Regierung zurückgehalten, manches vertuscht wurde.

Alles begann mit einem Experiment, mit dem überprüft werden sollte, was passiert, wenn die Stromversorgung des Reaktors ausfällt. In diesem Fall sollte nämlich eine sofortige Notabschaltung des Reaktors ausgelöst werden. Damit der Probelauf des Reaktors nicht unterbrochen wird, wurde das Notprogramm „Havarieschutz“, das alle wichtigen Sicherheitseinrichtungen zusammenfasst, mit Absicht ausser Funktion gesetzt. Über den weiteren Unfallhergang ist man sich nicht einig, jedenfalls wurden von den Operatoren kurz vor Beginn des Experimentes Bremsstäbe entfernt. Bremsstäbe kontrollieren die atomare Kettenreaktion und sind notwendig um den Reaktor wieder abzustellen. Trotz der Schwierigkeiten wurde das Experiment am 26. April 1986 um 1<sup>23</sup> Uhr gestartet, die Ventile zur Generatorturbine wurden geschlossen. Es folgte eine komplizierte Kettenreaktion: die Pumpen konnten weniger Kühlwasser befördern, es kam zur Überhitzung. Wasser, das normalerweise die Kettenreaktion durch Absorption von Neutronen bremst, verdampfte. Dadurch verstärkte sich wiederum die Kernreaktion, noch mehr Wärme wurde produziert und noch mehr Wasser verdampfte. Durch diese Kettenreaktion stieg die Leistung des Reaktors fatal an und die Schichtleitung befahl das sofortige Abschalten des Reaktors. Dazu mussten wiederum die Steuerstäbe eingefahren werden. Genau an diesem Punkt zeigte der RBMK-Reaktor seinen gravierendsten Konstruktionsfehler: Die Einfahrtgeschwindigkeit der Steuerstäbe war zu langsam. Die Stäbe waren durch die Hitze bereits verformt und verklemmten, sodass sich nur die reaktionsbeschleunigenden Graphitköpfe im Reaktor befanden. In wenigen Sekunden stiegen Leistung und Temperatur des Reaktors um ein Vielfaches an. Es kam zur Kernschmelze und zu einer Knallgasexplosion. Nachdem das Dach des Reaktors abgesprengt war, entzündete sich zudem



Abbildung 4: Nach der Explosion wurde das gesamte Reaktorgebäude mit einem Sarkophag aus Beton umhüllt, damit kein radioaktives Material mehr in die Umwelt gelangt.

der Graphit-Moderator. Ein großer Teil des radioaktiven Inhaltes wurde nach draußen geschleudert.

Am 27. April 1986 dauerten die Löscheversuche immer noch an. Sand, Stahl, Blei und Lehm wurden in den brennenden Reaktor geworfen. Obschon sowohl in Schweden als auch in Norwegen und Finnland am 28. April erhöhte Radioaktivität gemessen wurde, bestritt die sowjetische Atomenergiebehörde einen Reaktorunfall. Erst abends meldete die Nachrichtenagentur TASS einen Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl. Tausende Liquidatoren (Soldaten, Studenten und „Freiwillige“) wurden geschickt die Unfall-Folgen zu beseitigen. Am 29. April drehte der Wind nach Südwest und die radioaktive Wolke näherte sich Deutschland. Bis November 1986 wurde der Reaktorblock dann mit einer meterdicken Betonhülle (Sarkophag) umgeben. Die restlichen drei Blöcke blieben aber noch eine ganze Zeit am Netz: Block 2 wurde im Oktober 1991, Block 1 im November 1996 und Block 3 erst am 15. Dezember 2000 endgültig abgeschaltet.

Nach der Stilllegung von Tschernobyl sind weltweit immer noch 13 Reaktorblöcke desselben Typs in Betrieb.

### 3.2 Die Folgen des Unfalls

In Folge des Unfalls gelangten nicht nur Schwermetalle wie Uran und Plutonium des Reaktorkerns in die Umgebung. Auch weitere Radionuklide, vor allem Iod<sup>131</sup>, Strontium<sup>90</sup>, Cäsium<sup>134</sup> und Cäsium<sup>137</sup>, die als Aerosol in der Atmosphäre bleiben, erreichten als radioaktive Wolke West- und Nordeuropa. Durch Regen wurden die radioaktiven Substanzen, hauptsächlich Cäsium<sup>134</sup> mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren, aus der Luft gewaschen und in den Boden eingebracht.

Dadurch wurden direkt (Freilandgemüse) oder indirekt (Kühe) Lebensmittel radioaktiv kontaminiert. Insgesamt wurde bei dieser Katastrophe eine Menge an Radioaktivität freigesetzt, die 30 bis 40 Hiroshima-Bomben entspricht.

Die Beurteilung der gesundheitlichen Folgen, die von der Verstrahlung herrühren, ist äußerst widersprüchlich. Unmittelbar nach dem Unglück verstarben nach offiziellen Angaben 31 Menschen (Feuerwehrleute und Hilfskräfte), die man über die Gefahr der radioaktiven Strahlung nicht in Kenntnis gesetzt hatte, an Verbrennungen und der Strahlenkrankheit. Der sprunghafte Anstieg an Schilddrüsenkrebserkrankungen seit 1987, vor allem bei Kindern in der Ukraine, Russland und Weißrussland, ist zweifellos auf Tschernobyl zurückzuführen. Als weitere Spätfolgen der Verstrahlung gelten Immunschwäche-Krankheiten (Tschernobyl-Aids), Erkrankung der Atemwege, Tumore, Leukämie, Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie Depressionen. Gestiegen sind auch die Missbildungen bei Neugeborenen. Zwar erkennen Experten an, dass sich die Gesundheit der Menschen in der Ukraine verschlechtert hat, häufig wird dies aber auch auf die schlechtere wirtschaftliche Situation oder die „Angst vor Strahlung“ als gefährliches Moment geschoben. Das ganze Ausmaß der gesundheitlichen Schädigungen wird erst in Jahrzehnten klar sein.

### 3.3 Einsatz von Zeolithen in Tschernobyl

Die größte Gefahr nach dem Unfall war, abgesehen von der bereits ausgetretenen Radioaktivität, das aus der Reaktorrune austretende Wasser. Es musste um jeden Preis verhindert werden, dass radioaktives Material ausgewaschen wird und ins Grundwasser oder in die Flüsse gelangt. Dazu wurde rund um das Kraftwerk eine undurchlässige Wand in den Boden eingelassen. Das angestaute Wasser aus dem Inneren wurde kontrolliert abgepumpt und gereinigt, bevor es in den nahe liegenden Fluss *Prypiat* geleitet wurde. In der Reinigungsanlage wurde das Drainage-Wasser durch 2 Meter hohe Filtersäulen, gefüllt mit 2–3 mm großen Klinoptilolith-Körnern, geleitet. Dabei wurde die anfängliche Radioaktivität von  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Ci/dm<sup>3</sup> um durchschnittlich 70–80 % verringert. Im Detail entspricht dies 95 % Cs<sup>137</sup>, 80 % Sr<sup>90</sup>, 50–60 % Radionukliden von Schwermetallen und 15–20 % Ru<sup>103</sup>. Das Filtermaterial besaß eine Radioaktivität von  $10^{-5}$  Ci/kg und wurde vergraben. Alles an den Lösch- und Aufräumarbeiten beteiligte Material musste ebenfalls regelmäßig dekontaminiert werden. Dazu wurden jedoch nicht Zeolithe, sondern Suspensionen und Pasten von Tonmineralien (Palygorskit und Montmorillonit) verwendet. Die Gerätschaften wurden entweder mit der Suspension abgespritzt, oder mit der Paste eingerieben und nach 0.5–1 Stunde mit Wasser abgespritzt. Kleider wurden für einige Minuten in einer ähnlichen Suspension gewaschen. Der Reinigungseffekt dieser Methoden ist außerordentlich gut. Bei Kleidern war die Radioaktivität danach um Faktor 12–26 geringer, bei Autos und Baumaschinen um 10–50, und bei Gebäuden, Betonplatten, Ziegelsteinen und Bedachungen sogar um bis zu 130. Damit war die Kontamination nach der Reinigung etwa halb so hoch wie die Resultate, die mit damals herkömmlichen Methoden zu erzielen gewesen wären.

Nach diesen Erste-Hilfe-Maßnahmen begannen die Aufräumarbeiten um die Reaktorrune, und in den verseuchten Gebieten musste die Landwirtschaft auf die erschwerten Umstände eingestellt werden. Dabei wurden schätzungsweise 500'000 Tonnen Zeolithmaterial, hauptsächlich Klinoptilolith aus der Ukraine, Russland und Georgien, in die kontaminierten Gebiete transportiert. Bei einem Ladevermögen von 50 t pro Waggon entspricht dies 100 Eisenbahnzügen mit je 100 Güterwaggons, oder einem Zug von 124 km Länge. Eingesetzt wurden die Zeolithe wie folgt:



- Der Boden im Reaktorgebiet wurde abgetragen und gewaschen, die Waschlösung wurde anschließend durch eine Zeolith-Filteranlage gereinigt.
- Um den Reaktor wurden Barrieren aus Zeolithmaterial gebaut, um bei Hochwasser die Verseuchung des Flusses zu verhindern.
- Gemüse wurde in Gewächshäusern angebaut, in denen die Erde mit zeolithreichem Tuff angereichert war (*Zeoponics*), wodurch sich die Konzentration von  $\text{Cs}^{137}$  und  $\text{Sr}^{90}$  in den Pflanzen um 50–70 % verringerte.
- Auch dem Viehfutter wurde Zeolithpulver beigemischt (1–3 g Klinoptilolith pro Kilogramm Körpergewicht). Die Konzentration von Radionukliden verringerte sich dadurch im Fleisch um 50–70 %, in der Milch sogar um 80–85 %.
- Zeolithe in der menschlichen Nahrung verstärkte den Abbau von  $\text{Cs}^{137}$  im menschlichen Körper um Faktor 3–5. Die Mineralien selbst sind vollkommen unverdaulich und werden nach der Aufnahme von Cs und Sr ausgeschieden.
- In speziellen Waschmaschinen wurden Kleider mit zeolithhaltiger Suspension gewaschen.

Doch bereits lang vor dem Unfall in Tschernobyl wurde Klinoptilolith zur Reinigung von radioaktiven und industriellen Abwässern verwendet. Vor allem in den USA war dies eine weit verbreitete Technik, wohl nicht zuletzt weil die USA zu den größten Produzenten solch problematischer Abfälle gehören. Im *Idaho National Engineering Laboratory* wurde Abwasser aus einem mit  $\text{Cs}^{137}$  und  $\text{Sr}^{90}$  verseuchten Treibstofflager gereinigt. Der Reinigungsgrad betrug 99.5 %, und auch im *Savannah River Plant* wurden 99 % des  $\text{Cs}^{137}$  aus Abwasser entfernt.

Obwohl heute Materialien bekannt sind, deren Reinigungswirkung und Stabilität wesentlich besser ist als diejenige von Zeolithen, werden Letztere dank ihres unschlagbaren Preis-Leistungs-Verhältnisses nach wie vor bevorzugt in der Praxis eingesetzt. Die meisten der alternativen Materialien müssen synthetisch hergestellt werden, und sind daher heute noch nicht konkurrenzfähig gegenüber den in beinahe unbegrenzten Mengen verfügbaren und leicht abbaubaren natürlichen Zeolithen.

### 3.4 Natürliche Barrieren

Was um den Reaktor in Tschernobyl unter lebensgefährlichen Bedingungen gebaut werden musste, ist in anderen Gebieten der Erde schon auf natürliche Weise entstanden. *Yucca Mountain*, ein Berg im Bundesstaat Nevada, USA, etwa 161 km nordwestlich von Las Vegas, besteht hauptsächlich aus vulkanischen Tuffen und Laven. Einige Sedimentschichten enthalten bis zu 50 % Klinoptilolith und geringe Mengen Mordenit. Zudem erlaubt es die topographische Lage, einen Stollen 300 m unter der Oberfläche des Berges, aber dennoch 150 m über dem Grundwasserspiegel zu errichten. Aufgrund dieser idealen Voraussetzungen wurde der Berg seit den 70er-Jahren vom *Department of Energy* (DOE) als potentieller Endlager für hoch-radioaktive Abfälle untersucht. Im Juli 2002 schließlich bestätigte der Senat in einer Abstimmung den Bau des ersten geologischen Endlagers für verbrauchte Brennstäbe aus reaktorgetriebenen Schiffen und radioaktiven Abfall in den USA.

## 4 Radioaktivität in der Schweiz

Auch in der Schweiz müssen sich Behörden und Bevölkerung mit dem Thema Radioaktivität auseinandersetzen. Zur Zeit sind vier Kernkraftwerke mit insgesamt fünf Reaktoren in Betrieb, mit deren Bau in den 60er- und 70er-Jahren auch die Diskussion um die Entsorgung der radioaktiven Abfälle begann. Das Gesetz schreibt vor, dass alle Abfälle in der Schweiz endgelagert werden müssen. Da einige Radioisotope eine Halbwertszeit von einigen tausend Jahren haben, muss ein Tiefenlager die Sicherheit der Abfälle über einen Zeitraum in der Größenordnung von 100'000 Jahren garantieren. Dies ist nur in einem geologisch stabilen Umfeld möglich, in dem das Lager auch ohne Sicherung und Überwachung durch Menschen sicher ist. Schließlich weiss man nicht, welches Schicksal die Menschheit in der Zukunft ereilen wird, und ob noch jemand in der Lage sein wird die Sicherheit der Tiefenlager zu gewährleisten. In der Schweiz ist die Suche nach einem geeigneten Standort keine leichte Aufgabe, da die Alpen als geologisch junges Gebirge als möglicher Standort ausscheiden, und die Region des Mittellandes dicht besiedelt ist. Etwa zeitgleich mit dem Bau der Kernkraftwerke wurde die NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) daher beauftragt, in einem ersten Schritt bis 1985 die Langzeitsicherheit einer geologischen Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen nachzuweisen („Projekt Gewähr“).

Für die Tiefenlagerung wird zwischen 1) kurzlebigen schwach- bis mittelaktiven und 2) hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfällen unterschieden. Abfälle aus Kategorie 1 stammen heutzutage zu 30 % aus Medizin und Forschung, der Rest stammt aus dem Unterhalt und Rückbau von Atomkraftwerken. Kategorie 2 stammt fast ausschließlich aus der Aufbereitung, dem Rückbau von AKWs oder besteht aus ausgebrannten Brennstäben. Für die beiden Kategorien werden jeweils unterschiedliche Standorte für Tiefenlager gesucht.

Die NAGRA untersuchte daraufhin verschiedene Standorte auf ihre Eignung als Tiefenlager und kam zum Schluss, dass es in der Schweiz im Kristallingestein geologisch und technisch möglich ist, radioaktive Abfälle zu lagern. Der Machbarkeitsnachweis, der im „Projekt Gewähr“ gefordert wurde, war somit erbracht. Später stellte sich heraus, dass Ton- und Mergelschichten womöglich sogar besser geeignet sind als Kristallingestein. Die NAGRA konzentrierte sich daraufhin auf die Standorte Wellenberg (NW) für kurzlebige schwach- bis mittelaktive Abfälle, und Benken (ZH) für hochaktive Abfälle. Das Projekt Wellenberg scheiterte jedoch am Widerstand aus der Bevölkerung und wurde im September 2002 nach einer Volksabstimmung endgültig beendet. Gegen den Standort Benken formieren sich ebenfalls Gegner der Deponie aus der Schweiz und Deutschland, die bereits zweimal erfolgreich den Bau eines Atomkraftwerks in Wyhl (Kaiserstuhl, D) und Kaiseraugst (CH) verhindert hatten.

### 4.1 Politische Betrachtung

Die schweizer Bevölkerung steht vor dem Problem, dass sie bereits einen großen Anteil des Strombedarfs durch Atomstrom deckt (durchschnittlich ca. 40 %), aber anscheinend nicht bereit ist, die anfallenden Abfälle im eigenen Land zu deponieren. Die Ausfuhr ins Ausland würde bestehende Gesetze missachten und wäre moralisch nicht vertretbar. Dass das Volk Atomkraftwerke mehrheitlich gutheißt, zeigen drei Initiativen, die einen radikalen oder schrittweisen Ausstieg aus der Atomenergie forderten – sie wurden alle abgelehnt. Unabhängig von Ausstieg oder Weiterführung des Atomstromprogramms fordert der Gesetzgeber jedoch die Erstellung eines Tiefenlagers für schwach- bis mittelaktive Abfälle für das Jahr 2020 bis 2040, für hochaktive Abfälle bis

spätestens 2040. Bis dahin müssen die Abfälle in Zwischenlagern bis unter 90 °C abkühlen. Bevor ein Tiefenlager gebaut werden kann, muss der Standort über 10 Jahre einer intensiven Langzeituntersuchung unterzogen werden, in der noch einmal die Tauglichkeit für die Lagerung radioaktiver Abfälle auf Herz und Nieren geprüft wird. Dass die Aktivitäten der NAGRA bei der Bevölkerung auf große Skepsis, und oft sogar auf offene Ablehnung, stoßen, ist insofern verständlich, als dass man sich des Gefahrenpotentials radioaktiver Abfälle bewusst ist. Die außerordentliche Vorsicht, mit der die NAGRA mögliche Standorte evaluiert, wird jedoch von der Bevölkerung oft falsch interpretiert. Die Anforderungen an ein Tiefenlager sind enorm. Der Standort ist so ausgelegt, dass er über einen Zeitraum von 100'000 Jahren ohne menschlichen Eingriff die Abfälle von der Umwelt isoliert. In dieser Zeit ist er nicht nur menschlichen Einflüssen wie Kriegen oder terroristischen Anschlägen ausgesetzt, sondern ebenfalls geologischen Ereignissen wie Erdbeben, Überflutungen, Eiszeiten oder verstärkter Erosion. Keines der bestehenden Kernkraftwerke ist auch nur annähernd so robust konstruiert dass es diesen Gefahren unbeschadet standhalten könnte. So betrachtet steht die Angst vor Tiefenlagern in keinem Verhältnis zu der Gleichgültigkeit, mit der in der Schweiz bereits vier Atomkraftwerke betrieben werden.

Im internationalen Vergleich ist die Schweiz kein Einzelfall. In Betrieb genommene Tiefenlager gibt es zu Zeit nur in Schweden, in Finnland befindet sich eines im Bau, in Frankreich entsteht ein Untersuchungslabor an einem potentiellen Standort. Deutschland, Belgien, Spanien, England, Japan, die USA und einige weitere Länder lagern alles in Zwischenlagern, meist oberflächlich.

Die Entsorgung des Abfalls erfolgt in der Schweiz völlig unabhängig davon, ob die Atomkraftwerke weiterhin in Betrieb bleiben oder nicht. Es geht ausschließlich um die Lagerung bereits vorhandenen Materials. Die NAGRA, als Organisation mit der Lösung des Abfallproblems beauftragt, ist keineswegs für die Produktion verantwortlich. Die Abfälle sind die direkte Konsequenz der Volksentscheide, die den Betrieb der Kernkraftwerke mehrfach gutgeheißen haben. Um dieses Missverständnis aus der Welt zu schaffen, ist die NAGRA sehr um Öffentlichkeitsarbeit bemüht und sucht den Dialog mit der Bevölkerung. Die Forschungsergebnisse sind daher in der Regel öffentlich zugänglich (zum Beispiel in Bibliotheken) und sind Interessierten als weiterführende Literatur sehr zu empfehlen.

## 5 Was bringt die Zukunft

Geologen, Mineralogen und Chemiker arbeiten weltweit daran, die Eigenschaften von den verschiedensten mikroporösen Kristallstrukturen zu erforschen. Am Laboratorium für chemische und mineralogische Kristallographie der Universität Bern werden zum Beispiel Zeolithe und verwandte synthetische Strukturen auf die Aufnahmefähigkeit für verschiedene Elemente und auf die Stabilität unter extremen Bedingungen hin untersucht. Auch wenn es synthetische Materialien gibt deren Eigenschaften denen von Zeolithen überlegen sind, so werden diese den Zeolithen in naher Zukunft – vor allem für großvolumige Anwendungen – wohl nicht den Rang ablaufen.

Ob es in Zukunft wieder zu einem mit Tschernobyl vergleichbaren Vorfall kommt, sei es eine Kernschmelze, ein kriegerischer Akt oder das Versagen der Schutzvorrichtung um die Reaktoruine in Tschernobyl (die zur Zeit in sehr bedenklichem Zustand ist) lässt sich nur vermuten. Die ablehnende Stimmung gegenüber der Kernenergie, wie sie in Europa in den 90er Jahren herrschte, ist jedoch am abklingen. Das finnische Parlament beschloss 2002 den Bau eines fünften Atomkraftwerks – der erste Neubau in Europa seit 10 Jahren. In der Schweiz wird die Diskussion um Kern-

energie spätestens dann wieder aufflammen, wenn die bestehenden Kernkraftwerke das Ende ihres Lebenszyklus' erreicht haben und größere Investitionen anstehen. Gegner und Befürworter der Kernenergie sind sich jedoch keineswegs einig, wann dieser Zeitpunkt erreicht wird. Während die Gegner die Nutzung auf 30 Jahre begrenzen wollen (Beznau 1, 2 und Mühleberg haben dieses Alter bereits überschritten), provezeihen Befürworter den schweizer Kraftwerken eine Lebensdauer von 50 (Beznau 1, 2, Mühleberg) bzw. 60 Jahre (Gösgen, Leibstadt). Es bleibt zu hoffen, dass die Sensibilisierung der Bevölkerung nicht einer Katastrophe vom Ausmaß Tschernobyls bedarf um nicht wieder in Vergessenheit zu geraten, und dass ernst gemeinte Anstrengungen unternommen werden, um alternative Energiegewinnung als vollwertigen Ersatz zur heutigen Atomenergie zu etablieren. Die Abstimmungen von 1990 und 2003 zum Ausstieg aus der Atomenergie sprechen jedoch eine andere Sprache. Im September 1990 (vier Jahre nach Tschernobyl) hatten 52.9 % der schweizer Bevölkerung einen Ausstieg abgelehnt. 17 Jahre nach Tschernobyl, im Mai 2003, lehnten 58.4 % die Initiative „MoratoriumPlus“ ab, die ein Verbot für den Bau neuer und die Leistungssteigerung bestehender AKWs verlängern wollte. Die Volksinitiative „Strom ohne Atom“, für eine schrittweise Stilllegung aller schweizer AKWs, wurde sogar mit 66.3 % abgelehnt.