

Informationsreise «Uran als Brennstoff – von der Stromproduktion zur Tiefenlagerung»
Oktober 2015

Medienrohstoff

Inhalt

Ressource Uran	2
Kernbrennstoffkreislauf	3
Brennstäbe/Brennelemente	3
Abklingphase in den Kernkraftwerken	4
Wiederaufarbeitung (Recycling)	4
WAU-Brennstoff	5
Entsorgungskonzept	5
Herkunft der radioaktiven Abfälle	5
Kategorien und Volumen der radioaktiven Abfälle	5
Zwischenlagerung	7
Verarbeitung von radioaktiven Abfällen	8
Geologische Tiefenlagerung	9
Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen	10
Wirtgesteine – Opalinuston	10
Langzeitverhalten der radioaktiven Abfälle	11
Felslabor Grimsel	12
Felslabor Mont Terri	12
Politische und rechtliche Vorgaben und Verfahren	13
Bewilligungsverfahren für Kernanlagen	13
Entsorgungsnachweis	13
Sachplanverfahren	14
Standortwahl in drei Etappen	15
Stand des Sachplanverfahrens	17
3D-Seismik für Etappe 3	18
Finanzierung der nuklearen Entsorgung	19

Ressource Uran

Im Atomkern des Urans steckt sehr viel Energie. Kernkraftwerke benötigen daher nur sehr geringe Mengen Kernbrennstoff, um grosse Mengen Strom zu erzeugen. Ein 1275-Megawatt-Kernkraftwerk wie jenes in Leibstadt beispielsweise benötigt pro Jahr nur etwa 200 Tonnen Natururan, um rund eine Million Menschen mit Strom zu versorgen. Ein Kohlekraftwerk gleicher Grösse muss dafür über zwei Millionen Tonnen Kohle verbrennen, mit allen damit verbundenen Umweltbelastungen in Luft und Boden. Ein Ölkraftwerk würde rund 1'400'000 Tonnen Schweröl – etwa 10 Millionen Barrel – benötigen, und ein modernes Gaskraftwerk rund 980'000 Tonnen Erdgas. Diese gewaltigen Unterschiede kommen auch beim Transport und der Lagerung zur Geltung.

Aus demselben Grund sind die beim Betrieb von Kernkraftwerken entstehenden Volumen an radioaktivem Abfall sehr gering. Daher ist es technisch möglich und wirtschaftlich machbar, die radioaktiven Abfälle zurückzuhalten, einzuschliessen und für sehr lange Zeiträume sicher zu entsorgen (siehe Stichwort «Geologische Tiefenlagerung»).

Die sehr hohe Energiedichte von Uran ist der Hauptgrund, warum die Kernenergie – zusammen mit Wasser- und Windkraft – bei der Betrachtung der gesamten Umweltbelastung im Vergleich zu den übrigen heutigen Stromerzeugungstechniken sehr günstig abschneidet.

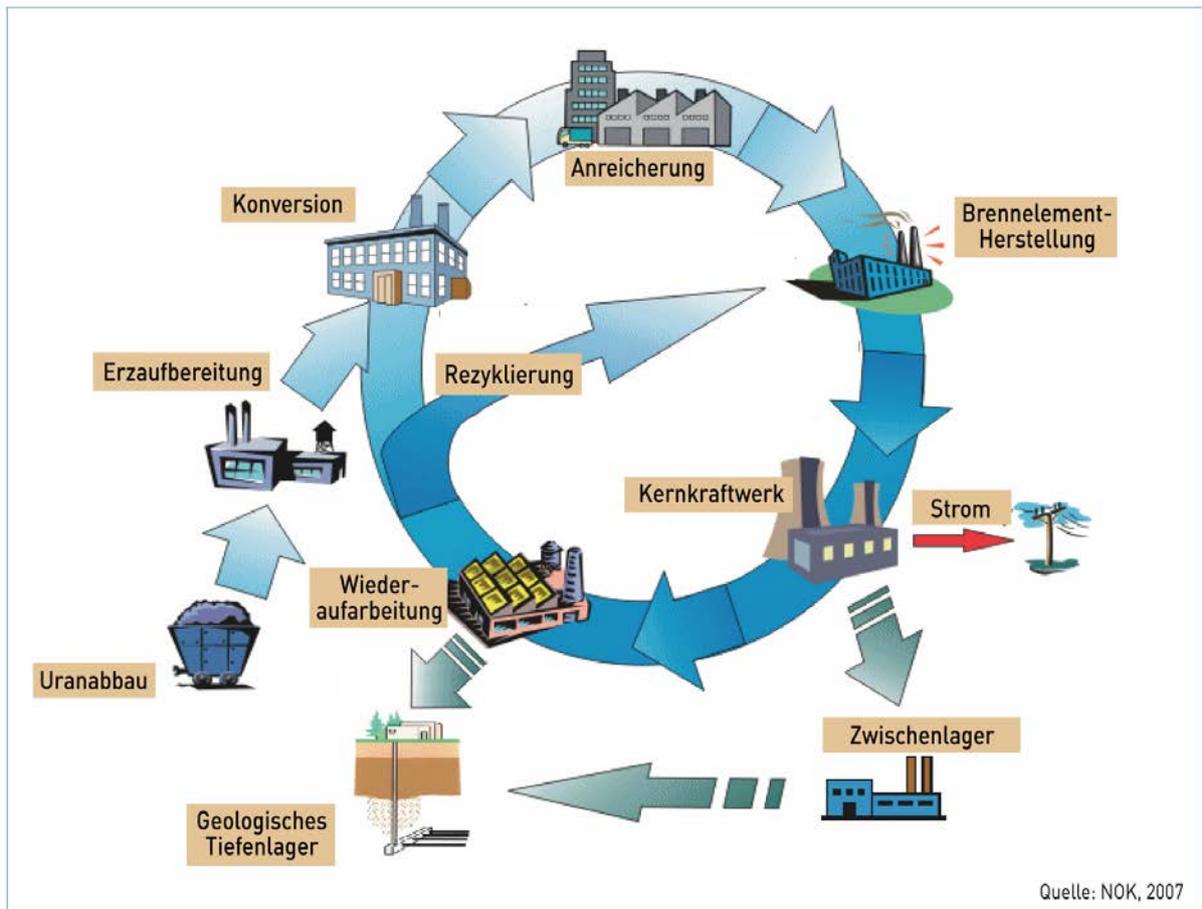
Dieser Pluspunkt ist im Hinblick auf die Herausforderungen wichtig, vor denen die Menschheit angesichts des steigenden Energiebedarfs vor allem in den bevölkerungsreichen Schwellenländern wie China, Brasilien oder Indien steht. Es geht darum, die Umwelt- und Klimabelastungen durch die Stromproduktion möglichst tief zu halten und gleichzeitig mit den knapper und teurer werdenden Rohstoffen wie Eisen, Kupfer oder Aluminium so haushälterisch wie möglich umzugehen.



Der Kernbrennstoff Uran in der Form, wie er in den Kernkraftwerken zum Einsatz kommt. Aus zwei solchen Uranoxid-Tabletten (UO_2) lässt sich soviel Strom erzeugen, wie ein 4-Personen-Haushalt in einem Jahr verbraucht. (Bild: KKG)

Kernbrennstoffkreislauf

Die verschiedenen Verfahrensschritte der Gewinnung von Uran, seiner Verarbeitung zu Kernbrennstoff für den Einsatz im Reaktor, des Recyclings von ausgedientem Kernbrennstoff durch Wiederaufarbeitung sowie der Entsorgung der radioaktiven Abfälle werden unter dem Begriff «Kernbrennstoffkreislauf» zusammengefasst.



Brennstäbe/Brennelemente

Der in den Schweizer Kernkraftwerken verwendete Kernbrennstoff – Uranoxid – hat die Form von kleinen Tabletten, den Pellets. Sie sind in dünnen, gasdicht und druckfest verschweissten Hüllrohren von einigen Metern Länge eingeschlossen. Die Rohre sind aus besonderen Metalllegierungen gefertigt. Brennstoff und Hülle bilden zusammen den einzelnen Brennstab. Eine je nach Reaktortyp unterschiedliche Zahl von Brennstäben wird zu dichten Bündeln, den Brennelementen, gepackt. Die Brennelemente – ihre genaue Anzahl hängt wiederum vom Reaktortyp ab – formen zusammen das «Herz» eines Reaktors, den Reaktorkern. Die Brennelemente haben eine Betriebsdauer von einigen Jahren. Beim jährlich stattfindenden Brennstoffwechsel wird jeweils rund ein Viertel der Brennelemente durch neue ersetzt.



Ein Brennelement wird für den Einsatz im Reaktor vorbereitet: Die Kernenergietechnik ist sauber, kompakt und benötigt keine riesigen Materialtransporte wie Kohle, Erdöl oder Erdgas. (Bild: KKG)

Abklingphase in den Kernkraftwerken

Die während des Reaktorbetriebs entstehenden Spaltprodukte sind hochradioaktiv, zerfallen und erzeugen dabei noch viel Wärme. Deshalb lässt man die ausgedienten Brennelemente nach dem Entladen aus dem Reaktor für mindestens ein Jahr abklingen, bevor sie vom Kernkraftwerk zur Wiederaufarbeitungsanlage bzw. seit dem Moratorium (siehe Stichwort «Wiederaufarbeitung/Moratorium») direkt ins Zwischenlager transportiert werden. Die Abklingbecken befinden sich neben den Reaktoren in den Kernkraftwerken und sind mit Wasser gefüllt, das die Wärme aus den Brennelementen abführt und die Strahlung abschirmt.

Wiederaufarbeitung (Recycling)

Der ausgediente Kernbrennstoff aus den Schweizer Kernkraftwerken besteht nach dem Entladen aus dem Reaktor noch immer zu 95% aus Uran und zu 1% aus Plutonium, die weiterhin für die Energieproduktion nutzbar sind. Die restlichen 4% sind Abfall in Form von hochradioaktiven Stoffen. In Wiederaufarbeitungsanlagen wie beispielsweise in La Hague an der französischen Kanalküste werden das Uran und das Plutonium in einer Reihe von chemischen Prozessen vom hochradioaktiven Abfall getrennt. So stehen sie erneut zur Stromerzeugung in Kernkraftwerken zur Verfügung. Die zurückbleibenden Abfälle werden zu glasartigen Körpern für die geologische Tiefenlagerung verfestigt. Dieses Recycling schont die Uranressourcen und reduziert das Volumen der radioaktiven Abfälle.

Moratorium in der Schweiz

Seit Mitte 2006 dürfen die ausgedienten Brennelemente während zehn Jahren nicht mehr zur Wiederaufarbeitung ins Ausland überführt werden. Das hat das Eidgenössische Parlament im Jahr 2003 entschieden. Das Moratorium ist kein Problem für die Kernkraftwerksbetreiber, da die Brennelemente im Zwischenlager in Würenlingen gelagert werden können (siehe Stichwort «Zwischenlagerung»). Im Rahmen der «Energiestrategie 2050» soll dieses Moratorium in ein permanentes Verbot umgewandelt werden.

WAU-Brennstoff

WAU ist die Abkürzung für wiederaufgearbeitetes Uran. Es wird bei der Wiederaufarbeitung vom ausgedienten Kernbrennstoff abgetrennt und steht durch Recycling erneut für die Stromgewinnung in Kernkraftwerken zur Verfügung. WAU schont wertvolle Energieressourcen, enthält jedoch höchstens 1% spaltbares Uran. Damit es in den Kernkraftwerken eingesetzt werden kann, muss das spaltbare Uran zuerst angereichert werden. Dafür gibt es zwei Wege: Entweder setzt man die gleichen Verfahren ein, mit denen das in der Natur abgebaute Uran angereichert wird. Oder man mischt das WAU mit hoch angereichertem Uran aus abgerüsteten Kernwaffen, bis der gewünschte Anreicherungsgrad erreicht ist. Seit dem Ende des Kalten Krieges wird auch der zweite Weg beschritten – ein sinnvoller Beitrag zum Abbau des Kernwaffenarsenals. In der Schweiz werden Brennelemente mit WAU im Kernkraftwerk Gösgen eingesetzt.

Entsorgungskonzept

Herkunft der radioaktiven Abfälle

Radioaktive Abfälle entstehen vielerorts: vorab in den Kernkraftwerken, aber auch – ein knappes Drittel des Gesamtvolumens – bei der Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin (z.B. in der Strahlentherapie), in der Industrie (z.B. bei Leuchtziffern und Bestrahlung von Gewürzen) sowie in der Forschung.

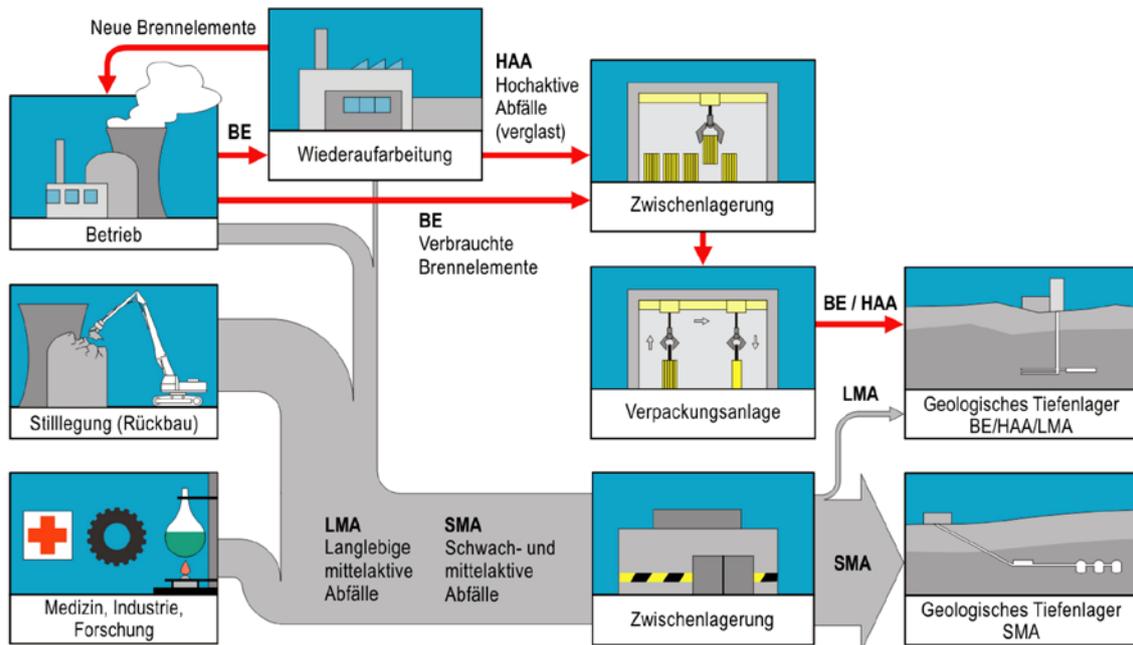
Wenig beachtet von der breiten Öffentlichkeit wurden wichtige Aufgaben der Entsorgung bereits gelöst: Wir wissen genau, wo sich welche radioaktiven Abfälle befinden (Inventarisierung). Ihre Verarbeitung in eine endlagergerechte Form und ihre Zwischenlagerung sind heute betriebliche Routine. Ebenso ist die Finanzierung der Entsorgung sichergestellt (siehe Stichwort «Finanzierung der nuklearen Entsorgung»).

Kategorien und Volumen der radioaktiven Abfälle

Die geltende Kernenergieverordnung unterscheidet folgende Abfallkategorien:

- **Hochradioaktive Abfälle (BE/HAA):** Sie setzen sich zusammen aus ausgedienten Brennelementen (BE) und dem hochradioaktiven Abfallglas aus der Wiederaufarbeitung (HAA). Ausgediente Brennelemente können entweder wiederaufgearbeitet oder direkt der geologischen Tiefenlagerung zugeführt werden. Bei der Wiederaufarbeitung werden die hochradioaktiven Spaltprodukte vom erneut verwendbaren Uran und Plutonium getrennt und zu Glaskörpern verschmolzen (siehe Stichwort «Wiederaufarbeitung»).
- **Schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA):** Sie stammen zu je einem Drittel aus dem Betrieb, aus dem Abbruch der Kernkraftwerke sowie aus Medizin, Industrie und Forschung.
- **Erhöht alphanotoxische Abfälle (ATA/LMA):** Diese Kategorie entspricht ungefähr der früher als «Langlebige mittelradioaktive Abfälle» (LMA) bezeichneten Kategorie. Diese Abfälle stammen vor allem aus der Wiederaufarbeitung der ausgedienten Brennelemente im Ausland.

Entsorgungskonzept



Quelle: Nagra

Zur Entsorgung dieser Abfälle werden zwei geologische Tiefenlager geplant: eines für die hochradioaktiven Materialien (BE/HAA) und ein zweites für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle (SMA). Die ATA/LMA werden dem Lager BE/HAA zugewiesen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Abfallvolumen zusammengestellt, die sich gemäss den Berechnungen der Nagra aus 50 Jahren Betrieb der Schweizer Kernkraftwerke (einschliesslich der Stilllegungsabfälle der Werke) sowie aus Medizin, Industrie und Forschung ergeben:

	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle SMA, inklusive ATA/LMA ¹		Hochradioaktive Abfälle BE / HAA	
	«konditioniert» ²	verpackt ³	«nackt»	verpackt ³
Kernkraftwerke	ca. 39'000 m ³	ca. 60'000 m ³	1250 m ³	7300 m ³
Medizin, Industrie und Forschung	ca. 27'000 m ³	ca. 33'000 m ³	–	–
Total	ca. 66'000 m³	ca. 93'000 m³	1250 m³	7300 m³

¹ Das Volumen der ATA/LMA beträgt 2300 m³ (verpackt).

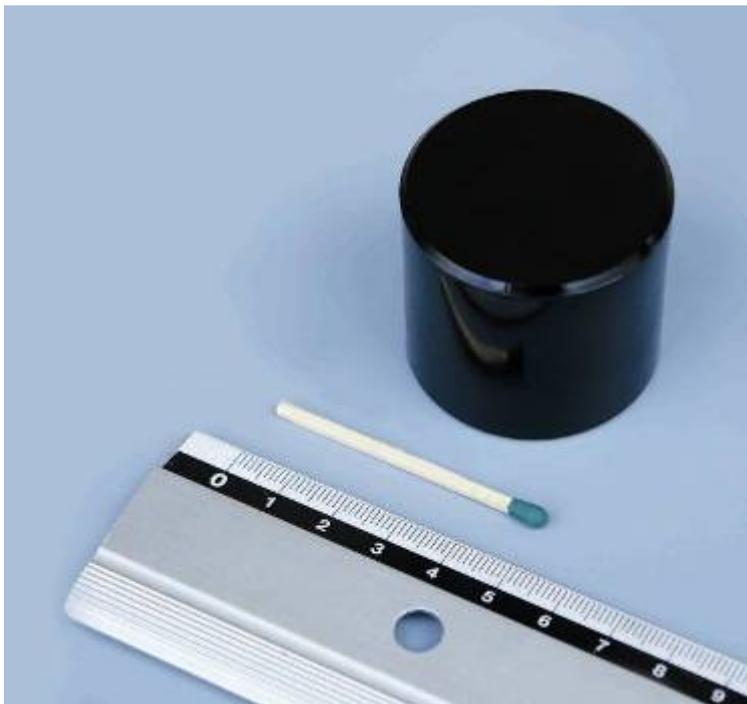
² «Konditioniert» bedeutet: in eine stabile Form verarbeitet (einzementiert, bituminiert, «Plasmaglas»).

³ «Verpackt» bedeutet: in Endlagerbehälter aus Gussstahl eingeschweisst (HAA) oder in speziellem Zement eingegossen (SMA).

- Die anfallenden Volumen an ausgedienten Brennelementen respektive hochradioaktiven Abfällen sind sehr klein. Mit der Verpackung sind 7300 Kubikmeter zu entsorgen, was dem Raumbedarf von etwa sechs Einfamilienhäusern entspricht. Die hochradioaktiven Abfälle enthalten 98,3% der Radioaktivität aller Abfälle.
- Volumenmässig stammen rund ein Drittel (33'000 m³) der verpackten SMA aus Medizin, Industrie und Forschung und etwa ebensoviel (ca. 28'000 m³) aus dem Abbruch der Kernkraftwerke am Ende ihrer Betriebsdauer. Die SMA enthalten 1,7% der Radioaktivität aller Abfälle. Sie benötigen keine Abkühlungszeit und können jederzeit in ein Tiefenlager eingelagert werden. In einigen Ländern (z.B. Frankreich, Schweden oder Finnland) stehen solche Lager schon seit vielen Jahren in Betrieb. Weltweit gibt es über 20 Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle.
- Das Gesamtvolumen aller verpackten Abfälle, einschliesslich der hochradioaktiven Abfälle, entspricht etwa dem Volumen der Zürcher Bahnhofshalle.

Gemäss dem Kernenergiegesetz müssen in der Schweiz alle radioaktiven Stoffe unterirdisch langzeitgelagert und damit aus dem Lebensraum von Mensch, Tier und Pflanzen entfernt werden.

Es ist technisch möglich und wegen der geringen Mengen der anfallenden radioaktiven Abfälle auch wirtschaftlich machbar, diese Abfälle sicher einzuschliessen und langfristig von unserem Lebensumfeld fernzuhalten.



*Nach 50 Jahren Kernenergie hinterlässt jeder Bewohner der Schweiz diese Menge an hochradioaktivem Kernbrennstoff. Sie hat bequem in zwei Zündholzschachteln Platz.
(Bild: Nuklearforum Schweiz)*

Zwischenlagerung

Zwischenlager sind nötig, weil die ausgedienten Brennelemente und die hochradioaktiven Abfälle (BE/HAA) wegen ihrer anfänglichen Wärmeabgabe vor der endgültigen Lagerung in geologischen Tiefenlagern einige Jahrzehnte zwischengelagert werden müssen. Die Zwischenlagerung erfolgt zunächst bei den Kernkraftwerken und anschliessend zentral in den Anlagen der 1990 von den schweizerischen Kernkraftwerksbetreibern gegründeten ZWILAG Zwischenlager Würenlingen AG (Zwilag) in unmittelbarer Nachbarschaft des Paul Scherrer Instituts (PSI).

Im Zwiilag werden die ausgedienten Brennelemente und die verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in dickwandigen, dicht verschlossenen und gegen äussere Einwirkungen geschützten Transport- und Lagerbehältern gelagert. Auch die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle aus dem Kernkraftwerksbetrieb werden ins Zwiilag verbracht. Die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung werden in einem Zwischenlager des Bundes neben dem Zwiilag aufbewahrt. Die Lagerkapazitäten sind grosszügig bemessen und reichen für Jahrzehnte aus, so dass für das Bereitstellen von geologischen Tiefenlagern genügend Zeit zur Verfügung steht.



Behälter mit ausgedienten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen im Zwischenlager in Würenlingen. (Bild: Zwiilag)

Verarbeitung von radioaktiven Abfällen

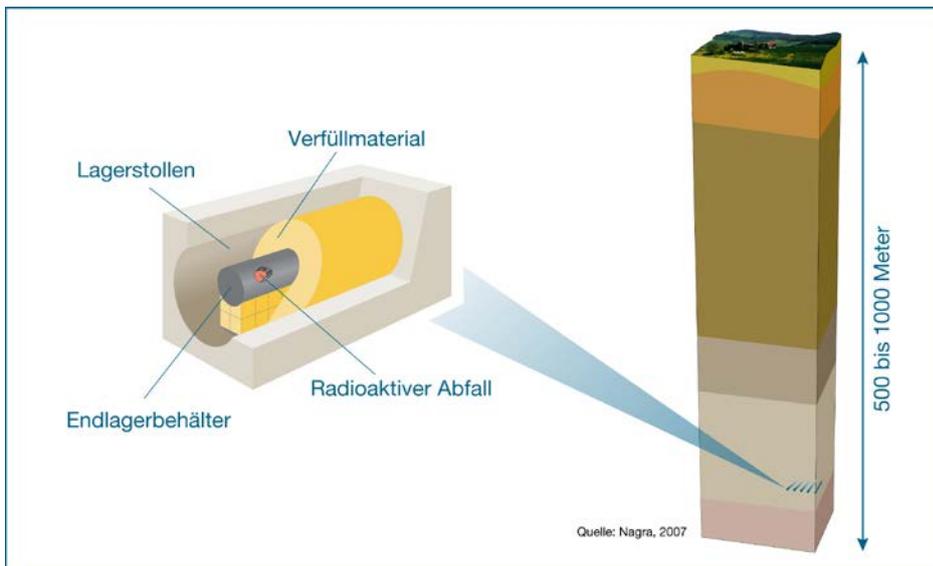
Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie die Betriebsabfälle aus den Kernkraftwerken werden im Zwiilag in eine feste, für die Tiefenlagerung geeignete Form gebracht und verpackt (in Fässern einzementiert, bituminiert oder als Glasschmelze vergossen). Dazu betreibt das Zwiilag unter anderem den weltweit ersten Plasmaofen, mit dem leicht radioaktive Abfälle bei sehr hohen Temperaturen thermisch zersetzt, aufgeschmolzen und mit Glas vermischt werden. Die dabei entstehenden glasartigen Abfallkörper sind chemisch äusserst widerstandsfähig und schwer auslaugbar – optimale Eigenschaften für die spätere Lagerung in geologischen Tiefenlagern. Die Radioaktivität wird durch das Verbrennen nicht verringert, doch reduziert sich das Volumen der Abfälle.

Für die Lagerung im geologischen Tiefenlager werden die Abfälle zusätzlich in Betoncontainer verpackt, was zur Vergrösserung der Gesamtvolumen führt.

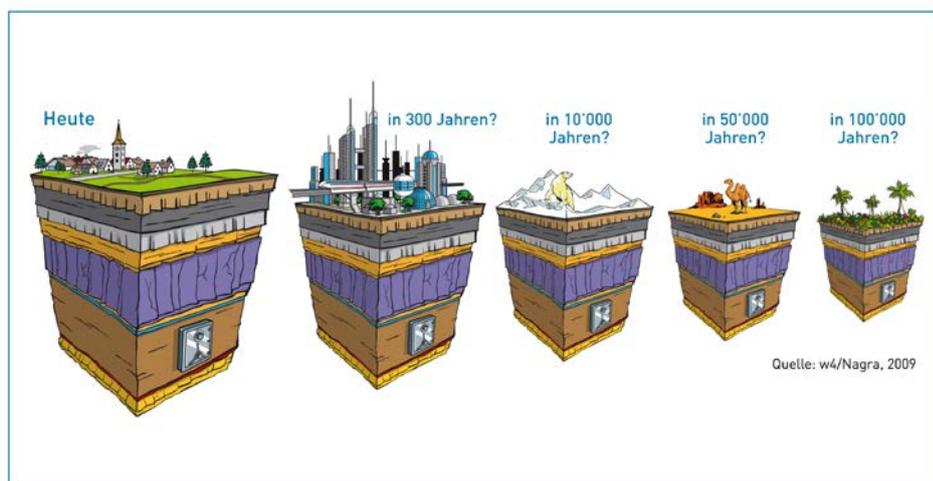
Geologische Tiefenlagerung

Die radioaktiven Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke sollen – zusammen mit den radioaktiven Abfällen aus Industrie, Forschung und Medizin – tief unter der Erdoberfläche gelagert werden. Solche geologischen Tiefenlager sind weltweit von der Wissenschaft als die beste Entsorgungsstrategie anerkannt. In geologisch seit Jahrmillionen stabilen und praktisch wasser- und undurchlässigen Gesteinen können alle Kategorien von radioaktiven Abfällen bis zum Abklingen ihrer Radioaktivität auf natürliche Werte sicher eingeschlossen werden. Für schwach- und mittlerradioaktive Abfälle (SMA) stehen weltweit bereits Dutzende von Tiefenlagern in Betrieb.

Ausgediente Brennelemente und hochradioaktive Abfälle (BE/HAA) müssen vor ihrer definitiven Lagerung während längerer Zeit zwischengelagert werden (siehe Stichwort «Zwischenlagerung»). Tiefenlager für diese Abfallkategorie werden daher erst in einigen Jahrzehnten benötigt. In jahrzehntelanger Forschungsarbeit hat die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) nachgewiesen, dass in der Schweiz sichere geologische Tiefenlager für alle Abfallarten gebaut werden können.



Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle: Mehrfache technische und natürliche Barrieren sorgen für Langzeitsicherheit.



Langzeitlagerung unabhängig vom Geschehen an der Erdoberfläche: Die Gesteine in der Tiefe schliessen radioaktive Stoffe für Millionen von Jahren ein.

Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen

Das Kernenergiegesetz des Bundes verlangt, dass die geologischen Tiefenlager so gebaut werden, dass die radioaktiven Abfälle kontrollierbar sind und nötigenfalls vor dem Verschluss der Anlagen ohne grossen Aufwand zurückgeholt werden können. Nach der Einlagerung der Abfälle werden die Tiefenlager daher während längerer Zeit unter Tage überwacht und der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt kontrolliert. Anschliessend ordnet der Bundesrat die endgültigen Verschlussarbeiten an. Nach dem ordnungsgemässen Verschluss kann der Bundesrat eine weitere, befristete Überwachung von der Oberfläche aus anordnen. Die Abfälle bleiben auch nach dem Verschluss rückholbar – allerdings mit grösserem Aufwand.

Wirtgesteine – Opalinuston

Die systematische Evaluation geeigneter Gesteine durch die Nagra führte 1994 zur Wahl des sogenannten Opalinustons als prioritär geeignete geologische Formation für ein Tiefenlager für die hochradioaktiven Abfälle. Beim Opalinuston handelt es sich um ein Tongestein, das in der Jurazeit vor rund 175 Millionen Jahren gleichförmig als feiner Schlamm im flachen Bereich eines Meeres abgelagert wurde, das damals grosse Teile der heutigen Nordschweiz und der angrenzenden Länder bedeckte. Im Lauf der Erdgeschichte verfestigte sich der Schlamm zu einer Tonschicht, die heute im Untergrund als festes Gestein vorliegt.

Der Opalinuston zeigt in grossen Gebieten der Nordschweiz einfache geologische Strukturen und liegt in einer tektonisch sehr ruhigen Zone mit einer nur geringen Hebungs- und Erosionsrate. Auch die Auffaltung der Alpen und des Jurabogens haben dieses Gestein kaum deformiert.

Der Opalinuston hat für ein Tiefenlager günstige geochemische und felsmechanische Eigenschaften, ist für Wasser kaum durchlässig und liegt in der Nordschweiz in einer günstigen Tiefe von 400 bis 900 Metern. Verstärkt wird die natürliche Einschlusswirkung von mehrheitlich gering durchlässigen Gesteinsformationen oberhalb und unterhalb des Opalinustons.

Alle diese Faktoren bieten einen optimalen Schutz gegen denkbare Störeinflüsse über eine sehr lange Zeit. So enthält das Wasser in den feinen Poren des Opalinustons noch immer Anteile von Meerwasser, das viele Millionen Jahre alt ist. Die grosse Stabilität der Geologie der Nordschweiz erlaubt es, zukünftige Veränderungen am Opalinuston für weit über eine Million Jahre hinaus plausibel abzuschätzen.



Das über lange geologische Zeiträume hinweg uneingeschränkte Abdichtungsvermögen von Tongesteinen dokumentiert die Natur eindrücklich – zum Beispiel im Einschluss von jahrmillionenalten Erdöl- und Erdgasvorkommen.

*Ein schönes Beispiel für die konservierenden Eigenschaften des Opalinustons zeigt der Fund eines Ammoniten in einer Bohrung im Zürcher Weinland (nebenstehendes Bild): Das versteinerte Tier ist auch nach 175 Millionen Jahren nicht deformiert, und auf der Schale ist sogar noch Perlmutter erhalten geblieben. Ammoniten waren urzeitliche Kopffüssler (wie die Tintenfische), deren Vertreter *Leioceras opalinum* dem Opalinuston den Namen gegeben hat. (Bild: Nagra)*

Felslabor Grimsel

Seit 1984 betreibt die Nagra auf 1730 Metern Höhe das Forschungslabor Grimsel im granitischen Gestein des Aarmassivs. Das System von Stollen und Kavernen hat eine Länge von rund einem Kilometer. Heute sind rund zwei Dutzend Organisationen aus zwölf Ländern und der EU an den wissenschaftlich-technischen Untersuchungen auf der Grimsel beteiligt (Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Grossbritannien, Japan, Schweden, Spanien, Südkorea, Tschechien, die USA und die Schweiz). Die EU fördert einzelne Projekte finanziell. Das Felslabor leistet einen wichtigen Beitrag zum langfristigen Erhalt und zur Weitergabe des erworbenen Know-hows über die geologische Tiefenlagerung an zukünftige Generationen.

Das Felslabor Grimsel ist ein reines Forschungslabor. Die Lagerung radioaktiver Abfälle ist ausgeschlossen.

Felslabor Mont Terri

Seit 1995 beteiligt sich die Nagra als Partnerin am Felslabor Mont Terri im Kanton Jura in einem Seitenstollen des Sicherheitstunnels des Mont Terri-Tunnels der Autobahn A16 Delémont-Porrentruy. Das Felslabor liegt im Opalinuston und dient der Erkundung der für ein Tiefenlager relevanten Eigenschaften dieses Gesteins. Die Gesamtlänge der Stollen und Nischen beträgt rund 600 Meter. Das Felslabor bietet eine technisch-wissenschaftliche Plattform für die internationale Forschungszusammenarbeit über die Eignung von Tongesteinen für die geologische Tiefenlagerung.

Seit 2006 betreibt das Bundesamt für Landestopografie (Swisstopo) das Labor Mont Terri (bis Ende 2005 lag die Leitung beim ehemaligen Bundesamt für Wasser und Geologie). Neben der Nagra beteiligen sich Institutionen aus Belgien, Deutschland, Frankreich, Japan, Kanada, Spanien und den USA am Mont Terri-Projekt. In diesen Ländern können ähnliche Tonformationen wie in der Schweiz für die Langzeitlagerung in Betracht gezogen werden.

Das Felslabor Mont Terri ist ein reines Forschungslabor. Die Lagerung radioaktiver Abfälle ist ausgeschlossen.



*Felslabor Mont Terri: internationale Forschung in den Tonschichten des Juras.
(Bild: Nuklearforum Schweiz)*

Politische und rechtliche Vorgaben und Verfahren

Bewilligungsverfahren für Kernanlagen

Bevor in der Schweiz ein neues Kernkraftwerk, Zwischen- oder Langzeitlager gebaut und betrieben werden kann, sind gemäss dem Kernenergiegesetz, das am 1. Februar 2005 in Kraft getreten ist, auf Bundesebene drei Bewilligungsverfahren zu durchlaufen. Nötig sind nacheinander eine Rahmenbewilligung, eine Baubewilligung und eine Betriebsbewilligung.

- Mit der **Rahmenbewilligung** werden die grundsätzlichen, politischen Fragen entschieden. Insbesondere wird festgestellt, ob der politische Wille für den Bau der Anlage vorhanden ist. Dazu reicht der Antragsteller das Gesuch beim Bundesamt für Energie (BFE) ein. Dieses bestellt die nötigen Fachgutachten und fordert die Kantone und die Fachstellen des Bundes auf, innert dreier Monate zum Gesuch und zu den Gutachten Stellung zu nehmen.

Bei der Vorbereitung des Rahmenbewilligungsentscheids haben der Standortkanton sowie die in unmittelbarer Nähe des Standorts liegenden Nachbarkantone und Nachbarländer ein ausdrückliches Anhörungsrecht. Während des öffentlichen Auflageverfahrens ist jedermann berechtigt, Einwendungen zu erheben. Anschliessend werden Stellungnahmen zu den Einwendungen eingeholt und das Gesuch wird dem Bundesrat zum Entscheid vorgelegt. Über den Bundesratsentscheid befindet anschliessend noch das Parlament, das auch einen abschlägigen Bundesratsentscheid umstossen kann. Eine vom Parlament genehmigte Rahmenbewilligung untersteht dem fakultativen Referendum. Kommt es zustande, fällt der Entscheid in einer eidgenössischen Volksabstimmung.

- Im **Baubewilligungsverfahren** werden sämtliche notwendigen Bewilligungen auf Bundesebene gebündelt. Einsprache können hier nur berechtigte Parteien erheben. Die Baubewilligung erteilt das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Uvek). Gegen dessen Entscheid besteht eine zweistufige Rekursmöglichkeit: an die Rekurskommission des Uvek und an das Bundesgericht.
- Das Verfahren zum Erlangen der **Betriebsbewilligung** ist ähnlich wie jenes bei der Baubewilligung.

Entsorgungsnachweis

Das am 1. Februar 2005 in Kraft getretene Kernenergiegesetz des Bundes verlangt für den Bau und den Betrieb von Kernkraftwerken den Nachweis für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle. Dieser Entsorgungsnachweis zeigt die grundsätzliche Machbarkeit der Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz auf. Er ist keine Standortwahl.

1988 entschied der Bundesrat, dass die Nagra den Entsorgungsnachweis für schwach- und mittelradioaktive Abfälle am Beispiel des Oberbauenstocks im Kanton Uri erbracht hat.

Gleichzeitig verlangte die Landesregierung, dass die Forschungsarbeiten in Hinblick auf die Entsorgung der hoch- und langlebigen radioaktiven Abfälle auf Sedimente ausgedehnt werden müssen, nachdem für die Nagra bis zu diesem Zeitpunkt die kristallinen Gesteine in der Nordschweiz im Vordergrund gestanden hatten. Aus dieser Auflage entstand das Projekt Opalinuston.

Ende 2002 reichte die Nagra beim Bund die Unterlagen für den Entsorgungsnachweis für hoch- und langlebige radioaktive Materialien ein. Die externen Überprüfungen des Projekts Opalinuston ergaben durchwegs positive Beurteilungen. In ihren Stellungnahmen kamen die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK; heute: Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Ensi), die Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA; heute: Eidg. Kommission für nukleare Sicherheit, KNS) und die

Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) im September 2005 zum Gesamturteil, dass der gesetzlich geforderte Entsorgungsnachweis für diese Abfälle erbracht ist.

Das Projekt Opalinuston wurde weiter im Auftrag der Behörden durch ein internationales Expertenteam der Kernenergieagentur (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) begutachtet und positiv beurteilt. Anschliessend wurden alle entscheiderelevanten Unterlagen öffentlich aufgelegt und die eingegangenen Stellungnahmen ausgewertet.

Am 28. Juni 2006 genehmigte der Bundesrat auch den Entsorgungsnachweis für ausgediente Brennelemente und hochradioaktive Abfälle basierend auf dem Projekt Opalinuston im Zürcher Weinland. Damit ist der vom Kernenergiegesetz geforderte Nachweis erbracht, dass in der Schweiz sichere geologische Tiefenlager für alle Abfalltypen gebaut werden können.

Die Frage, **wie** die radioaktiven Abfälle in der Schweiz dauerhaft entsorgt werden können, ist beantwortet. Die Frage lautet heute, **wo** die entsprechenden Tiefenlager gebaut werden können. Darüber wird in den kommenden Jahren entschieden (siehe Stichwort «Sachplanverfahren»).

Mit dem Vorliegen des Entsorgungsnachweises ist die Standortwahl rechtlich getrennt von der Frage des Weiterbetriebs und des allfälligen Neubaus von Kernkraftwerken.

Sachplanverfahren

Für die Verwirklichung von Infrastrukturvorhaben von nationaler Bedeutung kann der Bund ein Sachplanverfahren anordnen. Gemäss der geltenden Kernenergieverordnung gibt der Bund in einem solchen Sachplan die Ziele und Vorgaben für die Langzeitlagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern vor.

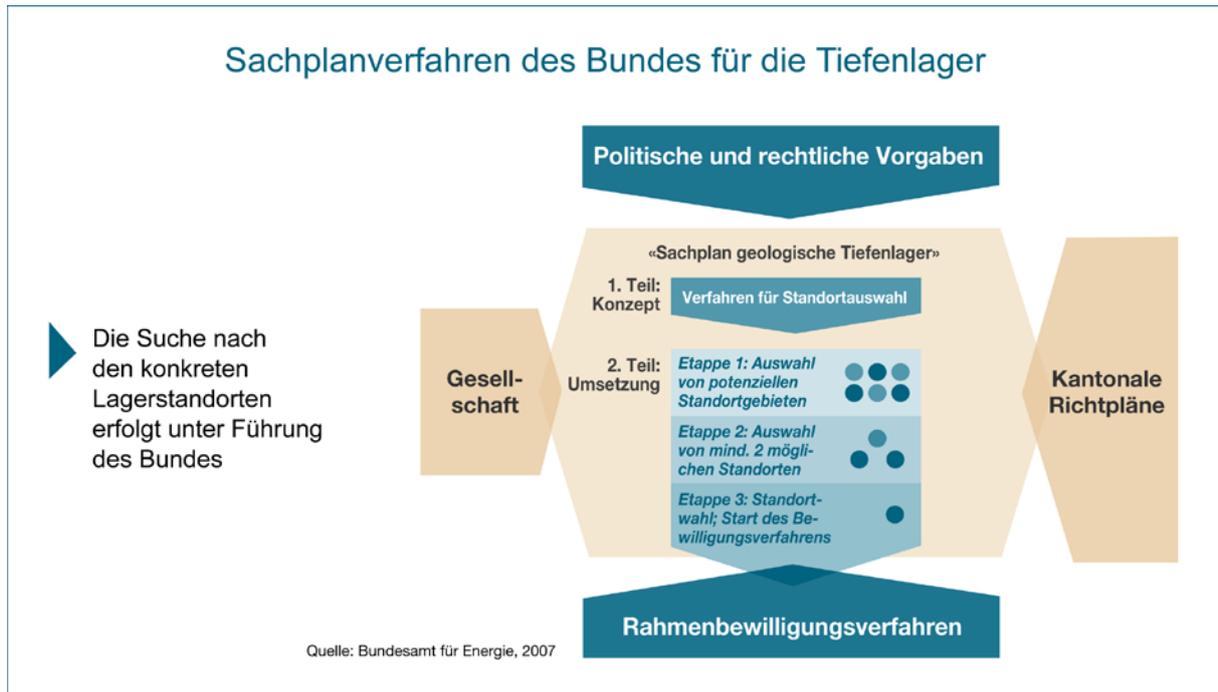
Der «Sachplan geologische Tiefenlager» enthält die Regeln für die Standortwahl:

- In seinem **ersten Teil (Konzeptteil)** legt er die Verfahrensweisen und Kriterien für die Auswahl der Tiefenlager fest. Ziel ist, die verschiedenen Auswahlsschritte bis zur Festlegung eines Standorts für alle transparent zu gestalten und die Zusammenarbeit mit den betroffenen Kantonen und Gemeinden wie auch die Mitwirkung weiterer interessierter Kreise sicherzustellen.
- Im **zweiten Teil** des Sachplanverfahrens werden in mehreren Etappen die konkreten Standorte der Tiefenlager festgelegt.

Startschuss zum Sachplanverfahren

Am **2. April 2008** hat der Bundesrat den Konzeptteil des «Sachplans geologische Tiefenlager» verabschiedet. Der Konzeptteil ist während zwei Jahren unter Einbezug von Bundesbehörden, Kantonen, Nachbarländern, Organisationen, Parteien und Fokusgruppen aus der Bevölkerung in einem breiten Mitwirkungsverfahren erarbeitet worden.

Mit dem Sachplanverfahren will das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Uvek) erreichen, dass ca. im Jahr 2050 ein Lager für die schwach- und mittlerradioaktiven Abfälle (SMA) und ca. im Jahr 2060 ein Lager für die hochradioaktiven Abfälle (BE/HAA) den Betrieb aufnehmen kann.



Zentrale Punkte des Sachplans sind:

- Der Bund übernimmt bei der Festlegung der Standorte die Führungsrolle.
- Oberste Priorität bei der Wahl der Standorte hat die langfristige Sicherheit von Mensch und Umwelt. Die Auswirkungen an der Oberfläche – die sozioökonomischen und raumplanerischen Aspekte – werden ebenfalls berücksichtigt.
- Die gewählten Standorte müssen so beschaffen sein, dass eine spätere Kapazitätserweiterung der Tiefenlager möglich ist, falls in der Schweiz neue Kernkraftwerke gebaut werden.
- Die Kosten werden von den Verursachern getragen.

Standortwahl in drei Etappen

In der **ersten Etappe** werden aufgrund der Geologie die geeigneten Standortgebiete festgelegt. In dieser Etappe überprüft der Bund, ob die von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete grundsätzlich die geforderten Kriterien für die Langzeitsicherheit erfüllen. Am Ende dieser ersten Etappe bestätigt der Bundesrat diese möglichen Standortgebiete oder eine Auswahl von ihnen.

In der **zweiten Etappe** haben die Standortregionen die Möglichkeit, bei der Konkretisierung der Lagerprojekte und den Untersuchungen der sozioökonomischen und raumplanerischen Auswirkungen mitzuarbeiten. Zudem werden die Standorte sicherheitstechnisch verglichen. Am Ende dieser Etappe schlägt die Nagra pro Abfallkategorie mindestens zwei konkrete Standorte vor.

In der **dritten Etappe** werden diese Standorte vertieft untersucht. Um einen gleichwertigen sicherheitstechnischen Kenntnisstand zu erhalten, sind gemäss Uvek erdwissenschaftliche Untersuchungen – inklusive Sondierbohrungen – nötig. Vor dem Einreichen von Rahmenbewilligungsgesuchen müssen zudem die Grundlagen für Kompensationsmassnahmen und für die Beobachtung der gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen erarbeitet sowie die Frage der Abgeltungen geregelt werden.

Allfällige Volksabstimmung

Am Ende des Verfahrens wird der Bundesrat die definitive Standortwahl treffen: entweder für je einen Standort für SMA und für BE/HAA, oder für einen gemeinsamen Standort für alle Abfallkategorien. Nach der Erteilung der Rahmenbewilligung durch den Bundesrat folgt die Genehmigung durch das Parlament und eine allfällige Volksabstimmung auf eidgenössischer Ebene, falls das fakultative Referendum gegen die Rahmenbewilligung ergriffen wird (siehe Stichwort «Bewilligungsverfahren für Kernanlagen»).

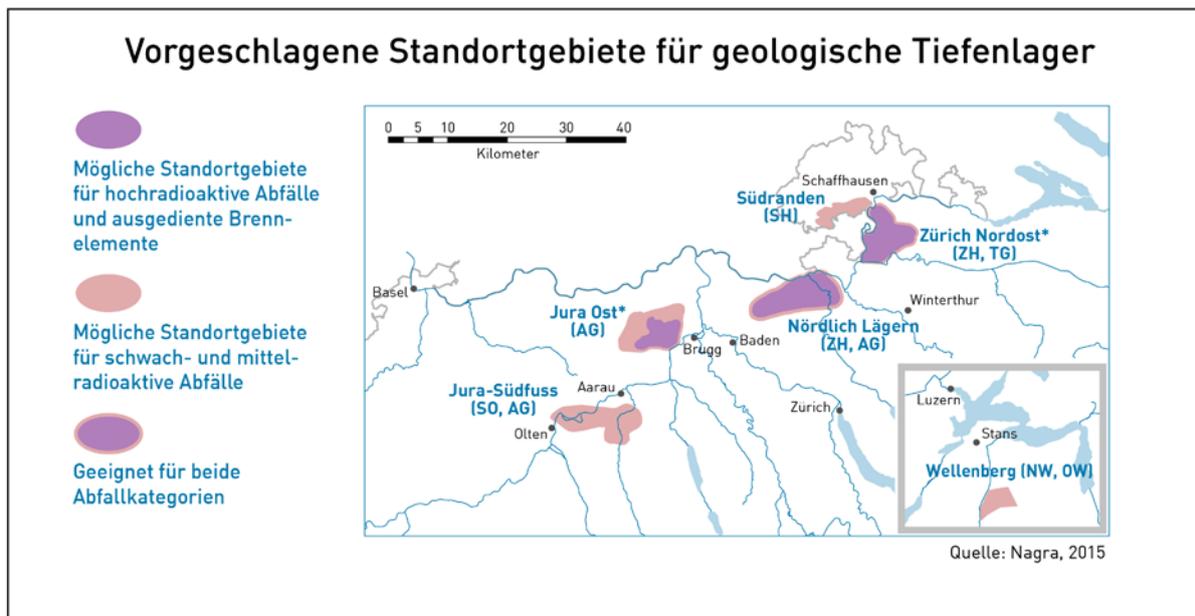
Zeitplan des Bundes für die Inbetriebnahme der geologischen Tiefenlager

Tätigkeit	Zeitbedarf	Termine
<i>Sachplan- und Rahmenbewilligungsverfahren</i>		
Sachplan Etappe 1: Auswahl von geologischen Standortgebieten	3,5 Jahre	bis 30.11.2011 (Bundesratsentscheid)
Sachplan Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten pro Abfallkategorie	5 Jahre	bis Ende 2016
Sachplan Etappe 3: Wahl von einem oder zwei Standorten		
Vorbereitung und Einreichung Rahmenbewilligungsgesuch(e), Überprüfungs- und Genehmigungsverfahren	ca. 10 Jahre	
Entscheid Bundesrat Erteilung der Rahmenbewilligung	1,5 Jahre	① bis ca. 2027
Gemehmigung der Rahmenbewilligung durch das Parlament	1 Jahr	
allenfalls Volksabstimmung		ca. 2028/29
<i>Anschliessend: Bau- und Betriebsbewilligungsverfahren</i>		
Erdwissenschaftliche Untersuchungen, Baubewilligung für Felslabor am Standort (die Bewilligung kann vor Bundesverwaltungsgericht und Bundesgericht angefochten werden)	2-4 Jahre	
Ergänzende Untersuchungen, Bau Zugangsstollen, Bau und Betrieb Felslabor am Standort sowie Baubewilligungsverfahren geologische Tiefenlager (die Baubewilligung kann vor Bundesverwaltungsgericht und Bundesgericht angefochten werden)	SMA: 8-12 Jahre HAA: 18-22 Jahre	
Bau von Lagerstollen/Kavernen, Vorbereitung und Erteilung der Betriebsbewilligung während der Bauphase (die Baubewilligung kann vor Bundesverwaltungsgericht und Bundesgericht angefochten werden)	8-10 Jahre	
Früheste Inbetriebnahme		SMA ca. 2050 HAA ca. 2060

① Dauer hängt massgeblich davon ab, ob z.B. weitere Sondierbohrungen nötig sind
(Quelle: Bundesamt für Energie)

Stand des Sachplanverfahrens

Gegenwärtig steht die **zweite Etappe** in der Umsetzung. Am 6. November 2008 hat das Bundesamt für Energie die Vorschläge der Nagra für mögliche Standortgebiete für geologische Tiefenlager bekannt gegeben. Massgebend für die Vorschläge der Nagra war ausschliesslich die Eignung der Geologie, so wie das im Sachplan vom Bund festgelegt worden ist.



Die von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete für geologische Tiefenlager. Die mit * gekennzeichneten Standortgebiete Jura-Ost und Zürich Nordost hat die Nagra zur vertieften Untersuchung in Etappe 3 des Sachplanverfahrens vorgeschlagen.

Am 26. Februar 2010 hat das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (Ensi) sein Gutachten zu den von der Nagra vorgeschlagenen sechs Standortgebieten veröffentlicht. Darin kommt das Ensi zum Schluss, dass die Analysen der Nagra korrekt und nachvollziehbar sind, die Nagra die geologischen Grundlagen umfassend und gut dokumentiert sowie alle relevanten Informationen für die Auswahl der Standortgebiete ausreichend berücksichtigt hat und dass sie die im Sachplan vorgegebenen Kriterien korrekt angewendet hat.

Auch die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) – sie ist vom Bund eingesetzt und setzt sich aus kernenergie-unabhängigen wissenschaftlichen Experten zusammen – bescheinigt der Nagra eine gute Arbeit. In ihrer Stellungnahme weist die KNE noch auf offene Fragen insbesondere bei der Bautechnik hin, die in den nächsten Etappen beantwortet werden müssen.

In ihrer am 6. Mai 2010 veröffentlichten Stellungnahme attestiert die – ebenfalls vom Bund eingesetzte – Eidg. Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) ihrerseits dem Ensi, dass es die Arbeit der Nagra detailliert geprüft und zudem eigene Berechnungen und Abklärungen durchgeführt sowie externe Experten einbezogen hat. Die KNS schliesst sich dem Ensi-Gutachten an und stimmt den von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten zu. Zudem gab die KNS Empfehlungen für das weitere Vorgehen ab.

Zum gleichen Ergebnis ist die deutsche «Expertengruppe–Schweizer Tiefenlager» (ESchT) gekommen, die das deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zur Begleitung des schweizerischen Standortwahlverfahrens einberufen hat.

Die vorliegenden Gutachten zeigen, dass alle involvierten Experten – einschliesslich jener der Nagra – in ihrer sicherheitstechnischen Beurteilung der Standortgebiete gut übereinstimmen.

Mit der Stellungnahme der KNS lag die letzte sicherheitstechnische Beurteilung der Behörden zu den Standortvorschlägen der Nagra vor.

Der Bundesrat hat alle von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete am 1. Dezember 2011 anerkannt und damit Etappe 2 des Sachplanverfahrens eingeleitet.

In Etappe 2 hat die Nagra am 20. Januar 2012 Vorschläge für mögliche Standortareale für die Oberflächenanlage in allen sechs Standortgebieten eingereicht. Die 20 Vorschläge wurden in den Regionalkonferenzen ausgiebig diskutiert. In die Diskussion haben sich auch die Kantone eingebracht, was gemäss Sachplanverfahren ursprünglich nicht vorgesehen war. Die Kantone und die Regionalkonferenzen haben eigene Kriterienkataloge erstellt, anhand derer Areale ermittelt wurden, auf denen eine Oberflächenanlage stehen könnte. Ziel ist, dass sich die Regionalkonferenzen mit der Nagra auf mindestens ein Areal pro Standortgebiet einigen, an dem eine solche Anlage gebaut werden könnte. Inzwischen haben sich alle Regionen geäussert.

Im Januar 2015 hat die Nagra nach einem sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete einen Einengungsbericht eingereicht. Vorgabe gemäss Sachplanverfahren ist, dass mindestens zwei Standortgebiete pro Abfallsorte in Etappe 3 weitergeführt werden. Die Nagra hat die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorgeschlagen. Sie hat dafür alle Standortgebiete nach den Vorgaben des Bundes sicherheitstechnisch bewertet und verglichen. Die vorgeschlagenen Standortgebiete eignen sich sowohl für ein geologisches Tiefenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) als auch für eines für hochradioaktive Abfälle (HAA). Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) überprüft zurzeit die Vorschläge der Nagra. Über den Einengungsbericht wird schliesslich der Bundesrat entscheiden.

3D-Seismik für Etappe 3

2015 und 2016 sind im möglichen Standortgebiet Jura Ost seismische Messungen des Untergrunds geplant. Sie haben zum Ziel, zusätzliche Kenntnisse über die geologischen Strukturen zu gewinnen und diese im Hinblick auf die Langzeitentwicklung vertieft zu beurteilen. Seismische Messungen werden in der Schweiz seit über 30 Jahren für verschiedene Zwecke routinemässig durchgeführt.

Das Prinzip der Seismik ist einfach: Vergleichbar mit einem Echolot auf Schiffen bildet die Seismik Gesteinsschichten bis in Tiefen von mehreren Kilometern ab. Vibrationsfahrzeuge oder kleine Sprengladungen (in wenigen Metern tiefen Bohrlöchern) erzeugen schwache Schwingungen. Diese breiten sich wellenartig im Untergrund aus, wo sie an den verschiedenen Gesteinsschichten reflektiert werden. Innerhalb von Sekunden erreichen diese «Echos» wieder die Erdoberfläche, wo sie mit empfindlichen Messgeräten, sogenannten Geofonen, aufgezeichnet und anschliessend ausgewertet werden. Wo erforderlich wird in begleitenden Bohrungen zusätzlich die Laufzeit seismischer Signale durch oberflächennahe Lockergesteine gemessen. Diese Daten werden zur Kalibrierung der seismischen Geschwindigkeiten verwendet. Dafür kommen auf Lastwagen montierte, mobile Bohrgeräte zum Einsatz. Die gesamten Arbeiten werden im Einvernehmen mit den zuständigen kantonalen Behörden und nach Vororientierung der Gemeinden und Grundbesitzer durchgeführt. Die Fachbehörden der Kantone haben die Planung der Messungen gutgeheissen. Die seismischen Messungen erfolgen in einem Gebiet von rund 96 Quadratkilometern.

Finanzierung der nuklearen Entsorgung

Die Kosten für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle sowie für die spätere Stilllegung der Schweizer Kernkraftwerke und deren Rückbau bis zur grünen Wiese sind im Strompreis ab Werk inbegriffen. Die dafür notwendigen Mittel werden von den Betreibern laufend zurückgestellt, und zwar so, dass nach 50 Betriebsjahren die für diese Tätigkeiten benötigten Mittel vorhanden sind.

Die Kosten für alle schweizerischen Kernkraftwerke zusammen belaufen sich gemäss den letztmaligen Berechnungen der Kernkraftwerksbetreiber aus dem Jahr 2012 auf rund 20,7 Milliarden Franken (16 Milliarden für die Entsorgung plus 4,7 Milliarden für die Stilllegung). Darin enthalten sind auch die Kosten für den Verschluss der geologischen Tiefenlager und die anschliessende Überwachungsphase während 50 Jahren. Die Kosten werden alle fünf Jahre neu berechnet und von den Aufsichtsbehörden des Bundes überprüft. Dieser Prozess ist aktuell (Oktober 2015) wieder im Gang.

Für die Wiederaufarbeitung, die Forschungs- und Vorbereitungsarbeiten der Nagra, den Bau und Betrieb des Zwiilag usw. haben sich bis Ende 2014 Kosten von rund 5,3 Milliarden Franken aufsummiert. Diese laufenden Kosten wurden und werden künftig bis zur Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke von den Betreibern direkt beglichen.

Zur Deckung der nach der Stilllegung verbleibenden Kosten äufnen die Betreiber bis zur Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke zudem zwei Fonds, den Entsorgungsfonds und den Stilllegungsfonds. Das Vermögen dieser beiden unter Bundesaufsicht stehenden Fonds belief sich Ende 2014 auf rund 6,1 Milliarden Franken. Das liegt deutlich über den vom Gesetz geforderten Soll-Werten.

Umgerechnet auf den Strompreis belaufen sich gegenwärtig die Entsorgungs- und Stilllegungskosten im Mittel auf rund einen Rappen pro Kilowattstunde Kernenergiestrom. Durch diese konsequente Anwendung des Verursacherprinzips entstehen künftigen Generationen keine ungedeckten Kosten. Der Finanzbedarf für Entsorgung und Stilllegung wird periodisch überprüft.