

(Zwischenlager, die später zu Endlagern verschlossen werden können)

Radioaktive Abfälle (radioactive waste RAW) entstehen bei der Elektrizitätserzeugung in Kernkraftwerken (KKW) und bei der Verwendung radioaktiver Elemente in Medizin und Forschung. Es werden unterschieden

- **Hochaktive Abfälle (HAA):** Verbrauchte Brennelemente, verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung von verbrauchten Brennelementen, Alphatoxische Abfälle (mehr als 20'000 Alpha-Zerfälle pro Gramm und Sekunde).
- **Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA):** Alle anderen radioaktiven Abfälle.

HAA erreichen nach etwa 200'000 Jahren die Radiotoxizität des ursprünglich abgebauten Urans,

SMA erreichen nach etwa 30'000 Jahren die Radiotoxizität von Granitgestein.

Gewünschte Einschlusszeit für RA liegt zwischen 100'000 und 200'000 Jahren.

Eine wichtige Bedingung ist die Rückholbarkeit der Brennelemente, von denen erst 1.5% bis 5% der Energie genutzt worden sind. In neuen Kernkraftwerken der Generation IV kann in Zukunft die beträchtliche Restenergie mittels Transmutation durch schnelle Neutronen genutzt werden.

Die Schweiz hat etwa 8'000m³ HAA- und 92'000 m³ SMA-Abfälle; Deutschland etwa 10'500 Tonnen HAA (> 1100 + 800 CASTOR-Behälter) und 600'000m³ SMA-Abfälle: Schätzung Bundesamt f. Kerntechnische Entsorgungssicherheit BMUB 19.1.2017.

Es stellt sich die Frage, ob die Aufarbeitung der Brennstäbe notwendig ist. Diese können doch nach 50 bis 80 Jahren Abkühlung direkt in Behälter aus rostfreiem Stahl mit Blei und Ba-Beton eingeführt werden. Die riesengrossen CASTOR-Behälter und die grossen Pollux-Behälter sollten durch kleinere Behälter für den Transport und direkte Lagerung ersetzt werden.

Geologische Tiefenlager

Diese wurden entsprechend dem Prinzip entwickelt, dass alle Gesteinsarten, die an oder nahe der Erdoberfläche liegen, durch physikalisch-mechanische und chemische Einwirkung (Verwitterung, Erosion) zerkleinert, zersetzt, umgewandelt und aufgelöst werden. Deshalb wurden geologische Tiefenlager entwickelt mit Kammern in Granit oder in Tongestein (Opalinus-Ton, Bentonit) in Tiefen zwischen 500m und 800m, wobei eine geologische Barriere diese Lager nach oben verschliesst. Da die Einwirkung von Wasser (Feuchtigkeit) und Gasen und damit die Korrosion der Stahlfässer nicht ausgeschlossen werden können, werden die HAA bei der Wiederaufbereitung „verbrannt“ und zu einer Schlacke verglast und dann in dicken Gusseisenbehältern „konditioniert“, dies mit dem Ziel der verringerten Auflösung durch reaktives Wasser bei erhöhten Temperaturen und dem Druck im Untergrund. Bei Tiefenlagern muss man neben weit verbreitetem Bergwasser grundsätzlich auch mit Gesteinsbewegungen und Wassereintrüben rechnen, weil sie ja unter der Grundwasserlinie liegen.

Salzbergwerke kommen als Endlager nicht in Frage, weil Salz laufend rekristallisiert und wasserdurchlässig wird und weil salzhaltiges Wasser sehr korrosiv ist.

Tongesteine (Schichtsilikate) geben bei Druck- oder Temperaturerhöhung Wasser ab, und bei Wasseraufnahme findet Aufquellung statt. Ausserdem werden Tongesteine wesentlich schneller aufgelöst als Gerüst-Silikatgesteine des Granit und Gneis. Der Bau von geologischen Tiefenlagern ist sehr komplex, mit sehr grossem finanziellem Aufwand verbunden und stösst bei der betroffenen Bevölkerung auf heftigen Widerstand. Die Entsorgungskosten für die vier Kernkraftwerke (KKW) der Schweiz werden mit 20.7 Mrd CHF angegeben (Kostenstudie 2011 SWISSNUCLEAR), und der Rückbau der 4 KKW mit total 3 Mrd CHF.

Es ist den Geologen gelungen, geologische Tiefenlager als einzige Möglichkeit international durchzusetzen und auch von der IAEO in Wien anerkannt zu bekommen.

Jedoch erlauben die Erkenntnisse der Materialwissenschaften und der Bautechnologie der letzten 60 Jahre, besonders von verbesserten Baumaterialien wie Beton und Stahl, aber auch von entdeckten neuen Materialien, ein alternatives Endlager zu konzipieren, das die oben geschilderten Probleme und Nachteile nicht hat und das mit relativ geringem Aufwand an einsamen Orten gebaut werden kann, wo ein kleiner politischer Widerstand erwartet wird.

Konzept der Höhenlager (Beispiel Schweiz)

Oberhalb des Grundwasserspiegels gibt es viele Lokalisationen, wo auf stabilem Felsuntergrund Höhenlager gebaut werden können. Wegen geringer Wasserlöslichkeit, massiver Dichte und guter mechanischer Festigkeit bieten sich Silikatgesteine (Granit, Gneis, Basalt, Diorit usw.) an, die ja über 60% der Erdkruste bedecken. Als Standorte werden einsame Gebiete in den Bergen bevorzugt, die verkehrsmässig mit Bahn und Strasse gut erschlossen werden können und die nicht populäre Wandergebiete sind oder intensiv für Agrarzwecke genutzt werden. Weiterhin sollten Erdbeben-, Vulkan- und Überflutungsgebiete nicht gewählt werden, auch Bergrutsch- und Lawinen-Zonen sollten nicht in Frage kommen. Weiterhin sollte auch an die nächste Eiszeit in 20'000 bis 100'000 Jahren und die Gletscherbewegung gedacht werden. **Figur 1** zeigt die mögliche Ausdehnung der Gletscher in der Nordschweiz. Diese Gletscher können neue Täler und Seen bilden, die die Rückholbarkeit der Brennelemente aus den Tiefenlagern beeinträchtigen werden.

Für die Realisierung der Höhenlager gibt es die Varianten a) eines künstlichen Hügels, b) eines Kunstbaus, c) des Teil-Abbaus eines vorhandenen Berges und (nach Fertigstellung des Höhenlagers) anschliessender Wiederherstellung der Ursprungsform, oder d) die Nutzung einer militärischen Bergfestung (Bunker).

An der Technischen Universität Karlsruhe (KIT) ist ein Konzept für den Bau von Höhen-Endlager entwickelt worden [H. S. Müller & N. Herrmann at 13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung "Sicherheit durch Beton" March 16,2017 at KIT, Zeitschrift Beton- und Fertigteiltechnik Heft 2, 2017].

Effiziente Konstruktion des Höhenlagers kann erreicht werden, wenn der Aufwand für den Anschluss an das Bahnnetz gering ist und dann der Transport der Baumaschinen und später der radioaktiven Abfälle nicht zuviel Zeit beansprucht. Eine Zahnradbahn in geschlossener Galerie, mit Anschluss an das Bahnnetz mit passender Spurweite, wird nützlich sein.

Durch Zufall hat der Autor vor etwa 50 Jahren eine Wanderung in einem Gebiet durchgeführt, das diesen Ansprüchen weitgehend entspricht: Zusammen mit Dieter Schwarzenbach (etwa 1963 Doktorand ETH Kristallographie, jetzt Prof. emer.) von Ambri-Piotta TI Aufstieg zu Fuss zum Ritom-See, 6-Seen-Wanderung, Cadlimo-SAC-Hütte (war geschlossen) auf den Piz Blas (3019m) und dann durch das mit Bombentrümmern verunstaltete Cadlimo-Tal zum Lukmanier-Pass. Zur Zeit dient das Cadlimo-Tal in den Sommermonaten als Weide für etwa 300 Schafe.

Erste Transportmöglichkeit: Der Piz Blas ist ein mit Felstrümmern übersäter Berg 3019m hoch, der südlich von Rueras oder Sedrun mit einer **neuen Zahnrad-Bahn** durch Val Nalps erreicht werden kann. Baumaschinen und später die HAA- und SMA-Abfälle können mit der Matterhorn-Gotthard-Bahn (MGB) direkt von SBB Göschenen via Andermatt und Oberalp-Pass und dann mit der Zahnradbahn zum Piz Blas transportiert werden, siehe **Figur 2**. Mit der Reaktivierung des Werkgleises Tscheppa-Las Rueras können die leeren Transport-Güterwagen über Disentis/SBB zurücktransportiert werden.

Variante c): Mit Sprengungen und grossen Sägen wird ein Teil des Berges abgetragen wie schematisch in **Figur 3** dargestellt. Der Felsschutt wird teilweise für den Bau der Strasse zum Lukmanier-Pass ($\Delta H \sim 200m$) verwendet und teilweise mit Steinbrech- und Sieb-Maschinen zu Kies und Sand verarbeitet und für die Betonmischung gebraucht. Es werden jeweils Stein(Granit oder Gneiss)-Plattformen erstellt und darauf die RA-Container aufgestellt, im Innern die HAA-Container in einer Kammer umgeben von SMA-Fässern, siehe **Figur 3**. Mit einbetonierten Steinen und Platten aus Granit und rostfreiem Stahl wird am Schluss die ursprüngliche Form des Berges wieder hergestellt. Als Arbeiterunterkunft dient ein einfaches Hotel, das nach Beendigung der Arbeiten für Tourismus eingerichtet wird. Als Kompensation für die betroffenen Gemeinden (Andermatt, Rueras, Sedrun) wird das Val Nalps als Ski-Gebiet ausgebaut mit 6.5km Abfahrt vom Pass Nalps ($\Delta H 750m$) zum Nalps-See, der Zwischenstation der Val-Nalps-Zahnradbahn, und hätte damit Anschluss an die Andermatt-Sedrun-Ski-Arena von Samih Sawiris der Orascom Development Holding AG. Auch die neue Strasse zum Lukmanier-Pass wird dann nützlich sein.

Eine alternative Transportmöglichkeit kann mit dem Gotthard-Basistunnel erhalten werden. Baumaterial und später die RAW-Container werden in Erstfeld zu Transportzügen zusammengestellt und zur Multifunktionsstelle Sedrun gefahren und dort gleichzeitig in einer Schnellaktion (**Figur 4**) mittels gesteuerten Kranen innerhalb von 3 Minuten ausgeladen**. Nach dem Transport zum Aufzug der Porta Alpina Station (PAS) werden sie mit dem Aufzug 800m in 2 bis 3 Minuten hochgezogen, Tragkraft der Aufzugsanlage mit abgehängtem Korb 116t, mit Korb Nutzlast ca. 40t. Oben werden die RAW-Container in einer Halle zwischengelagert, bis sie mit der Zahnradbahn zum Piz Blas gefahren werden können. Sedrun und das Surselva wären interessiert, die PAS nach Abschluss der Arbeiten als Touristen-Station mit 1 Zug pro Tag ausbauen zu können und damit die Vor-Investitionen von 15.8 Millionen CHF zu amortisieren. An den zwei PAS-Stationen bei Sedrun (Nord- und Süd-Linie) der Gotthard-Basisbahn gibt es je eine Halle von $38 \times 10m^2$ und Höhe von 5.5m für Zwischen-Lagerung der RAW-Container und später für Tourismus je bis zu 240 Personen. **Figur 5** zeigt schematisch diese Transportvariante. **Bei 14 Minuten Fahrzeit Erstfeld-PAS wird der Basistunnel für etwa 32 Minuten pro Tag genutzt.

Für die Variante a) besteht das Endlager aus einem künstlichen Hügel, der auf einem relativ flachen Gelände mit Felsuntergrund gebaut wird und sich nach Fertigstellung der Landschaft anpasst, siehe **Figur 6**. Um die beschriebenen Transportmöglichkeiten zu nutzen, wäre ein Ort mit kleinem Gefälle an der Südseite des Cadlimo-Tals, z.B. Nordhang des Schenadüi (2678 bzw. 2747m) oder nördlich des Laghetti di Miniera östlich des Bachbetts möglich, braucht aber vorgängige Abklärungen. **Figur 7** zeigt die detaillierte Geographie Piz Blas-oberes Val Nalps mit Endlager-Baustellen und Ski-Abfahrt. Mit der Zahnradbahn kann direkt mit Steigung an das Endlager gefahren werden, um die RA-Abfälle zu deponieren. Anschliessend wird ein Hügel gestaltet (**Figur 8**) oder eine vom Architekten gewünschte Struktur, die sich der Umgebung anpasst. Eine zentrale Kammer kann für die Lagerung der HAA-Abfälle eingerichtet werden mit einem Betonkanalausgang, der später für die Rückholung der Container genutzt werden kann und jetzt aber mehrfach gesichert und verschlossen wird (**Figur 9**). Auch werden Temperatur- und Feuchtigkeits-Messfühler und Rohre für Gasmessungen in einen eingebauten von aussen zugänglichen Kontrollraum verlegt. Die anfängliche Wärmeentwicklung der HAA-Abfälle kann mittels Wärmeleitfähigkeit und äussere Wärmetauscher genutzt werden (Gebäudeheizung, Elektrizität). Die Struktur der Höhenendlager wird mit optimierten Materialien (Spezial-Stahlbeton, Stahl, Granitplatten usw.) hergestellt, so dass sie allen Einwirkungen (z.B. Raketen, Wetter) und Gletscher-Erosion für mindestens $100'000$ Jahre widerstehen kann.

Durch die Trockenlagerung kann die Korrosion der Container weitgehend verhindert werden.

Ausserdem sollten die Brennelemente eingeschlossen und versiegelt werden, so dass deren Korrosion und Oxidation ausgeschlossen werden können. Bestgeeignet wären Edelmetalle wie Silber, Gold, Platin, deren hoher Wert sie zu attraktiv machen und damit ein Risiko darstellen würde. **Figur 10** zeigt die thermodynamische Stabilität einiger Metalloxide, die für die Einkapselung geeignet wären. Dieses Ellingham-Diagramm, erweitert für CO_2 und H_2-H_2O Gasmischungen von Richardson & Jeffes, ist im Buch von L.S. Darken & R.W. Gurry (Physical Chemistry of Metals, McGrawHill 1953) beschrieben. Praktische Temperaturwerte können durch gerade Linien ausgehend von den drei Punkten (O, H, C) links zu den Sauerstoff-Partialdrücken oder Gasmischungen am rechten Rand erhalten werden und die Stabilitätsgrenzen der Metalloxide treffen. Dementsprechend sind Eisen-Nickel-Chrom Legierungen (rostfreier Stahl) und Blei geeignet. Schweden hat Kupfer als Einkapsel-Metall vorgesehen.

Die Grösse eines Höhenendlagers kann so gewählt werden, siehe **Figur 11**, dass andere Länder wie zum Beispiel Deutschland, Belgien und Frankreich usw. auch ihre RA-Abfälle dort kostenpflichtig deponieren können unter den Voraussetzungen, dass die Abfälle (von der Schweiz kontrolliert) perfekt konditioniert worden sind und dass die Transportwege (z.B. Deutsche Bahn Basel bis Karlsruhe) genügend ausgebaut sind.

Das Cadlimo-Tal und der Piz Blas erfüllen die Forderungen bezüglich Einsamkeit und Zugänglichkeit mit der Bahn, sogar mit getrenntem Zubringer- und Rückfahr-Verkehr, und weisen den zusätzlichen Vorteil der späteren touristischen Nutzung auf. Natürlich gibt es in den Alpen weitere Orte, die für Höhenendlager geeignet sind, wobei ein wichtiger Faktor die (finanziell kompensierte) Zustimmung des Kantons und der Gemeinden ist. Im Fall vom Piz Blas sind dies Tujetsch/Sedrun GR und Quinto TI, wobei Sedrun ähnliche Bautätigkeit beim Bau des Gotthard-Basistunnels positiv kennengelernt hatte und auch Interesse an der touristischen Nutzung (lange Ski-Abfahrt ab Nalps-Pass) hätte.

Viele der Forschungsergebnisse der 1972 gegründeten NAGRA (bei typischem Jahresbudget bis zu 3 Mio CHF) können auch beim Höhenlager-Konzept nützlich sein, und einige NAGRA-Spezialisten sollten bei diesem Projekt mitwirken. Eventuell könnte AlpTransit AG, NAGRA oder ein Generalunternehmer die Realisierung dieses Höhenlager-Konzepts leiten. Kandidaten für das Zahnradbahn-System wären Stadler-Rail oder Siemens.

Sowohl die geologischen Tiefenlager als auch die oben vorgeschlagenen Höhenlager sind sicher vor menschlichen, kriegerischen und terroristischen Handlungen und vor Flugzeugabstürzen. Jedoch sind die Höhenlager zusätzlich sicher vor Einwirkungen des Wassers und vor Korrosion, auch durch Gletscher der nächsten Eiszeit, und sind wesentlich einfacher und kostengünstiger herzustellen an Orten, wo mit geringem politischen Widerstand gerechnet werden muss. Auch ermöglichen sie die wichtige Rückholbarkeit.

Endlager/Zwischenlager für radioaktive Abfälle sollten in Zukunft nur weit oberhalb der Grundwasserspiegel errichtet werden. Allerdings müssen durch Geologen, Geophysiker, Bauingenieure, Physiko-Chemiker und Materialwissenschaftler für die internationale Anerkennung Gutachten für die IAEO Wien erstellt werden.

20.2.2019/ Hans J. Scheel

P.S. Das Korrosionsproblem der geologischen Tiefenlager ist in **Figur 12** demonstriert, die ein Fass zeigt, das 30 Jahre in einer Betonkammer in 8 m Tiefe gelagert worden ist (Brunsbüttel): Solche Korrosion kann im trockenen Höhenlager vermieden werden. Die grosse Zahl der Fässer kann 10:1 bis 100:1 reduziert werden, wenn deren Inhalte, die zum Teil aus Kleidung und Reinigungsmaterial bestehen, entleert, in einer Presse komprimiert und dann in einem Spezial-Krematorium sorgfältig kremiert werden. Die Asche wird dann trocken in neue Fässer abgefüllt, die dann im trockenen Höhenlager deponiert werden.