

# Realisierbare Endlager für Radioaktive Abfälle (RAW)

16.5.2018/ Hans J. Scheel

## Zusammenfassung

Der Umgang mit radioaktiven Abfällen ist eine Herausforderung für Politik und Gesellschaft. Die lange Strahldauer dieser Abfälle stellt besondere Anforderungen an deren langfristige Lagerung. Bisher wurden geologische Tiefenlager als Lösung dieses Problems angesehen. Wissenschaftliche und technologische Fortschritte in den letzten 60 Jahren haben aber dazu geführt, dass radioaktive Abfälle auch in Höhenendlagern aufbewahrt werden können. Diese Schrift argumentiert nun, dass die Lagerung radioaktiver Abfälle in Höhenlagern nicht nur sicherer und wirtschaftlicher ist, sondern auch gegen geringeren politischen Widerstand durchgeführt werden kann. Ausserdem könnte dieses Endlager vorher schon als Zwischenlager verwendet werden, was die wichtige «Rückholbarkeit» erleichtert.

## Ausgangslage

Radioaktive Abfälle (Englisch «radioactive waste», RAW) entstehen bei der Elektrizitätserzeugung in Kernkraftwerken (KKW) und bei der Verwendung radioaktiver Elemente in Medizin und Forschung. Es werden zwei Arten von Abfällen unterschieden:

- Hochaktive Abfälle (**HAA**): Verbrauchte Brennelemente, verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung von verbrauchten Brennelementen, alphanukleare Abfälle (mehr als 20 000 Alpha-Zerfälle pro Gramm und Sekunde). Diese Abfälle erreichen nach etwa 200 000 Jahren die Radiotoxizität des ursprünglich abgebauten Urans.
- Schwach- und mittelaktive Abfälle (**SMA**): Alle anderen radioaktiven Abfälle. SMA erreichen nach etwa 30 000 Jahren die Radiotoxizität von Granitgestein.

Die gewünschte Einschlusszeit für radioaktive Abfälle liegt also zwischen 100 000 und 200 000 Jahren, maximal bei 1 Million Jahren.

Ein wichtiger Faktor ist die **Rückholbarkeit** der Brennelemente. Aktuelle Kernkraftwerke können nur 1.5% bis 5% der Energie der Brennelemente nutzen. In zukünftigen Kernkraftwerken der Generation IV kann dann die beträchtliche Restenergie genutzt werden.

Die Schweiz hat etwa 8 000 m<sup>3</sup> HAA- und 92 000 m<sup>3</sup> SMA-Abfälle; Deutschland etwa 10 500 Tonnen HAA- und 600 000 m<sup>3</sup> SMA-Abfälle<sup>1</sup>.

## Variante Geologische Tiefenlager

Die erste Möglichkeit, radioaktive Abfälle sicher zu lagern, sind die geologischen 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 500 m und 800 m, 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». Das bedeutet, dass die Abfälle in einen chemisch stabilen und in Wasser nicht oder nur schwer löslichen Zustand überführt und in ihrem Volumen reduziert werden. Das bewirkt eine verringerte Auflösung durch reaktives Wasser bei erhöhten Temperaturen und dem Druck im Untergrund.

Allerdings haben Tiefenlager einige gewichtige Nachteile. 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 wasserundurchlässig wird. Zudem ist salzhaltiges Wasser sehr korrosiv. Tongesteine (Schichtsilikate) geben bei Druck- oder Temperaturerhöhung Wasser ab. Zudem quellen diese Gesteine auf, wenn sie Wasser aufnehmen. Ausserdem werden Tongesteine wesentlich schneller aufgelöst als Granit und Gneis.

Der Bau von geologischen Tiefenlagern ist sehr komplex und mit grossem finanziellem Aufwand verbunden. Die Entsorgungskosten für die vier Kernkraftwerke (KKW) der Schweiz werden mit CHF 20,7 Mrd. angegeben und der

Rückbau der 4 KKW mit total CHF 3 Mrd. Kürzlich wurden die Kosten auf CHF 20,8 Mrd und CHF 3,8 Mrd. erhöht und würden die AKW-Betreiber entsprechend stärker belasten<sup>2</sup>. Geologische Tiefenlager stossen zudem bei der betroffenen Bevölkerung auf heftigen Widerstand.

Es ist den Geologen gelungen, geologische Tiefenlager als einzige Möglichkeit zur Entsorgung nuklearer Abfälle international durchzusetzen und auch von der IAEA in Wien anerkannt zu bekommen. Es existiert allerdings eine Alternative, die einige Aspekte der Tiefenlager bewahrt, aber sicherer, günstiger und politisch akzeptabler ist. Es sind dies die Höhenlager.

## Variante Höhenlager

Die Erkenntnisse der Materialwissenschaften und der Bautechnologie der letzten 60 Jahre, besonders von verbesserten Baumaterialien wie Beton und Stahl, aber auch von neu entwickelten Materialien, erlauben es, ein alternatives Endlager zu konzipieren, das die geschilderten technischen Probleme vermeidet und mit relativ geringem Aufwand an einsamen Orten gebaut werden kann, wo ein geringer politischer Widerstand erwartet wird.

Oberhalb des Grundwasserspiegels gibt es viele Lokalitäten, 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 keine Erdbeben-, Vulkan- und Überflutungsgebiete gewählt werden. Auch Berggrutsch- und Lawinenzonen sollten nicht in Frage kommen. Weiterhin sollte auch an die nächste Eiszeit in 41 000 bis 100 000 Jahren und an die Gletscherbewegung gedacht werden.

**Abbildung 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 könnten. - Für die Realisierung der Höhenlager gibt es vier Varianten:



- Ein künstlicher Hügel
- Ein Kunstbau
- Ein Teil-Abbau eines vorhandenen Berges mit (nach Fertigstellung des Höhenlagers) anschliessender Wiederherstellung der Ursprungsform
- Die Nutzung einer militärischen Bergfestung (Bunker)

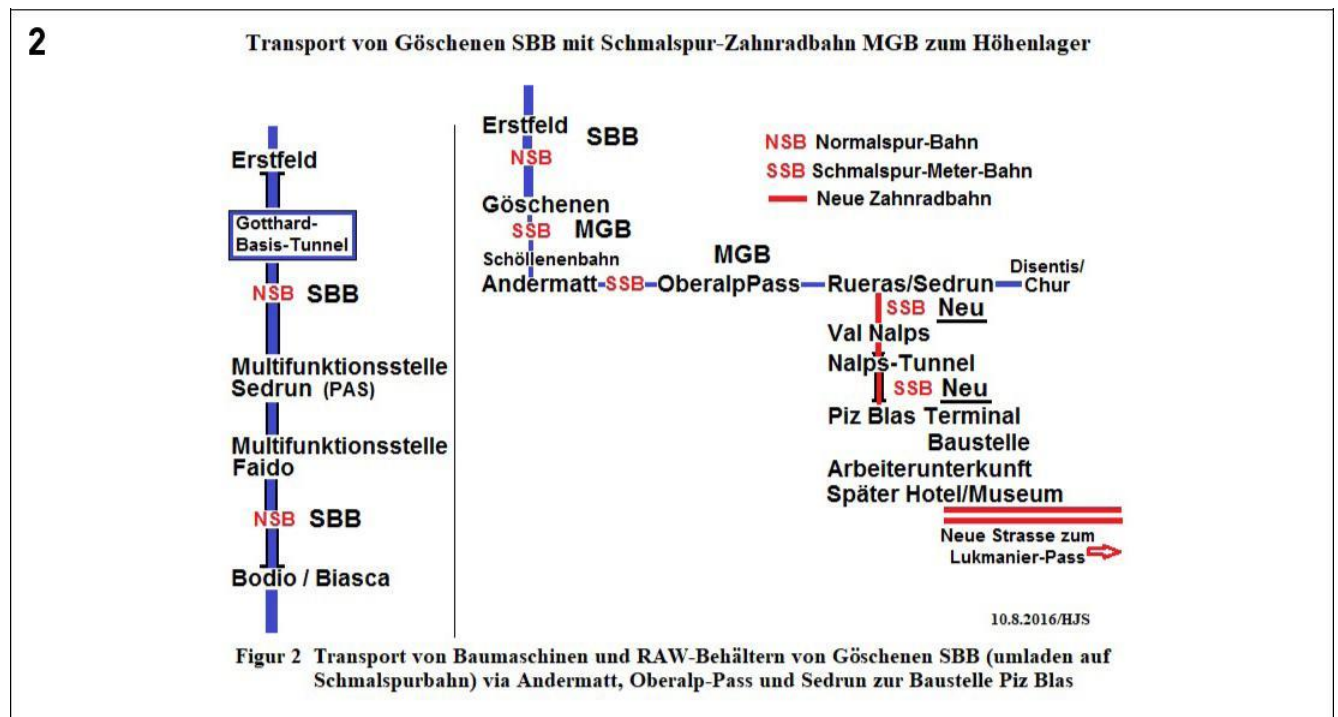
An der Technischen Universität Karlsruhe (KIT) ist ein Konzept mit Beton-Fertigteilen für den Bau von Höhenendlagern entwickelt worden<sup>3</sup>.

Eine 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 zu viel 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: von Ambri-Piotta TI Aufstieg zu Fuss zum Ritom-See, 6-Seen-Wanderung, Cadlimo-SAC-Hütte (war geschlossen), Besteigung des Piz Blas (3019 m) und dann durch das Cadlimo-Tal zum Lukmanierpass. Dieses Gebiet kann auf zwei Arten in nützlicher Weise erreicht werden.

## Erste Transportmöglichkeit: Zahnradbahn

Der Piz Blas ist ein mit Felstrümmern übersäter Berg, der südlich von Rueras oder Sedrun mit einer neuen Zahnrad-Bahn (in geschlossener Galerie mit Seitenfenster) 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 Oberalppass und dann mit der Zahnradbahn zum Piz Blas transportiert werden (**siehe Abbildung 2**). Mit der Reaktivierung des Werkgleises Tscheppa-Las Rueras können die leeren Güterwagen über



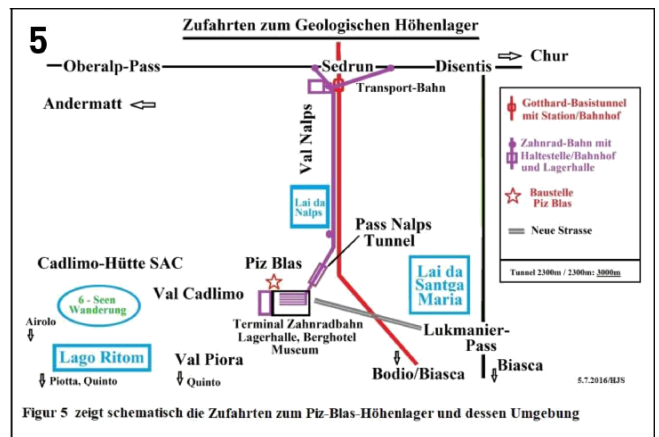
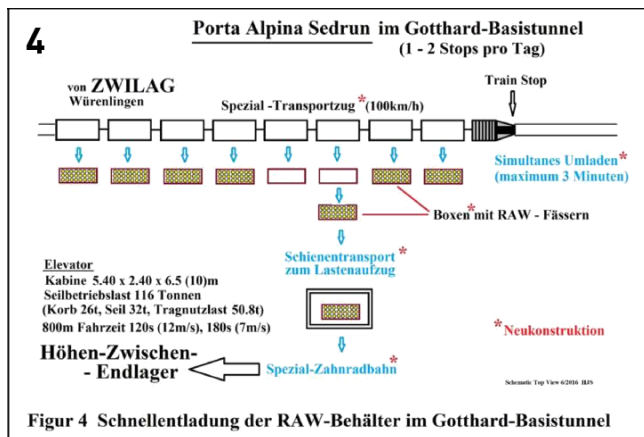
Disentis/SBB zurücktransportiert werden.

## Zweite Transportmöglichkeit: Gotthard-Basistunnel

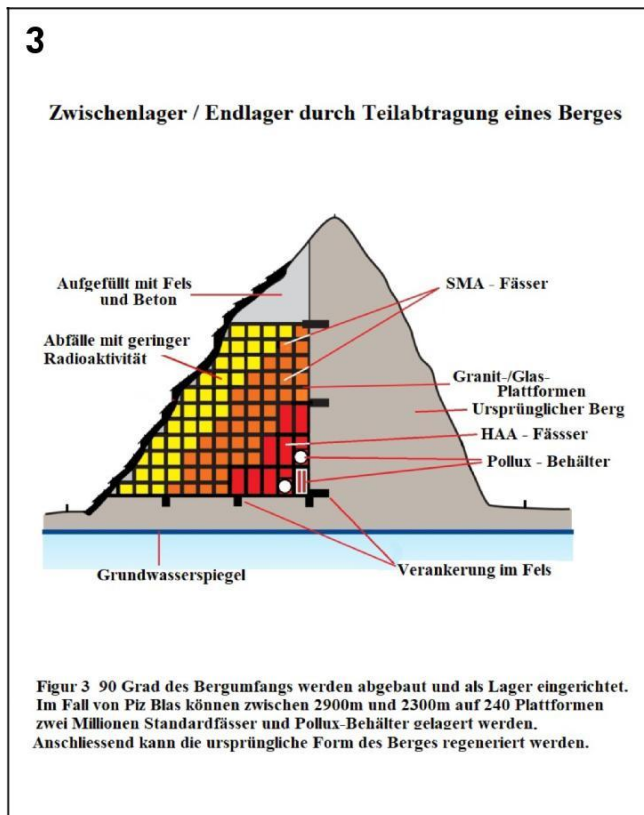
Diese Transportvariante nutzt den Gotthard-Basistunnel. Baumaterial und später die RAW-Container werden in Erstfeld zu Transportzügen zusammengestellt, zur Multifunktionsstelle Sedrun gefahren und dort in einer Schnell-Aktion, **Abbildung 4**, mittels gesteuerten Kranen innerhalb von 3 Minuten ausgeladen<sup>4</sup>.

Nach dem Transport zum Aufzug der PortaAlpinaStation (PAS) werden sie mit dem Aufzug 800 m in 2 bis 3 Minuten hochgezogen. 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 Vorinvestitionen von CHF 15,8 Millionen zu amortisieren. An den zwei PAS-Stationen bei Sedrun (Nord- und Süd-Linie) der Gotthard-Basisbahn gibt es je eine Halle von 38x10 m<sup>2</sup> und Höhe von 5,5 m für Zwischen-Lagerung der RAW-Container und später für Tourismus je bis zu 240 Personen. **Abbildung 5** zeigt schematisch diese Transportvariante.

Es gibt nun zwei Varianten, wie ein solches Höhenlager konkret realisiert werden kann.



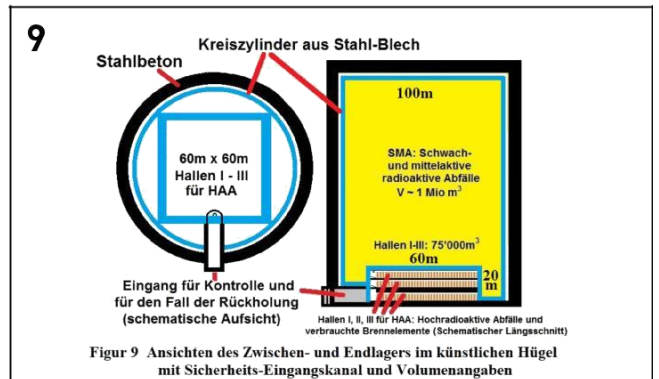
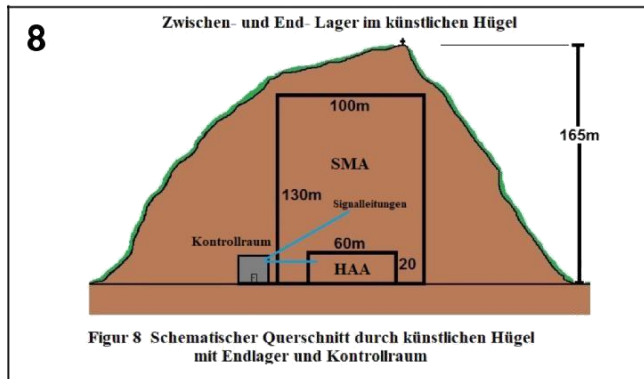
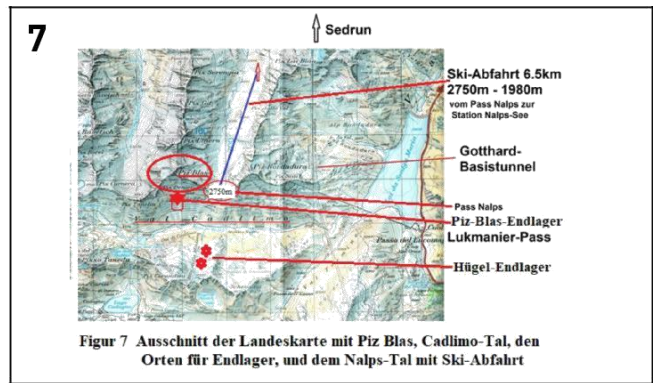
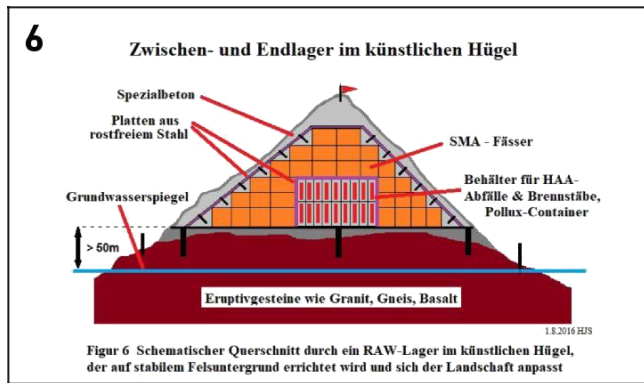
### Variante c – ein Teilabbau eines vorhandenen Berges:



Mit Sprengungen und grossen Sägen wird ein Teil des Berges abgetragen wie schematisch in **Abbildung 3** dargestellt. Der Felschutt wird zum Teil für den Bau der Strasse zum Lukmanier-Pass ( $\Delta H \sim 200$  m) verwendet und teilweise mit Steinbrech- und Siebmaschinen zu Kies und Sand verarbeitet und für die Betonmischung gebraucht. Es werden jeweils Steinplattformen erstellt oder Glasplattformen gegossen. Darauf werden die Container mit radioaktiven Abfällen aufgestellt, im Innern die HAA-Container in einer Kammer umgeben von SMA-Fässern, siehe **Abbildung 3**. Mit einbetonierten Steinen und Granitplatten wird am Schluss die ursprüngliche Form des Berges wiederhergestellt. Als Arbeiterunterkunft dient ein einfaches Hotel, das nach Beendigung der Arbeiten für den Tourismus eingerichtet wird. Als Kompensation für die betroffenen Gemeinden (Andermatt, Rueras, Sedrun) wird das Val Nalps zum Skigebiet ausgebaut mit 6,5 km Abfahrt vom Pass Nalps ( $\Delta H 770$ m) 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 Lukmanierpass wird dann nützlich sein. Nach Fertigstellung der Zahnradbahn könnte diese im Sommer für den Endlagerbau und im Winter für Ski-Tourismus genutzt werden.

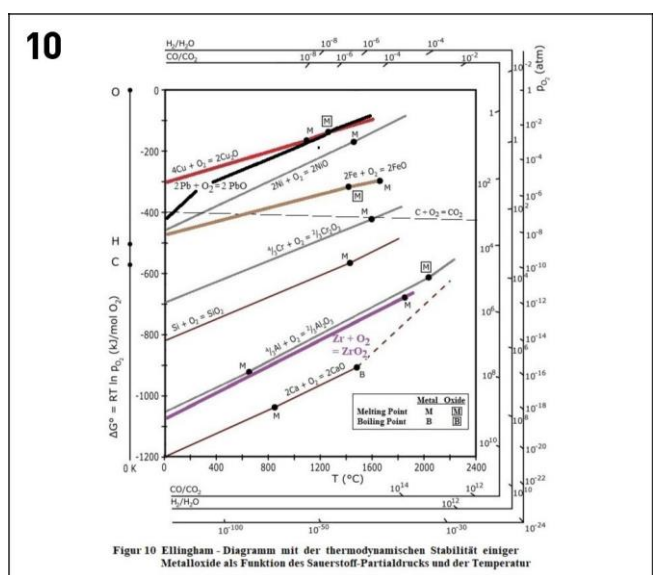
### Variante a – ein künstlicher Hügel:

Das Endlager besteht aus einem künstlichen Hügel, der auf einem relativ flachen Gelände mit Felsuntergrund gebaut wird und sich nach Fertigstellung der Landschaft anpasst, siehe **Abbildung 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. Dieser Ansatz benötigt aber vorgängige Abklärungen. **Abbildung 7** zeigt die detaillierte Geographie Piz Blas - oberes Val Nalps mit Endlagerbaustellen und Skiabfahrt. Mit der Zahnradbahn kann direkt mit Steigung an das Endlager gefahren werden, um die radioaktiven Abfälle zu deponieren. Anschliessend wird ein Hügel gestaltet (**Abbildung 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, jetzt aber mehrfach gesichert und verschlossen wird (**Abbildung 9**). Auch werden Temperatur- und Feuchtigkeitsmessfühler und Rohre für Gasmessungen in einen von aussen zugänglichen Kontrollraum verlegt. Die anfängliche Wärmeentwicklung der HAA-Abfälle kann mittels Wärmeleitflüssigkeit und äussere Wärmetauscher genutzt werden (z.B. für Gebäudeheizung, Elektrizität). Die Struktur der Höhenendlager wird mit optimierten Materialien (Spezial-Stahlbeton, Stahl, Granitplatten usw.) hergestellt, sodass sie allen Einwirkungen (z.B. Raketen, Wetter) für mindestens 100 000 Jahre widerstehen kann.

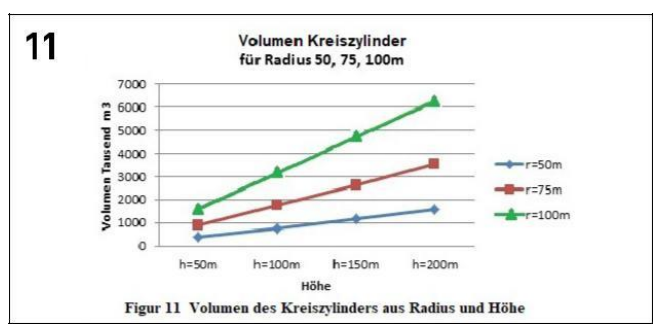


Durch die Trockenlagerung oberhalb des Grundwasserspiegels kann die Korrosion der Container weitgehend verhindert werden<sup>5</sup>.

Ausserdem sollten die Brennelemente eingeschlossen und versiegelt werden, sodass deren Korrosion und Oxidation ausgeschlossen werden können. Am besten geeignet wären Edelmetalle wie Silber, Gold, Platin, deren hoher Wert sie aber zu attraktiv machen. **Abbildung 10** zeigt die thermodynamische Stabilität einiger Oxide von Metallen, die für die Einkapselung geeignet wären. Dieses Ellingham-Diagramm, erweitert für CO-CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 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 Einkapselmetall vorgesehen.



Dieses Höhenendlager hat das Potenzial, zu einem Wirtschaftsfaktor zu werden. Die Grösse eines Höhenendlagers kann so gewählt werden, dass andere Länder (wie zum Beispiel Deutschland, Belgien und Frankreich) auch ihre radioaktiven Abfälle dort kostenpflichtig deponieren können. Dies 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 (**siehe Abbildung 11**).



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 potenziellen 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 CHF 3 Mio.) 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<sup>5</sup> und sind wesentlich einfacher und kostengünstiger herzustellen. Zudem werden sie an Orten erstellt, an denen mit geringem politischen Widerstand zu rechnen ist. Auch ermöglichen sie die wichtige Rückholbarkeit. Ein ähnliches Zwischen-/Endlager-Konzept wurde für Deutschland ausgearbeitet.*

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

1 Schätzung Bundesamt f. Kerntechnische Entsorgungssicherheit BMUB 19.1.2017

2 Kostenstudie 2011 SWISSNUCLEAR und NZZ vom 13.4.2018 S. 17.

3 H. S. Müller & N. Herrmann am 13.Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung «Sicherheit durch Beton» 16. März, 2017, KIT, Zeitschrift Beton- und Fertigteiltechnik Heft 2, 2017.

4 Bei 14 Minuten Fahrzeit Erstfeld-PAS wird der Basistunnel für etwa 32 Minuten pro Tag genutzt.

5 Das Korrosionsproblem der geologischen Tiefenlager ist in **Abbildung 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 um das zehnfache bis hundertfache reduziert werden, wenn deren Inhalte, die zum Teil aus Kleidung und Reinigungsmaterial bestehen, entleert, in einer Presse komprimiert und dann in einem Spezialkrematorium sorgfältig verbrannt werden. Die Asche wird dann komprimiert und trocken in neue Fässer abgefüllt, die dann im trockenen Höhenlager deponiert werden.

Hans J. Scheel, Dr.-Ing.  
Staatsstrasse 27C, 3653 Oberhofen, Switzerland  
hans.scheel@bluewin.ch Tel. +41 (0)79 542 00 78

**12** Radioaktive Abfälle zu lange in Fässern gelagert  
Von Eckart Pasche | 28. Februar 2014 | Ausgabe 9 Kernkraft

Die während des Betriebs des Kernkraftwerks Brunsbüttel in den Jahren 1977 bis 2007 angefallenen schwach- und mittelradioaktiven Abfälle wurden in insgesamt 631 Stahlfässer gefüllt. Nun hat man 18 Fässer entdeckt, die korrodieren. Hintergrund: Die betroffenen Fässer sollten eigentlich längst endgelagert sein. Was fehlt, ist bislang das Endlager.



Foto: Gehrman/mgji

**Figur 12. Verrostetes Fass im Kernkraftwerk Brunsbüttel für schwach- und mittelradioaktiven Abfall**

Die in Brunsbüttel angefallenen Fässer mit schwach- und mittelradioaktivem Abfall lagern in sechs, mit dicken Betonriegeln verschlossenen Kavernen in 8 m Tiefe. Erste defekte Fässer waren vor knapp zwei Jahren entdeckt worden. Um Aufschluss über den Zustand der anderen Behälter zu gewinnen, begann Vattenfall im Januar 2014 mit der optischen Untersuchung der Kaverne 4, in der 70 Behälter dicht an dicht stehen.

Kernkraftwerk Brunsbüttel (KKB) liegt an der Mündung der Elbe in die Nordsee, etwa 75 km nordwestlich von Hamburg. Gesellschafter des Betreibers Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH & Co. OHG sind Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH (66,7 %) und E.ON Kernkraft (33,3 %).