

5.4.3 Endlagerung in tiefen Bohrlöchern - ENTWURF 16.03.2016

Die Kommission hat die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als mögliche Alternative zur Endlagerung in einem Bergwerk identifiziert, die einer näheren Befassung bedarf, und hat sich anhand eines Gutachtens über den derzeitigen Sachstand informiert¹.

Die Lagerung hochradioaktiver Abfälle in bis zu 5.000 m tiefen Bohrlöchern ist eine Form der geologischen Tiefenlagerung, für die aufgrund der Tiefe und den überlagernden Gesteinschichten als sicherer Einschluss hoch radioaktiver Abfälle prinzipiell vorstellbar ist.

In Deutschland wurde sie bisher nicht näher als Entsorgungsalternative betrachtet. International stellen beispielsweise die USA und Schweden Überlegungen zu derartigen Konzepten an. Vertiefte Untersuchungen oder Demonstrationsvorhaben erfolgten bisher nicht.

5.4.3.1 Technisches und sicherheitliches Konzept

Die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern soll eine weiträumige Isolation der Abfälle von der Biosphäre ermöglichen, sowie die Möglichkeit, mehrere (redundante) unterschiedliche (diversitäre) geologische Barrieren für die Sicherheit des Endlagers nutzen zu können. Die Schädigung des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist bei Bohrungen grundsätzlich geringer als bei Bergwerken, außerdem können die langen Verschlussstrecken der Bohrungen mit ebenfalls redundanten und diversitären Versiegelungen ausgestattet werden. Nicht zuletzt wird die große Einlagerungstiefe als Merkmal einer erhöhten Proliferationssicherheit gesehen².

Der Anspruch an die tiefe Bohrlochlagerung als Form der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle muss nach heutigem Maßstab sinngemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010³ entsprechen, d.h. sie muss dauerhaft und langfristig nachsorgefrei einen sicheren Einschluss für eine Million Jahre, i. W. durch die geologischen Barrieren, gewährleisten. Dabei sollen Rückholung während des Betriebs und Bergung in einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss möglich sein. Hinsichtlich dieser Anforderungen wurde in dem beauftragten Gutachten ein Grundkonzept für tiefe Bohrlöcher entwickelt, anhand dessen der Stand der Technik und die mit dem Konzept verbundenen Sicherheitsaspekte diskutiert wurden.

Das Konzept sieht einen Einlagerungsbereich in 3.000 m bis 5.000 m Tiefe in vertikalen Bohrungen im kristallinen Grundgebirge vor. Andere geeignete Wirtsgesteinstypen sind in dieser Tiefenlage in Deutschland nicht zu erwarten. Der Einlagerungsort soll von mindestens zwei unabhängig wirkenden geologischen Barrieren (Salz / Ton) überlagert werden. Zwischen Einlagerungstiefe und den Salz- und Tonbarrieren soll eine Auffang- bzw. Fallenstruktur zur Speicherung der als Korrosionsprodukte zu erwartenden Gase vorliegen.

Der Minstdurchmesser der Bohrungen orientiert sich am Durchmesser der Einlagerungskönnen (konzeptioneller Durchmesser 430 mm), die zusätzlich einen stabilisierenden Einlagerungsbehälter benötigen. Je tiefer die Bohrung desto mehr Behälter kann sie aufnehmen, umso stabiler müssen aber auch die Behälter aufgrund von Auflast und Druckbeaufschlagung im verschlossenen Bohrloch sein. Die erforderliche Stabilität des Behälters wird durch die Wandstärke erreicht, die wiederum den Durchmesser der Bohrung beeinflusst. Das von der Kommission in Auftrag gegebene Gutachten betrachtet dazu verschiedene Varianten mit dem Ergebnis, das für eine Einlagerungstiefe von 5.000 m aufgrund der Behälterdimensionierung ein Bohrlochdurchmesser von 900 mm für erforderlich gehalten⁴ wird. Für weniger tiefe Bohrungen sind geringere Durchmesser ausreichend.

Gelöscht: ein

¹ Bracke, Guido, et al., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52

² vgl. K-MAT 52, S. 16

³ Vgl. BMU, Sicherheitsanforderungen, 2010

⁴ Vgl. K-MAT 52, S. 158

Die Bohrung bedarf einer vollständigen Verrohrung. Im Einlagerungsbereich wird das Bohrloch mit Verrohrung und zusätzlicher Zementierung des Ringraums ausgebaut. Im Bereich der Barrieren aus Salzgestein und Tonschichten müsste die Verrohrung beim Verschluss des Bohrlochs rückgebaut werden, um Konvergenz und Selbstheilung der geologischen Barrieren nicht zu beeinträchtigen. Das Bohrloch wird für die Einlagerung mit einem Bohrlochbetriebsfluid gefüllt, das der Bohrlochstabilität dient und die Rückholbarkeit gewährleistet. Abdichtende Funktion beim Bohrlochverschluss haben Verfüllungen aus Salzgrus, Bentonit und Asphalt/Bitumenschichten oberhalb der eingelagerten Abfälle.

5.4.3.2 Stand der Technik und Entwicklungsbedarf

Untersuchungen zu tiefen Bohrlöchern als Entsorgungsoption werden derzeit hauptsächlich in den USA vorangetrieben. So plant das Department of Energy (DOE) neben geowissenschaftlicher Forschung einen Pilotversuch, indem inaktive Behälter mit einem Durchmesser von 115 mm in das kristalline Grundgebirge eingebracht und rückgeholt werden sollen. Der Pilotversuch soll der Demonstration einer Entsorgungsmöglichkeit von Strontium-Kapseln aus der Forschung dienen, weshalb hier auch ein deutlich geringerer Behälter- bzw. Bohrlochdurchmesser benötigt wird. Die Sicherheitsanalysen für Transport, Konstruktion, Operation, Verschluss und Langzeitsicherheit werden derzeit erarbeitet. Diskutiert werden auch verschiedene Verfüllmaterialien für das Bohrloch in- oder Feststoffform.

Eine mögliche Bergung ist in keinem der bekannten internationalen Vorhaben zur tiefen Bohrlochlagerung vorgesehen.

Tiefe Bohrungen werden vor allem in der Erdöl- und der Erdgasindustrie eingesetzt. Die hierbei entwickelten Technologien und Verfahren können auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angewendet werden. Dafür sind allerdings teils erhebliche Anpassungen und Weiterentwicklungen erforderlich.

Stand der Technik für Bohrungen in großer Tiefe sind Spülbohrverfahren. Ein trockener Ausbau tiefer Bohrlöcher kann für die erforderlichen Tiefen nicht vorausgesetzt werden. Tiefe und Durchmesser sind dabei entscheidende, miteinander in Beziehung stehende Größen. Im Normalfall wird eine Bohrung mit einem größeren Durchmesser begonnen, der mit steigender Tiefe schrittweise verringert wird. Bei typischen Tiefbohrungen der Erdöl- / Erdgasindustrie werden heute in aller Regel Bohrungen im End-Durchmesser von 311,1 mm (12 ¼ ") niedergebracht. Als heute mit Standardbohrverfahren bis in 5.000 m Tiefe maximal realisierbar gilt ein nutzbarer End-Durchmesser von 450 mm. Bei einer Tiefe von 2.000 m ist ein Durchmesser von 650 mm technisch erreichbar. Größere Durchmesser wurden in der Vergangenheit nur in wissenschaftlichen und militärischen Bohrvorhaben realisiert.

Für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in mehrere tausend Meter tiefe Bohrlöcher werden größere End-Durchmesser (bis 900 mm, s.o.) benötigt, so dass hier eine erhebliche Weiterentwicklung der Geräte- und Bohrtechnik erforderlich ist. Zudem ist für die Einlagerung ein höherer Anspruch an die vertikale Ausrichtung der Bohrung zu stellen als bei herkömmlichen industriellen Bohrungen.

Die Bohrlochverfüllung mittels Fluid ist neben dem Spülbohrverfahren selbst auch für die Offenhaltung und Stabilisierung des stehenden Bohrlochs erforderlich. Die Eigenschaften des Fluids sind dabei auf das Umgebungsgestein abzustimmen (Lösungsverhalten, hohe Dichte). Es sind eine ganze Reihe an erprobten Bohrfluiden verfügbar, es muss aber jeweils eine standortspezifische Fluidzusammensetzung entwickelt werden. Da die Stabilisierungsaufgabe auch während und nach der Einlagerung der Abfallgebinde besteht, würde das eingesetzte Fluid im Bohrloch verbleiben, so dass die Abfallbehälter in das Fluid abgesenkt werden und in der Einlagerungstiefe von Fluid umgeben ist. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der Wechselwirkungen zwischen Fluid, Verrohrung und Abfallgebinde und die hieran geknüpften

1 zentralen Fragen der Endlagersicherheit, beispielsweise im Hinblick auf Korrosion und Gasbil-
2 dung.
3 Die Verrohrung stabilisiert das Bohrloch und kann im Hinblick auf die Einlagerungstiefe den
4 Gebirgsdruck mit aufnehmen. Im Hinblick auf die Rückholbarkeit ist eine langfristig drucksi-
5 chere Verrohrung unabdingbar, die zudem unter Einlagerungsbedingungen korrosionsfest sein
6 muss. Erfahrungen zur Langzeitbeständigkeit von Verrohrungsmaterialien liegen nicht vor.
7 Auch hier besteht entsprechender erheblicher Entwicklungsbedarf.
8 Abfallbehälter für die tiefe Bohrlochlagerung wären ebenfalls noch zu entwickeln. Maßgebli-
9 che Randbedingungen für die Behältergröße sind dabei einerseits die Bohrlochgeometrie und
10 andererseits die Größe des einzulagernden Abfalls. Für die Auswahl des Behältermaterials sind
11 Temperatur- und Druckverhältnisse im Bohrloch sowie die chemischen Eigenschaften des Flu-
12 ids maßgeblich. Austenitische Stähle werden als prinzipiell geeignet eingestuft. Die erforderli-
13 che Behälterstabilität und damit seine Wandstärke wird auch durch die Auflast der übereinander
14 gestapelten Behälter bestimmt.
15 Die Abfallbehälter können aufgrund der begrenzten Wanddicken nicht selbstabschirmend sein.
16 Entsprechend muss die Einlagerung unter Strahlenschutzbedingungen erfolgen. Kalte Realver-
17 suche zur Einlagerung in ein Bohrloch mittels Transferbehälter wurden bereits erfolgreich
18 durchgeführt. Verschiedene Verfahren zum automatisierten Einlagerungsbetrieb sind zudem
19 Stand der Technik. Ein weiterer spezifischer Entwicklungsbedarf wird hier nicht gesehen. Vo-
20 raussetzung ist aber ein vertikaler Bohrlochverlauf mit möglichst geringen Abweichungen der
21 Ausrichtung.
22 Als Materialien für Bohrlochverschlüsse haben sich Salz, Ton und Bitumen/Asphalt als lang-
23 zeistabil z.B. bei Erdgas/Erdöllagerstätten erwiesen. Der redundante und diversitäre Einsatz
24 derartiger Materialien über eine Bohrlochverschlussstrecke von über 1000 m wird als technisch
25 machbar eingestuft.
26
27 5.4.3.3 Betriebs- und Langzeitsicherheit
28
29 Mit dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich die Betriebs- und Lang-
30 zeitsicherheit einer tiefen Bohrlochlagerung noch nicht bewerten. Es lässt sich auch nicht ein-
31 schätzen, ob eine derartige Lagerung langzeitsicher prinzipiell überhaupt realisiert werden
32 kann. Einige sicherheitsrelevante Themen lassen sich aber identifizieren.
33 Aufgrund der großen Tiefe der Bohrungen ist es dabei grundsätzlich eine Herausforderung,
34 einen Sicherheitsnachweis zu erbringen, der nicht nur für die Betriebsphase und das Nahfeld
35 der Bohrung, sondern auch für ein größeres Raumvolumen im Sinne eines einschlusswirksamen
36 Gebirgsbereichs bei einer Langzeitsicherheitsbetrachtung gilt. Durch die Kombination von
37 kristallinem Grundgebirge in großer Tiefe, überlagernden geologischen Barrieren und den er-
38 forderlichen Gasfallen ergäbe sich hier jedenfalls eine sehr komplexe Konfiguration.
39 Neu zu entwickeln ist auch das Spektrum einzubeziehender Störfälle während der Betriebs-
40 phase. Die frühzeitige Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfallinventar in den ersten 100
41 Jahren ist als relevantes Risiko zu bewerten. Eine Freisetzung kann erfolgen aufgrund einer
42 Behälterbeschädigung bei der Einlagerung, durch Korrosionsvorgänge im Zusammenhang mit
43 dem Bohrlochbetriebsfluid oder aufgrund geologischer Vorgänge, die die Bohrloch- und die
44 Behälterstabilität beeinträchtigen. In der Folge ist mit einer erheblichen Freisetzung von Radi-
45 onukliden in das Bohrlochfluid zu rechnen, was insbesondere Konsequenzen für die Rückhol-
46 barkeit hat. Für das offene Bohrloch wäre zudem zu bewerten, ob die Gasbildung aus Korrosion
47 im Bohrlochfluid frühzeitig zu einer aufwärts gerichteten Fluidbewegung und damit Ausbrei-
48 tung von Radionukliden führen könnte.
49 Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines verschlossenen Einlagerungsbohrlochs wären die zu-
50 grunde zu legenden wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, bzw. die

Gelöscht: Ein

Gelöscht: ist

hierbei für die Bohrlochlagerung spezifischen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse⁵ ebenfalls neu zu entwickeln. Dabei wird es als wahrscheinlich angesehen⁶, dass in Folge des Kontakts von Behältermaterial und Fluid eine relevante Korrosion bereits nach wenigen Jahrzehnten einsetzt. Im verschlossenen Bohrloch ist als Konsequenz die Bildung erheblicher Wasserstoffgasmengen zu erwarten. Die Auswirkungen der Gasmigration und des resultierenden Gasdrucks auf das Verschlusssystem sind für tiefe Bohrlöcher nicht untersucht. Für die Sicherheitsanalyse müssten Wissenslücken zum geochemischen Milieu im tiefen Bohrloch, beeinflusst durch Behälter- und Verrohrungsmaterialien, Bohrlochfluid, Gestein und ggf. Abfallinventar geschlossen werden. Auch die langfristige Einhaltung der Unterkritikalität in einem tiefen Bohrloch mit zahlreichen, vertikal übereinander eingebrachten Behältern mit abgebranntem Kernbrennstoff kann aufgrund dieser Wissenslücken derzeit nicht bewertet werden⁷.

5.4.3.4 Rückholung und Bergung

Die Anforderungen an Rückholung und Bergung müssten zunächst für die tiefe Bohrlochlagerung spezifiziert werden. Nach sinngemäßer Übertragung der BMU Sicherheitsanforderungen von 2010 wird die Rückholung im Sinne der Umkehrbarkeit der Einlagerung eines Abfallbehälters bis zum Zeitpunkt des Verschlusses eines Bohrlochs, unter Einsatz vorhandener Verfahren, als machbar eingestuft. Der Einlagerungszeitraum in ein Bohrloch, und damit die mehr oder weniger unmittelbare Zugänglichkeit der Abfallgebinde, umfasst allerdings nur etwa 3 bis 5 Jahre und ist damit nicht vergleichbar zum Rückholungszeitraum aus einem Endlagerbergwerk. In K-Mat 52⁸ wird hierzu dargestellt, dass aufgrund von Erfahrungen aus der konventionellen Bohrtechnik der Betrieb von Bohrlöchern über 100 Jahre grundsätzlich möglich ist. Über diesen Zeitraum könnte demnach prinzipiell auch eine Rückholung aus einem offen gehaltenen Bohrloch erfolgen.

Die gemäß BMU Sicherheitsanforderung von 2010 über 500 Jahre mögliche Bergung von Behältern wird in K-Mat 52 mit heutigen Kenntnissen als nicht machbar eingestuft. Nach Verschluss des Bohrlochs könnte der eingelagerte Abfall zwar prinzipiell durch Überbohren wieder erreicht und ggf. auch geborgen werden. Letztlich ist aber keine Aussage darüber möglich, ob Behälter und Bohrlochausbau in der Einlagerungstiefe über den geforderten Zeitraum von 500 Jahren ausreichend intakt und lokalisierbar bleiben⁹.

5.4.3.5 Fazit

Die Kommission sieht die Technologie einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als derzeit bei weitem nicht so ausgereift an wie die Endlagerung in einem Bergwerk. Generell weist die Technik einige von der Kommission als relevant eingestufte Probleme auf, die zumindest intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfordern und für die die Aussichten auf Machbarkeit unklar sind. Zu nennen ist hier vor allem die Einlagerung der Abfallbehälter in ein Bohrlochbetriebsfluid mit den Konsequenzen der Behälter- und Verrohrungskorrosion und einer relevanten Gasbildung. Zudem besteht noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Bohrtechnologie für die in der Einlagerungstiefe erforderlichen, derzeit nicht verfügbaren Bohrdurchmesser. Außerdem müsste auf das Konzept der Bergbarkeit verzichtet werden, da es nach derzeitigem Wissenstand als nicht machbar eingestuft wird.

Die Kommission geht davon aus, dass eine Fortentwicklung der Technologie möglich ist, die zu einer anderen Bewertung tiefer Bohrlöcher führen könnte. Tiefe Bohrlöcher können aber erst dann als Entsorgungsalternative in Betracht gezogen werden, wenn die Technik ausgereift

⁵ engl.: FEP: Features, Events, Processes

⁶ Vgl. K-Mat 52, Kapitel 10.2

⁷ Vgl. K-Mat 52, Kapitel 10.3

⁸ Vgl. K-Mat 52, Kapitel 9

⁹ Vgl. K-Mat 52, S. 217

1 und unter Sicherheitsaspekten mindestens ebenso erfolgversprechend ist wie die Endlagerung
2 in einem Bergwerk. Ob eine derartig günstige Situation erreichbar ist, kann nach derzeitigem
3 Wissensstand weder erwartet noch ausgeschlossen werden.
4 Die Kommission empfiehlt, die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik, die
5 derzeit vor allen Dingen in den USA erfolgt, weiter zu beobachten und den erreichten Stand
6 regelmäßig festzustellen, z.B. im Rahmen einer Berichterstattung durch den Vorhabenträger an
7 die Regulierungsbehörde und den deutschen Bundestag. Aufgrund der grundsätzlichen Unsi-
8 cherheit, ob durch intensive Forschung und Entwicklung der Pfad der tiefen Bohrlöcher über-
9 haupt als eine Option für die sichere Endlagerung erwiesen werden kann, darf die Standortsuche
10 für ein Endlager in einem Bergwerk hierdurch aber nicht eingeschränkt werden.
11
12 Verwendete Literatur

13 Bracke, Guido, et al., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Tiefe
14 Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52
15 BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver
16 Abfälle, Stand 30. September 2010