

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-Drs. 198

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 5.4.3 (Endlagerung in tiefen Bohrlöchern)

Vorlage der AG 3 für die 24./25. Sitzung der Kommission am 4./5. April 2016

ERSTE LESUNG
BEARBEITUNGSSTAND: 30.03.2016

Diese Version ist die Weiterentwicklung der K-Drs. /AG3-111, die in der AG 3 am 23. März 2016 beraten wurde. Die Vorsitzenden der AG 3 haben die in der Sitzung besprochenen Änderungen umgesetzt. Mit diesen Änderungen wird das Kapitel der Kommission zur Beratung vorgelegt.

1 5.4.3 Endlagerung in tiefen Bohrlöchern

2
3 Die Kommission hat die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als mögliche Alternative zur End-
4 lagerung in einem Bergwerk identifiziert, die einer näheren Befassung bedarf, und hat sich
5 anhand eines Gutachtens über den derzeitigen Sachstand informiert¹.

6 Die Lagerung hochradioaktiver Abfälle in bis zu 5.000 m tiefen Bohrlöchern ist eine Form der
7 geologischen Tiefenlagerung, die aufgrund der Tiefe und der überlagernden Gesteinsschich-
8 ten als sicherer Einschluss hoch radioaktiver Abfälle prinzipiell vorstellbar ist.

9 In Deutschland wurde sie bisher nicht näher als Entsorgungsalternative betrachtet. Internatio-
10 nal stellen beispielsweise die USA und Schweden Überlegungen zu derartigen Konzepten an.
11 Vertiefte Untersuchungen oder Demonstrationsvorhaben erfolgten bisher nicht.

12 13 5.4.3.1 Technisches und sicherheitliches Konzept

14
15 Die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern soll eine weiträumige Isolation der Abfälle von der
16 Biosphäre ermöglichen, sowie die Möglichkeit bieten, mehrere (redundante) unterschiedliche
17 (diversitäre) geologische Barrieren für die Sicherheit des Endlagers nutzen zu können. Die
18 Schädigung des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist bei Bohrun-
19 gen grundsätzlich geringer als bei Bergwerken, außerdem können die langen Verschlussstrec-
20 ken der Bohrungen mit ebenfalls redundanten und diversitären Versiegelungen ausgestattet
21 werden. Nicht zuletzt wird die große Einlagerungstiefe als Merkmal einer erhöhten Prolifera-
22 tionssicherheit gesehen².

23 Der Anspruch an die tiefe Bohrlochlagerung als Form der Endlagerung hoch radioaktiver Ab-
24 fälle muss nach heutigem Maßstab sinngemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU von
25 2010³ entsprechen, d.h. sie muss dauerhaft und langfristig nachsorgefrei einen sicheren Ein-
26 schluss für eine Million Jahre, i. W. durch die geologischen Barrieren, gewährleisten. Dabei
27 sollen Rückholung während des Betriebs und Bergung in einem Zeitraum von 500 Jahren
28 nach Verschluss möglich sein. Hinsichtlich dieser Anforderungen wurde in dem beauftragten
29 Gutachten ein Grundkonzept für tiefe Bohrlöcher entwickelt, anhand dessen der Stand der
30 Technik und die mit dem Konzept verbundenen Sicherheitsaspekte diskutiert wurden.

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

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

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

1 Die Bohrung bedarf einer vollständigen Verrohrung. Im Einlagerungsbereich wird das Bohr-
2 loch mit Verrohrung und zusätzlicher Zementierung des Ringraums ausgebaut. Im Bereich
3 der Barrieren aus Salzgestein und Tonschichten müsste die Verrohrung beim Verschluss des
4 Bohrlochs rückgebaut werden, um Konvergenz und Selbstheilung der geologischen Barrieren
5 nicht zu beeinträchtigen. Das Bohrloch wird für die Einlagerung mit einem Bohrlochbetriebs-
6 fluid gefüllt, das der Bohrlochstabilität dient und die Rückholbarkeit gewährleistet. Abdich-
7 tende Funktion beim Bohrlochverschluss haben Verfüllungen aus Salzgrus, Bentonit und As-
8 phalt/Bitumenschichten oberhalb der eingelagerten Abfälle.

9 10 5.4.3.2 Stand der Technik und Entwicklungsbedarf

11
12 Untersuchungen zu tiefen Bohrlöchern als Entsorgungsoption werden derzeit hauptsächlich in
13 den USA vorangetrieben. So plant das Department of Energy (DOE) neben geowissenschaft-
14 licher Forschung einen Pilotversuch, indem inaktive Behälter mit einem Durchmesser von
15 115 mm in das kristalline Grundgebirge eingebracht und rückgeholt werden sollen. Der Pilot-
16 versuch soll der Demonstration einer Entsorgungsmöglichkeit von Strontium-Kapseln aus der
17 Forschung dienen, weshalb hier auch ein deutlich geringerer Behälter- bzw. Bohrlochdurch-
18 messer benötigt wird. Die Sicherheitsanalysen für Transport, Konstruktion, Operation, Ver-
19 schluss und Langzeitsicherheit werden derzeit erarbeitet. Diskutiert werden auch verschiedene
20 Verfüllmaterialien für das Bohrloch in- Flüssigkeits- oder Feststoffform.

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

23 Tiefe Bohrungen werden vor allem in der Erdöl- und der Erdgasindustrie eingesetzt. Die hier-
24 bei entwickelten Technologien und Verfahren können auch bei einer Endlagerung in tiefen
25 Bohrlöchern angewendet werden. Dafür sind allerdings Anpassungen und Weiterentwicklun-
26 gen erforderlich.

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

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

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

1 knüpften zentralen Fragen der Endlagersicherheit, beispielsweise im Hinblick auf Korrosion
2 und Gasbildung.
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 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
11 sind Temperatur- und Druckverhältnisse im Bohrloch sowie die chemischen Eigenschaften
12 des Fluids maßgeblich. Austenitische Stähle werden als prinzipiell geeignet eingestuft. Die
13 erforderliche Behälterstabilität und damit seine Wandstärke wird auch durch die Auflast der
14 übereinander gestapelten Behälter bestimmt.
15 Die Abfallbehälter können aufgrund der begrenzten Wanddicken nicht selbstabschirmend
16 sein. Entsprechend muss die Einlagerung unter Strahlenschutzbedingungen erfolgen. Kalte
17 Realversuche zur Einlagerung in ein Bohrloch mittels Transferbehälter wurden bereits erfolg-
18 reich durchgeführt. Verschiedene Verfahren zum automatisierten Einlagerungsbetrieb sind
19 zudem Stand der Technik. Ein weiterer spezifischer Entwicklungsbedarf wird hier nicht gese-
20 hen. Voraussetzung ist aber ein vertikaler Bohrlochverlauf mit möglichst geringen Abwei-
21 chungen der Ausrichtung.
22 Als Materialien für Bohrlochverschlüsse haben sich Salz, Ton und Bitumen/Asphalt als lang-
23 zeitstabil z.B. bei Erdgas/Erdöllagerstätten erwiesen. Der redundante und diversitäre Einsatz
24 derartiger Materialien über eine Bohrlochverschlussstrecke von über 1000 m wird als tech-
25 nisch 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 einschlusswirksa-
36 men Gebirgsbereichs bei einer Langzeitsicherheitsbetrachtung gilt. Durch die Kombination
37 von kristallinem Grundgebirge in großer Tiefe, überlagernden geologischen Barrieren und den
38 erforderlichen 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
41 100 Jahren ist als relevantes Risiko zu bewerten. Eine Freisetzung kann erfolgen aufgrund
42 einer Behälterbeschädigung bei der Einlagerung, durch Korrosionsvorgänge im Zusammen-
43 hang mit dem Bohrlochbetriebsfluid oder aufgrund geologischer Vorgänge, die die Bohrloch-
44 und die Behälterstabilität beeinträchtigen. In der Folge ist mit einer erheblichen Freisetzung
45 von Radionukliden in das Bohrlochfluid zu rechnen, was insbesondere Konsequenzen für die
46 Rückholbarkeit hat. Für das offene Bohrloch wäre zudem zu bewerten, ob die Gasbildung aus
47 Korrosion im Bohrlochfluid frühzeitig zu einer aufwärts gerichteten Fluidbewegung und da-
48 mit zur Ausbreitung von Radionukliden führen könnte.
49 Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines verschlossenen Einlagerungsbohrlochs wären die
50 zugrunde zu legenden wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, bzw.

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

14 5.4.3.4 Rückholung und Bergung

16 Die Anforderungen an Rückholung und Bergung müssten zunächst für die tiefe Bohrlochlage-
17 rung spezifiziert werden. Nach sinngemäßer Übertragung der BMU Sicherheitsanforderungen
18 von 2010 wird die Rückholung im Sinne der Umkehrbarkeit der Einlagerung eines Abfallbe-
19 hälters bis zum Zeitpunkt des Verschlusses eines Bohrlochs, unter Einsatz vorhandener Ver-
20 fahren, als machbar eingestuft. Der Einlagerungszeitraum in ein Bohrloch, und damit die
21 mehr oder weniger unmittelbare Zugänglichkeit der Abfallgebinde, umfasst allerdings nur
22 etwa 3 bis 5 Jahre und ist damit nicht vergleichbar zum Rückholungszeitraum aus einem End-
23 lagerbergwerk. In K-Mat 52⁸ wird hierzu dargestellt, dass aufgrund von Erfahrungen aus der
24 konventionellen Bohrtechnik der Betrieb von Bohrlöchern über 100 Jahre grundsätzlich mög-
25 lich ist. Über diesen Zeitraum könnte demnach auch eine Rückholung aus einem offen gehal-
26 tenen Bohrloch erfolgen.

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

34 5.4.3.5 Fazit

36 Eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern könnte prinzipiell eine weiträumige Isolation der Ab-
37 fälle von der Biosphäre unter Nutzung redundanter und diversitärer geologischer Barrieren
38 und langer technischer Verschlussstrecken ermöglichen. Nicht zuletzt wird die große Einlage-
39 rungstiefe als Merkmal einer erhöhten Proliferationssicherheit gesehen.

40 Die Kommission sieht die Technologie einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern allerdings als
41 derzeit nicht so ausgereift an wie die Endlagerung in einem Bergwerk. Generell weist die
42 Technik einige von der Kommission als relevant eingestufte Probleme auf, die intensive For-
43 schungs- und Entwicklungsarbeiten erfordern, und für die die Aussichten auf Machbarkeit
44 unklar sind. Zu nennen ist hier vor allem die Einlagerung der Abfallbehälter in ein Bohrloch-
45 betriebsfluid mit den Konsequenzen der Behälter- und Verrohrungskorrosion und einer rele-
46 vanten Gasbildung. Zudem besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Bohrtechnologie für
47 die in der Einlagerungstiefe erforderlichen, derzeit nicht verfügbaren Bohrdurchmesser (bis-

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 her nur 430 mm) und ein erheblicher Entwicklungsbedarf für die für diese Form der Endlage-
2 rung erforderlichen Abfallbehälter. Ein denkbarer Bohrl Lochdurchmesser von 900 mm würde
3 immer noch nur Behälter erlauben, die vergleichsweise sehr wenig radioaktives Material auf-
4 nehmen würden; damit würde eine sehr hohe Zahl von Behältern erforderlich.
5 Außerdem müsste auf das Konzept der Bergbarkeit verzichtet werden, da sie nach derzeitigem
6 Wissenstand als nicht machbar eingestuft wird.
7 Die Kommission geht davon aus, dass eine Fortentwicklung der Technologie möglich ist, die
8 dann zu einer anderen Bewertung tiefer Bohrlöcher führen könnte. Tiefe Bohrlöcher können
9 aber erst dann als Entsorgungsalternative in Betracht gezogen werden, wenn die Technik aus-
10 gereift und mindestens ebenso erfolgversprechend ist wie die Endlagerung in einem Berg-
11 werk. Die Kommission sieht bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern insbesondere keinen
12 zeitlichen Vorteil gegenüber der bevorzugten Bergwerkslösung
13 Die Kommission empfiehlt, die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik, die
14 derzeit vor allen Dingen in den USA erfolgt, weiter zu beobachten und den erreichten Stand
15 regelmäßig festzustellen, z.B. im Rahmen einer Berichterstattung durch den Vorhabenträger
16 an die Regulierungsbehörde und den deutschen Bundestag. Außerdem erachtet es die Kom-
17 mission als sinnvoll, auch auf deutscher Seite Forschungsvorhaben zu offenen Fragen wie der
18 spezifischen Behältertechnologie und der an die Bohrlöchlagerung zu stellenden Sicherheits-
19 anforderungen angemessen zu fördern. Aufgrund der grundsätzlichen Unsicherheit, ob durch
20 intensive Forschung und Entwicklung der Pfad der tiefen Bohrlöcher überhaupt als eine Opti-
21 on für die sichere Endlagerung erwiesen werden kann, darf die Standortsuche für ein Endlager
22 in einem Bergwerk hierdurch aber nicht eingeschränkt werden.

23

24 Verwendete Literatur

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