

Sicherheitstechnische Aspekte konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennelementen mittels Kokillen in Bohrlöchern anhand eines Vergleiches mit dem Konzept „Streckenlagerung von dickwandigen Behältern“

31.03.2005 (380. RSK-Sitzung)

1 Einleitung

Als Referenzkonzept für die Endlagerung ist in Deutschland die Einlagerung von bestrahlten Brennelementen – unzerlegt oder in Brennstäbe vereinzelt – und von verglasten hochradioaktiven Abfällen in dickwandigen metallischen Behältern, sog. POLLUX-Behältern, in Strecken in einem Salzstock entwickelt worden. Für die HAWC-Glas-Kokillen wurde im Rahmen des Referenzkonzeptes auch die Einlagerung von Kokillen in Bohrlöchern entwickelt. Dieses Referenzkonzept für die Wirtsgesteinssalze wurde Mitte der 80er Jahre als technisch und sicherheitsmäßig realisierbar bewertet. Die RSK hat sich in ihrer Empfehlung vom 24.05.1989 (244. RSK-Sitzung) zur Pilotkonditionierungsanlage Gorleben (PKA) u. a. auch mit dem Pollux-Behältersystem befasst, das eine Weiterentwicklung der in den Jahren 1980 – 1984 im Rahmen des Projektes „Andere Entsorgungstechniken“ durchgeführten Endlagerbehälterentwicklung darstellt. Dabei wurden auch Kokillen zur Endlagerung von LWR-Brennstäben in Bohrlöchern betrachtet. Die RSK gelangte bezüglich dieses Einzelaspektes zu der zusammenfassenden Aussage, dass hinsichtlich des Einsatzes keine Gesichtspunkte erkennbar seien, die gegen die Endlagerfähigkeit von Brennstoff-Kokillen sprechen. Insgesamt ging die RSK davon aus, dass die Verpackung von Brennelementen in Pollux-Behältern und in Kokillen durch Festlegung von Mindestabklingzeiten oder Zwischenlagerzeiten so flexibel erfolgen könne, dass zukünftige Aspekte aus der Planung eines Endlagers, z. B. Wärmeabfuhr, Abschirmung etc., berücksichtigt werden könnten. Seither wurde an der Entwicklung von Endlagerungskonzepten nicht weiter gearbeitet.

Aktuelle Überlegungen zur Endlagerung befassen sich mit der Bohrlochlagerung von bestrahlten Brennelementen in Kokillen. Die Gesellschaft für Nuklear-Service (GNS) hat in der 29. Sitzung des RSK-Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG am 16.07.2003 das derzeit von ihr entwickelte Konzept einer Bohrlochlagerung von abgebrannten Brennstäben dargelegt. Es weist folgende Merkmale auf:

- Ausgehend von den Kokillen für verglasten hochradioaktiven Abfall sollen auch für die Endlagerung von bestrahlten Brennstäben Kokillen (BSK-3) gleichen Durchmessers, jedoch größerer Länge, verwendet werden.
- Dazu sollen die bestrahlten Brennelemente in Brennstäbe vereinzelt werden; die Strukturteile sowie Kopf- und Fußteile der Brennelemente könnten als technologische Abfälle ggf. ebenfalls in Kokillen endgelagert werden. Diese Kokillen entsprächen dann in etwa den sogenannten CSD-C-Kokillen für kompaktierte Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente in La Hague.
- Da alle Kokillen den gleichen Durchmesser aufweisen, wird sodann eine gemeinsame Einlagerung dieser Kokillen in Bohrlöchern möglich. Da Kokillen mit kompaktierten Abfällen eine im Vergleich zu Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Abfällen oder Brennstäben deutlich geringere

Wärmeleistung haben, kann bei gemeinsamer Lagerung die Wärmeentwicklung in Bohrlöchern entsprechend eingestellt werden.

- Das vorgestellte Konzept sieht die Einlagerung der Brennstäbe von jeweils drei Druckwasserreaktor-Brennelementen in einer Edeldstahlkokille vor (sogenannte BSK-3-Kokille). Die Kokille hat einen Außendurchmesser von 43 cm, eine Wandstärke von 45 mm sowie eine Gesamtlänge von 498,5 cm. Verschluss wird die Kokille durch zwei verschweißte Deckel mit zusätzlicher Moderatorplatte (zur besseren Abschirmung der Neutronenstrahlung).
- Da die Abschirmwirkung der Kokille gegenüber dem dickwandigen POLLUX-Behälter gering ist, wird die Kokille untertage in einer Abschirmglocke transportiert und aus dieser in das Bohrloch abgesenkt.
- Für eine Endlagerung in Salzstöcken wird die Länge der vertikalen Bohrlöcher mit 250 - 300 m veranschlagt (bei einer Endlagerung in Salz in flacher Lagerung wäre die Länge der Bohrlöcher deutlich geringer).

Die GNS hat in ihrer Präsentation ausgeführt, dass für sie bei dem vorliegenden Stand des Projektes eine Reihe von sicherheitsrelevanten Fragen offen sind, die für die weitere Bearbeitung geklärt werden müssen. Diese Fragen betreffen die Auslegung der Kokillen bezüglich mechanischer Festigkeit, Korrosion und Handhabung, die Kritikalitätssicherheit, die Abschirmung, bzw. Strahleneinwirkung auf das Wirtsgestein sowie den Wärmeeintrag in den Einlagerungsbereich. Der Ausschuss hat die Präsentation der GNS zur Bohrlochlagerung von bestrahlten Brennelementen in Kokillen hinsichtlich der offenen Fragen sowie der damit verbundenen Sicherheitsaspekte ausführlich diskutiert.

2 Anlass für die Beratung

Aus Sicht der RSK ist die Fortentwicklung von Endlagerkonzepten, welche den Abfällen, den Wirtsgesteinsverhältnissen sowie den Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit bei der Handhabung, im Betrieb und im Nachbetrieb Rechnung tragen, wesentlich im Hinblick auf die Realisierung einer sicheren Endlagerung. Der Weiterentwicklung von Endlagerkonzepten ist aber in den vergangenen Jahren zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. Es fehlt daher eine dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Befassung, nicht nur mit den sicherheitstechnischen Vor- und Nachteilen der Endlagerung von Kokillen und dickwandigen Behältern, sondern auch mit den spezifischen Anforderungen, die mit der Endlagerung in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen verbunden sind. Die RSK hält es für geboten, die Diskussion über die Weiterentwicklung von Endlagerkonzepten unter Berücksichtigung verschiedener Wirtsgesteinsformationen wieder aufzunehmen. Daher sollen die sicherheitsbezogenen Randbedingungen für die Konzepte zur Endlagerung von Kokillen in Bohrlöchern in verschiedenen Wirtsgesteinen zusammengestellt, diskutiert und etwaige Unterschiede zur Endlagerung in massiven metallischen Behältern in Strecken benannt werden. Betrachtet werden soll die Endlagerung von Kokillen mit Brennstäben, verglastem hochradioaktiven Abfall und kompaktiertem Abfall in Bohrlöchern in den Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Granit/Gneis.

3 Beratungsgang

Im Anschluss an die Präsentation der GNS in der 29. Sitzung des RSK-Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG hat der Ausschuss beschlossen, zunächst die Fragestellungen zusammenzustellen, die für die sicherheitsmäßige Einschätzung und die weitere Entwicklung des Projektes Bohrlochlagerung relevant erscheinen. In der 32. Ausschuss-Sitzung am 04.12.2003 wurde das Thema für die weiteren Beratungen, wie in Kapitel 2 dargestellt, präzisiert.

Zur Beratung der Thematik und der Ausarbeitung eines Entwurfs für eine Stellungnahme hat der Ausschuss VER- UND ENTSORGUNG in seiner 32. Sitzung die Ad-hoc-Arbeitsgruppe KOKILLENENDLAGERUNG eingerichtet. Diese Ad-hoc-Arbeitsgruppe hat in vier Sitzungen am 13.02.2004, 12.05.2004, 29.09.2004 und am 17.11.2004 die Thematik beraten und in ihrer 2. Sitzung (am 12.05.2004) Vertreter der Industrie angehört, um die Einzelheiten des Konzeptes der Bohrlochlagerung und den Stand der Entwicklung zu ermitteln. Als Beratungsunterlagen lagen die Präsentationen der GNS vom 16.07.2003 [1], die Vortragsfolien von Herrn Dr. Kunz (GNS) sowie eine Übersicht von Herrn Dr. Krone (DBE) über die verschiedenen Endlagerungskonzepte vor [2]. Der Stellungnahme-Entwurf wurde in der 39. und 40. Sitzung des RSK-Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG am 09.12.2004 bzw. 21.01.2005 beraten und verabschiedet. Die RSK hat die Stellungnahme in ihrer 380. Sitzung am 24.02.2005 verabschiedet.

4 Vorgehensweise

Die Möglichkeit, bestrahlte Brennelemente oder Brennstäbe in Kokillen analog zu den HAW-Glaskokillen endzulagern, ist bereits im Rahmen des Projektes und der Systemstudie „Andere Entsorgungstechniken“ betrachtet worden [3] [4]. Allerdings wurde in dieser Studie zur Vermeidung langer Kokillen zu Grunde gelegt, die Brennstäbe in ca. 88 cm lange Stücke zu schneiden, bzw. jeweils zwei Brennstäbe in einem Einschlussrohr spiralförmig aufzurollen. Demgegenüber sieht das derzeitige Konzept der GNS die Einlagerung von bestrahlten Brennstäben in voller Länge in die fast 5 m lange BSK-3-Kokille vor. Außerdem lag der Schwerpunkt der damaligen Betrachtungen auf den Konditionierungsverfahren; die Fragen der Langzeitsicherheit im Endlager wurden nur zum Teil behandelt. Somit können Ergebnisse aus der Systemstudie nur für einige der zu betrachtenden Sicherheitsaspekte verwendet werden.

Die in Deutschland für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und bestrahlter Brennelemente entwickelte Konzeption gilt für das Wirtsgestein Salz. Von daher gibt es für eine sicherheitsmäßige Einschätzung des Bohrlochkonzeptes, wie es die GNS ebenfalls für Salz entwickelt, eine belastbare Basis im Hinblick auf einen Vergleich mit der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern im Salz. Für die Wirtsgesteine Tonstein und Granit gibt es in Deutschland keine entwickelten Endlagerkonzepte für hochradioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente. Für eine Einschätzung der Bohrlochlagerung in diesen Formationen wurde daher auf Informationen über Projekte und Planungen im Ausland zurückgegriffen. Es liegt auf der Hand, dass angesichts des gegenüber Salz bei anderen Wirtsgesteinen niedrigeren Entwicklungsstandes der Endlagerkonzepte für hochradioaktive Abfälle in Deutschland die sicherheitsmäßige Einschätzung der Bohrlochlagerung in Tonstein oder Granit weniger konkret sein wird.

Die Basis für die Stellungnahme der RSK sind die Endlagerkonzepte in Salz

- als Streckenlagerung von bestrahlten Brennelementen in dickwandigen metallischen, stark abschirmenden Behältern (POLLUX) und

- als Bohrlochlagerung von bestrahlten Brennstäben in dünnwandigen metallischen, schwach abschirmenden Behältern (BSK-3-Kokille).

Dabei wird davon ausgegangen, dass verglaster hochradioaktiver Abfall und verpresste metallische Strukturteile in Kokillen gemeinsam mit bestrahlten Brennelementen endgelagert werden, nicht jedoch zementierte oder organische Stoffe enthaltende schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Für die Wirtsgesteine Tonstein und Granit werden die sicherheitsrelevanten Aspekte entsprechend dem vorliegenden Kenntnisstand nur in ihrer Tendenz abgeschätzt.

Die vorliegende Stellungnahme bezieht sich auf die Sicherheitsaspekte im Endlager untertage. Sicherheitsaspekte bei der Konditionierung der Brennelemente für die Endlagerung, bei der Herstellung der Abfallgebinde und bei übertägigen Verfahrensschritten bleiben entsprechend dem Beratungsergebnis der 32. Sitzung des RSK-Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG außer Betracht.

5 Einschätzung der wesentlichen sicherheitsrelevanten Aspekte der Bohrlochlagerung

Die für die untertägigen Abläufe und die Langzeitsicherheit der Endlagerung von Kokillen insbesondere mit bestrahlten Brennstäben wesentlichen Sicherheitsaspekte können wie folgt gegliedert werden:

- Technische Aspekte der Bohrlochlagerung, insbesondere Herstellung der Bohrlöcher, Einbringung der Kokillen, Stapelbarkeit der Kokillen und Versetzen und Verschluss der Bohrlöcher.
- Mechanische und korrosive Belastungen der Kokillen im Bohrloch.
- Einfluss auf das geochemische Milieu, insbesondere bezüglich Gasbildung bei Korrosion des Behälters, Wirkung der Korrosionsprodukte in Bezug auf die Migration von Radionukliden.
- Wärmeeintrag in das Wirtsgestein.
- Strahleneinwirkung auf das Wirtsgestein.
- Einhaltung der Kritikalitätssicherheit im Endlager.

5.1 Technische Aspekte der Bohrlochlagerung

Herstellung von Bohrlöchern für die Endlagerung von Kokillen

Das Bohren von 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern im Salzgestein ist nach Einschätzung der RSK Stand der Technik. Ein derartiges Bohrlochkonzept wurde bereits 1985 im Rahmen des Projekts „Andere Entsorgungstechniken“ (PAE) für die Endlagerung von HAWC-Kokillen und Kokillen mit Brennstababschnitten in einem Salzgestein untersucht und als realisierbar bewertet. Für die Einlagerung von fast 5 m langen Brennstabkokillen sind die Anforderungen an die Bohrgenauigkeit hoch, können aber erfüllt werden.

Tonformationen weisen im Vergleich zu Salz in Salzstöcken geringere Mächtigkeiten auf. Dem entsprechend können nur horizontale oder vergleichsweise kurze vertikale Bohrlöcher aufgeföhren werden. Die Bohrlöchlkonzepte, die in der Schweiz, Belgien und Frankreich entwickelt werden, sehen horizontale Bohrlöcher mit Innenauskleidung (Betonliner, Metallrohr) vor. In Schweden wird ein Bohrlöchlkonzept (horizontal oder vertikal) für Granit betrachtet.

Transport der Kokillen untertage, Einlagerungstechnik

Im Projekt „Andere Entsorgungstechniken“ wurden technische Verfahren für den Transport und die Einlagerungstechnik der Kokillen in vertikale Bohrlöcher entwickelt. Diese Verfahren können jedoch nicht auf die fast 5 m langen Kokillen für Brennstäbe, wie sie GNS plant, übertragen werden. Die RSK hält zwar eine entsprechende Einlagerungstechnik auch für derartig lange Kokillen für machbar, ein technisches Konzept hierfür müsste entwickelt werden. Auf jeden Fall bedingt die große Länge der Brennstabkokillen, dass ihre vertikale Einlagerung schwieriger ist als die Einlagerung der HAWC-Glaskokillen oder CSD-C-Kokillen und erheblich mehr untertägiger Hohlraum geschaffen werden muss, um eine entsprechende Einlagerungsmaschine mit Abschirmglocke unterzubringen.

Auch die Betrachtungen zur Absenkung der Kokillen in das Bohrlöchl sowie die Analysen der Störfallmöglichkeiten (insbesondere des Absturzes einer Kokille auf andere Kokillen im Bohrlöchl) können aus dem Projekt PAE nicht übertragen werden. So beträgt das Gewicht der Brennstabkokille etwa 5,2 t gegenüber 0,5 t der HAWC-Kokille bzw. 0,8 t der CSD-C-Kokille. Eine entsprechende Analyse der Störfallmöglichkeiten und Störfallfolgen wäre somit noch durchzuführen.

Gemeinsame Einlagerung von HAWC-Kokillen, Brennstabkokillen und Kokillen mit kompaktierten Abfällen

Bei gleichen Durchmessern der Kokillen wird eine gemeinsame Einlagerung der verschiedenen Kokillen in einem Bohrlöchl möglich. Hierzu sind die Deckel- und Bodenteile der Kokillen entsprechend anzupassen und es ist nachzuweisen, dass die Kokillen ohne mechanische Beschädigung in der vorgesehenen Konfiguration übereinander gestapelt werden können.

Verfüllung und Verschluss der Bohrlöcher

Für die Verhältnisse in Salz können der Versatz sowie der Verschluss sowohl bei der Streckenlagerung als auch der Bohrlöchlagerung der erforderlichen Auslegung entsprechend hergestellt werden. Dabei ist ein vertikales Bohrlöchl technisch einfacher und homogener zu verfüllen als eine horizontale Strecke oder ein horizontales Bohrlöchl. Der Bohrlöchlverschluss stellt eine zusätzliche abdichtende Barriere zum Abschluss der Strecke dar. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei allen Verfüll- und Verschlusskonzepten die Verhältnisse der Auflockerungszone im Gebirge für die Rückhaltewirkung letztendlich bestimmend sein können.

Endlagerkonzepte für Tongestein und Granit beruhen auf gegenüber Salz deutlich unterschiedlichen Verhältnissen, was den Stellenwert der Rückhaltefunktion des Behälters, des Versatzes, der technischen Verschlüsse und der geologischen Wirtsformation betrifft. Somit unterscheiden sich die Verfüll- und

Verschlusskonzepte für Tongestein und Granit deutlich von denen für Salz. Ein sicherer Versatz und Verschluss kann auch für horizontale Bohrlöcher im Tongestein und für ein Bohrlochkonzept in Granit geschaffen werden. Allerdings liegt dann insbesondere bei Granit der Schwerpunkt der Rückhaltefunktion auf der Langzeitbeständigkeit des Endlagerbehälters bzw. Versatzes über sehr lange Zeiträume (schwedisches Konzept).

5.2 Mechanische und korrosive Belastungen der Kokillen im Bohrloch

Bei einer Bohrlochlagerung müssen die Kokillen nach Ansicht der RSK derart ausgelegt sein, dass sie während der Betriebszeit des Endlagers und bis zu seinem endgültigen Verschluss dicht bleiben. Dieser Zeitraum wird größenordnungsmäßig 100 Jahre betragen. Auslegungsbasis für das im Projekt „Andere Entsorgungstechniken“ entwickelte Konzept für die Kokille war eine nicht näher begründete Standzeit und ein Korrosionsschutz von 500 Jahren. Für den Langzeitsicherheitsnachweis der sicheren Endlagerung in Salz kommt der Behälterstandzeit in der Größenordnung von einigen hundert Jahren keine entscheidende Bedeutung zu, da die bisher modellmäßig durchgeführten Berechnungen zeigen, dass nur die Radionuklide mit sehr langen Halbwertszeiten dosisbestimmend sind. Bei anderen Wirtsgesteinen insbesondere bei Granit kann der Einfluss der Behälterstandzeit für den Langzeitsicherheitsnachweis und die Auslegung der Kokille hingegen wesentlich sein. Der Einfluss unterschiedlicher Standzeiten auf die Langzeitsicherheit sollte ermittelt werden.

Für die festigkeitsmäßige Auslegung der Kokille wurden bisher Berechnungen für die fast 5 m lange Brennstabkokille mit 45 mm Wandstärke bei isotroper seitlicher Belastung im Bohrloch durchgeführt. Wegen des zu erwartenden ungleichmäßigen Auflaufens des Gebirges bei der im Bohrloch herrschenden Konvergenz müssen jedoch auch anisotrope Belastungen berücksichtigt werden.

Nach der bisherigen Planung der GNS besteht die Wandung der Brennstabkokille BSK-3 aus 45 mm Edelstahl ohne besonderen Korrosionsschutz. Dieses Auslegungskonzept kann wie folgt verglichen werden:

- Kokille mit verglastem HAWC: Wandstärke 5 mm Edelstahl.
- CSD-C-Kokille mit kompaktiertem Abfall: Wandstärke 5 mm Edelstahl.
- Kokille nach PAE-Konzept für Brennstababschnitte in einer verschweißten Innenbüchse: Wandstärke 40 mm, bzw. 44 mm Edelstahl mit einem Korrosionsschutz von 3 mm Hastelloy C4 auf 3 mm Inconel 600.
- Abschirmender Behälter POLLUX für Streckenlagerung: Wandstärke 435 mm Stahl/Grauguss.

Für die Auslegung des Endlagerbehälters gegen Korrosion ist davon auszugehen, dass auch bei Salz als Wirtsgestein der Behälter ab einem gewissen Zeitpunkt nach der Einlagerung in Kontakt mit Flüssigkeit (Lauge) stehen kann. Dies hat seine Ursache in Laugeneinschlüssen im Salzgestein, die mengenmäßig gering sind, durch Temperatureffekte jedoch bis zur Wärmequelle, also zu dem eingelagerten Behälter, wandern können. Bei den Wirtsgesteinen Tongestein und Granit ist ohnehin Wasser präsent, das durch gezielte Maßnahmen, z. B. Ummantelung mit Bentonit, vom eingelagerten Behälter ferngehalten werden muss.

Bei der Wirtsfornation Salz hat der Behälter die Funktion, als Rückhaltebarriere zu wirken, bis durch die Konvergenz des Gebirges ein dichter Einschluss hergestellt ist und das Wirtsgestein als geologische Barriere die Rückhaltefunktion übernimmt. Dieser Verschluss durch das Salzgestein kann wegen der höheren Konvergenzgeschwindigkeit des Gebirges und des geringeren zu schließenden Hohlraumvolumens zwischen Behälter und Bohrlochwandung bei dem Bohrlochkonzept erheblich früher als bei dem Konzept der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern erreicht werden. Im Lichte des gewählten Einlagerungskonzeptes, der Temperatur- und Konvergenzentwicklung, des Versatzes und seiner Verdichtung ist zu prüfen, ob nicht auch ohne spezielle Korrosionsschutzschicht die Rückhaltewirkung der Kokille solange gesichert ist, bis die geologische Formation die Rückhaltung übernimmt.

Bei einer Bohrlochlagerung in anderen Formationen als Salz ist ein spezieller Korrosionsschutz der Kokillen erforderlich.

5.3 Geochemisches Milieu

Im Vergleich zur Streckenlagerung starkwandiger metallischer Behälter vom Typ POLLUX weisen die Brennstabkokillen deutlich kleinere Massen an korrosionsfähigem Eisen auf (Leergewichte: POLLUX-Behälter 56 t, BSK-3-Kokille ca. 2,5 t). Dies gilt auch dann, wenn man die Massen der Behälter ins Verhältnis zu den jeweils endgelagerten Kernbrennstoffmassen setzt (das Verhältnis beträgt beim POLLUX-Behälter ca. 10 und bei der BSK-3-Kokille ca. 1,5). Bei einem unterstellten Laugenzutritt und folgender Korrosion bildet sich bei der Bohrlochlagerung von Kokillen deutlich weniger Wasserstoff; es entstehen jedoch auch weniger Korrosionsprodukte mit hoher Rückhaltewirkung für Radionuklide. Durch die Korrosion von Eisen bildet sich ein für die Immobilisierung der Radionuklide vorteilhaftes reduziertes Milieu. Die deutlich größeren Mengen an Eisen im Fall eines POLLUX-Behälters haben demzufolge auch eine deutlich höhere Pufferwirkung bezüglich der Redoxeigenschaften.

Damit ergeben sich gegenläufige Effekte: Einerseits geringere Gasbildung und geringerer Druckaufbau - andererseits geringere Sorption der aus dem Behälter austretenden Radionuklide an Korrosionsprodukten. Diese Effekte, die auch die Auslegung der Endlagerbehälter beeinflussen, können nur in dem konkreten Endlagerungsprojekt unter Berücksichtigung der Konvergenz des Gebirges, der Art des Backfilling-Materials und der Bedeutung der Rückhaltung einzelner Radionuklide optimiert werden. Diese Einschätzung gilt für alle zu betrachtenden Gesteinsformationen, wobei die Bedeutung der genannten Phänomene in den drei Formationen unterschiedliche Gewichtung haben.

Zur Abschirmung von Neutronen enthält der Pollux-Behälter für die Streckenlagerung Polyethylen in Bohrungen im Behältermantel und als Platte im Behälterdeckel. Die BSK-3-Kokille enthält im Deckelbereich ebenfalls eine entsprechende Abschirmplatte. Es wäre vorteilhaft und im Falle der Bohrlochlagerung von Kokillen wohl auch realisierbar, die Kunststoff-Neutronenabschirmung in die bei der Einlagerung verwendete Abschirmglocke zu integrieren. Dadurch würde eine Gasentwicklung bei der Zersetzung der Kunststoff-Abschirmelemente vermieden.

5.4 Wärmeeintrag

Bei der Wirtsfornation Salz ist der durch die Zerfallswärme der Radionuklide bewirkte Wärmeeintrag für den Einlagerungsbereich bezüglich Konvergenz und auftretende Spannungen sowie für die

Aufstiegsgeschwindigkeit des Salzstockes als Ganzes bedeutsam. Nach derzeitigen Vorstellungen darf sowohl bei der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern als auch bei der Bohrlochlagerung von Kokillen in Salz eine Kontakttemperatur zwischen Behälter und Salz von 200° C nicht überschritten werden. Diese Anforderung muss bei der Auslegung der Behälter berücksichtigt werden.

Aufgrund des unterschiedlichen Inventars an radioaktiven Stoffen sind die Wärmeleistungen der BSK-3-Kokille und des POLLUX-Behälters unterschiedlich. Solange die Einhaltung der oben genannten Kontakttemperatur gewährleistet wird, hat dieser Unterschied keine sicherheitstechnisch wesentlichen Auswirkungen.

Die maximale Salztemperatur und die räumlich-zeitliche Temperaturverteilung im Einlagerungsbereich kann durch das Einlagerungskonzept weitgehend beeinflusst werden. Wesentliche Einflussgrößen sind die Abklingzeit der Kokillen mit HAWC-Glas oder Brennstäben, ihre Anordnung in den Bohrlöchern sowie der Abstand der Bohrlöcher. Hinzu kommt die Möglichkeit, durch die gemeinsame Einlagerung mit kaum wärmeentwickelnden Kokillen die Temperaturen bei der Bohrlochlagerung zu optimieren.

Für die Wirtsgesteine Tonstein und Granit sind niedrigere Kontakttemperaturen einzuhalten (ca. 100° C). Dadurch ergibt sich bei diesen Formationen ein höherer Platzbedarf im Endlager für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle.

5.5 Strahlenwirkung auf das Wirtsgestein

Wegen der deutlich geringeren Wandstärke der Kokillen - sowohl der HAWC-Glaskokille als auch der von GNS geplanten BSK-3-Kokille - ist die Strahlungseinwirkung auf das Wirtsgestein im Nahbereich höher als beim Konzept der Streckenlagerung stark abschirmender metallischer Behälter. Das Phänomen der Strahleneinwirkung ist für das Wirtsgestein Salz insofern relevant, als es zu einer Zersetzung des Salzes mit Bildung von Natrium und Chlor und der Möglichkeit spontaner heftiger Rückreaktionen kommen könnte. Die RSK verweist auf den Entwurf einer RSK-Stellungnahme zu dieser Thematik, der derzeit erarbeitet wird. Im Hinblick auf den Vergleich Bohrlochlagerung/Streckenlagerung sollte quantitativ abgeschätzt werden, welche Unterschiede sich bei der Bohrlochlagerung von HAWC-Glas- und Brennstabkokillen gegenüber der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern ergeben.

Für die Formationen Tonstein und Granit werden die Strahlungseinwirkungen als unwesentlich eingeschätzt.

5.6 Kritikalitätssicherheit

Sowohl bei der Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen als auch bei der Streckenlagerung von Brennelementen in POLLUX-Behältern wird durch Auslegung der Behälter und Anordnung der Brennelemente im Behälter sichergestellt, dass im Falle eines Laugenzutritts bei bestehender Integrität der Brennstäbe, bzw. Brennelemente keine Kritikalität eintritt. Dies gilt für alle betrachteten Wirtsformationen, wobei insbesondere bei Salz der hohe Chloridgehalt der Lauge reaktivitätsvermindernd wirkt.

Im Vergleich der Bohrlochlagerung mit der Streckenlagerung unter dem Aspekt des Integritätsverlusts von Brennstäben stellt sich das Bohrlochkonzept vorteilhafter dar als das POLLUX-Streckenlagerkonzept, da das Inventar aus Kernbrennstoffen in der Kokille geringer ist als in einem POLLUX-Behälter. Das theoretische

Moderator-Brennstoff-Verhältnis in BSK-3-Kokille und POLLUX-Behälter ist annähernd gleich, wenn in beiden Fällen Brennstäbe eingelagert werden; falls in einem Endlagerkonzept die Einlagerung unzerlegter Brennelemente verfolgt wird, wäre das Moderator-Brennstoff-Verhältnis deutlich höher und damit ungünstiger.

Sowohl bei der Endlagerung von Brennstabkokillen als auch von POLLUX-Behältern wird für den Kritikalitätssicherheitsnachweis vom Restspaltstoffgehalt nach Abbrand ausgegangen. Der Nachweis und die messtechnische Kontrolle dieses Restspaltstoffgehaltes können bei einzelnen Brennstäben und unzerlegten Brennelementen unterschiedlichen Aufwand bedeuten.

Für die Wirtformationen Tonstein und Granit ergeben sich sowohl für die Bohrlochlagerung von Kokillen als auch für die Streckenlagerung starkwandiger Behälter bezüglich der Einhaltung der Kritikalitätssicherheit ungünstigere Verhältnisse, da die als Moderator wirkenden Grundwässer deutlich geringere neutronenabsorbierende Salzgehalte aufweisen.

6 Zusammenfassung

Endlagerkonzepte für hochradioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente wurden in Deutschland bisher für die Endlagerung in Salz entwickelt. Dies betrifft die Endlagerung von POLLUX-Behältern mit unzerlegten Brennelementen oder einzelnen Brennstäben in Strecken und die Endlagerung von Kokillen mit HAWC-Glas und mit Brennstäben oder Brennstabstücken sowie von CSD-C-Kokillen in Bohrlöchern. Das diskutierte Konzept der Bohrlochlagerung von BSK-3-Kokillen mit Brennstäben in voller Länge unterscheidet sich von dem im Projekt „Andere Entsorgungstechniken“ untersuchten Kokillenkonzent für Brennstabstücke, bzw. Brennstoffspiralen. Die BSK-3-Kokille ist mit fast 5 m Länge nahezu vier Mal so lang wie die HAWC-Glaskokillen oder die Brennstabkokillen, die im Projekt „Andere Entsorgungstechniken“ betrachtet wurden. Von daher sind viele Ergebnisse dieses Projektes auf die Endlagerung der BSK-3-Kokillen nicht übertragbar.

Im Vergleich zur Streckenlagerung von POLLUX-Behältern ergeben sich für die Bohrlochlagerung von Kokillen Vorteile und Nachteile, deren Bedeutung letztlich erst gegeneinander abgewogen werden kann, wenn Klarheit über die Endlagerformation und ihre wesentlichen Eigenschaften am konkreten Endlagerstandort besteht. Die Beratungen in der RSK haben ergeben, dass nach heutigem Erkenntnisstand keine technischen oder sicherheitsbezogenen Aspekte ersichtlich wurden, die eine Realisierung des Kokillenkonzepths unmöglich erscheinen lassen.

Für die Formationen Tonstein und Granit liegen in Deutschland weder für die Bohrloch- noch für die Streckenlagerung Referenzkonzepte vor. Der Blick auf Konzepte im Ausland zeigt, dass die Bohrlochlagerung in horizontalen oder kurzen vertikalen Bohrlöchern in Tonstein oder Granit realisierbar wäre. Dabei sind jedoch insbesondere für Granit erheblich längere Standzeiten der Endlagerbehälter zu gewährleisten. Dies führt zu anderen Auslegungsbedingungen für die Endlagerbehälter und des diese umgebenden Verfüllmaterials.

Vor dem Hintergrund, dass die bereits in den 80er Jahren entwickelten Einlagerungskonzepte fortentwickelt werden müssen, hält die RSK es für erforderlich, dass das Konzept für die Endlagerung von HAWC-Glas, CSD-C-Kokillen und Brennstäben/Brennelementen weiterentwickelt und insbesondere sicherheitstechnisch optimiert wird.

Quellenangaben

- [1] Dr. W. Hawickhorst (GNS):
Konzept zur Bohrlochlagerung von HAW-, MAW- und BE-Kokillen
Vortrag auf der 29. Sitzung des RSK-Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG
am 16./17. Juli 2003

- [2] Dr. Kunz (GNS), Dr. Krone (DBE)
Vortragsfolien, bzw. tabellarische Übersicht über verschiedene Endlagerkonzepte,
2. Sitzung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe KOKILLENENDLAGERUNG des RSK-
Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG am 12.05.2004

- [3] Projekt Andere Entsorgungstechniken
Abschlußbericht der Projektphase 1, Technischer Teil, AE Nr. 9
August 1982

- [4] Systemstudie Andere Entsorgungstechniken
Konzepte zur BE-Konditionierung und Endlagerung in Gebinden analog zu den
HAW-Glaskokillen
Technischer Anhang 23
November 1984