



Die Biosphärenmodellierung bei der Dosisabschätzung

Einleitung¹

Bei der Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle gibt es zahlreiche zu erfüllende Sicherheitsanforderungen an geeignete Gebiete (Untersuchungsräume), damit das Endlager langfristig keine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt. Eine dieser Sicherheitsanforderungen ist, dass die aus dem Endlager entwichene und in die Biosphäre transportierte Radioaktivität über einen Zeitraum von einer Million Jahre bestimmte Grenzwerte für die effektive Dosis nicht überschreiten darf (§ 7 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung). Zur Abschätzung, welche effektive Dosis einzelne Personen möglicherweise erhalten können, wurde vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung und dem Bundesamt für Strahlenschutz eine Berechnungsgrundlage geschaffen.

Nach dieser gesetzlichen Anforderung sind die Grenzwerte für die effektive Dosis im Bereich von 10 Mikro-Sievert pro Kalenderjahr für die zu erwartenden Entwicklungen und 100 Mikro-Sievert pro Kalenderjahr für die abweichenden Entwicklungen festgelegt. Eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikro-Sievert pro Kalenderjahr ist aus Sicht des Strahlenschutzes vernachlässigbar gering. Dieses Dosiskriterium wird bereits in anderen Anwendungsbereichen im Strahlenschutz umgesetzt. Zum Vergleich: Die durchschnittliche natürliche Strahlenexposition der deutschen Bevölkerung beträgt 2100 Mikro-Sievert im Jahr. Somit liegt die zusätzliche effektive Dosis, die durch ein Endlager für hochradioaktive Stoffe bei zu erwartenden Entwicklungen nicht überschritten werden darf, um mehr als den Faktor 100 unter der durchschnittlichen natürlichen Strahlenexposition.

Der Fokus der Sicherheitsanforderungen liegt primär auf dem Endlagersystem und den technischen und

geologischen Barrieren des Untergrundes. Allerdings genügt es nicht, nur die Menge der aus dem Endlagersystem entwichenen Radionuklide zu betrachten, da die Radionuklide ein unterschiedliches dynamisches Verhalten in der Biosphäre und eine unterschiedliche Radiotoxizität aufweisen. Die möglichen Auswirkungen auf den Menschen werden erst durch die Dosisabschätzung bewertbar.

Überblick über die Biosphärenmodellierung bei der Dosisabschätzung

Die Biosphärenmodellierung beschreibt mithilfe radioökologischer Modelle die Transport- und Anreicherungsprozesse der Radionuklide, die aus dem Endlager in die Biosphäre gelangen. Zunächst werden die radioaktiven Kontaminationen der Umweltmedien (Grund- und Oberflächenwässer, Boden, Atmosphäre) und der Lebens- und Futtermittel auf der Basis von wissenschaftlichen Grundlagen berechnet. Dann wird die effektive Dosis der Bevölkerung aus sinnvollen Festlegungen zu deren Lebensbedingungen und Wirtschaftsweisen berechnet.

Für die Entwicklung der Biosphäre mitsamt Klima, Topographie, Vegetation, Menschen und Tieren sind keine Prognosen über den Zeitraum von einer Million Jahre möglich, weder für die Entwicklung der Landschaft, noch für den Menschen an sich oder seine Lebens- und Wirtschaftsweise. Wegen des langen Bewertungszeitraums bei der Endlagerung sind plausible Annahmen und Festlegungen zu treffen. Dies gilt unter anderem für die Verzehrsmengen der Lebensmittel, die Aufenthaltszeiten und Aufenthaltsorte des Menschen und die Landwirtschaft, wie zum Beispiel die zu berücksichtigenden Nutzpflanzen, die Bewässerung und die Erntezyklen.

¹ Sollten Ihnen Fachausdrücke nicht geläufig sein, so können Sie diese im [Glossar](#) der Informationsplattform zur Endlagersuche nachlesen.

Die berechnete effektive Dosis ist nur ein Indikator für die Tauglichkeit eines potenziellen Endlagerstandorts und nur eines von vielen Kriterien bei der Bewertung der Standorte. Der Begriff Dosisabschätzung wurde bewusst gewählt, da es unmöglich ist, reale effektive Dosen zukünftig lebender Menschen über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre zu berechnen. Vielmehr handelt es sich bei der Dosisabschätzung um eine potenzielle Dosis, die fiktive Personen unter ungünstigen Umständen theoretisch erhalten könnten, wenn die heutigen Lebens- und Wirtschaftsweisen für das jeweilige Klima unterstellt werden.

Letztlich sind standortspezifische Modelle nötig, welche die Kopplung der lokalen geologischen Gegebenheiten, der potenziellen Klimaentwicklungen und der Umwelt abbilden. Für diese standortspezifischen Modelle dient die Biosphärenmodellierung in der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung bei der Endlagerung als Werkzeugkasten. Mit Werkzeugkasten ist gemeint, dass nur die Transportpfade der Radionuklide zu berücksichtigen sind, die in dem jeweiligen Untersuchungsraum tatsächlich vorkommen können. Weist das Grundwasser eines Untersuchungsraums beispielsweise einen Salzgehalt auf, der eine Nutzung zum Trinken, Tränken und Bewässern nicht zulässt, dann entfällt dieser Kontaminationspfad.

Grundsätze der Biosphärenmodellierung

Die Biosphärenmodellierung in diesem Berechnungsverfahren wurde in Anlehnung an die aktuell gültigen Berechnungsgrundlagen im Strahlenschutz verfasst. Dieses Vorgehen ist deswegen sinnvoll, da die Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung bei der Endlagerung konsistent mit den aktuellen und etablierten Berechnungsverfahren im Strahlenschutz sein soll. Die Modellstrukturen und Modellannahmen wurden für die Biosphärenmodellierung vereinfachend und konservativ gewählt. Der Leitgedanke dabei war, die Exposition des Menschen so realistisch wie mit vertretbarem Aufwand möglich zu berechnen, die Exposition aber keinesfalls zu unterschätzen.

Für die Biosphärenmodellierung in der Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der

Endlagerung gelten außerdem bestimmte Grundsätze, die allgemein für sämtliche zu modellierenden Prozesse in der oberflächennahen Umwelt bis hin zur Dosisabschätzung anzuwenden sind:

So müssen alle Radionuklide, die aus dem Endlager in die Biosphäre gelangen können, berücksichtigt werden. Einzelne Radionuklide dürfen erst dann außer Acht gelassen werden, wenn nachgewiesen wurde, dass ihr Dosisbeitrag vernachlässigbar ist. Es sind auch kurzlebige Tochternuklide zu betrachten, sofern sie von langlebigen Mutternukliden nachgebildet werden.

Außerdem gilt, dass die Annahmen für die Berechnung der effektiven Dosis nach heutigen Maßstäben so realistisch wie mit vertretbarem Aufwand möglich sein sollen. Zu einer realitätsnahen Modellierung für die Dosisabschätzung gehört auch, dass ortsspezifische Daten des Untersuchungsraumes für bestimmte Zeiträume der Modellierung genutzt werden, wenn die Gültigkeit der Daten für den vorgesehenen Zeitraum plausibel begründet werden kann.

Klimaentwicklung

Das Klima eines Standortes ist gemäß Definition die charakteristische Häufigkeitsverteilung atmosphärischer Zustände und Vorgänge bezogen auf einen langjährigen Bezugszeitraum von meistens 30 Jahren. Bei den Klimaszenarien, die für einen Standort zu betrachten sind, ist in der Berechnungsgrundlage vorgegeben, dass diese „abdeckend“ sein müssen. Es sind demnach alle Klimaszenarien zu rechnen, die am Standort innerhalb der nächsten einen Million Jahre tatsächlich vorkommen können. Hier hilft ein Blick in die Klimageschichte der Region des potenziellen Endlagerstandortes. Die alleinige Betrachtung zeitlich konstanter klimatischer Zustände ohne Übergangsphasen genügt jedoch nicht. Die Klimageschichte der Erde zeigt, dass ein Übergang von einem Klima in das nächste an teilweise sehr lange Übergangsphasen gekoppelt ist. In diesen Übergangsphasen kann es zu einer deutlich erhöhten Mobilität der Radionuklide kommen. Beispiele für diese Übergangsphasen sind das Tauen von Permafrostböden oder das Schmelzen von Gletschern.

Die angenommenen klimatischen Entwicklungen eines Untersuchungsraums sind in die nach § 3 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung genannten „zu erwartenden“ und „abweichenden“ Entwicklungen einzuordnen. Die Übereinstimmung der klimatischen Situation für die Geosphäre und Biosphäre muss in jedem Fall und zu jedem Zeitpunkt gegeben sein. Es dürfen niemals unterschiedliche Klimaentwicklungen für beide Sphären angenommen werden.

Ausbreitung von Radionukliden und Umweltkontamination

Die Geosphärenmodellierung liefert die Eingangsdaten für die Biosphärenmodellierung. Dies sind die Fließrate des radioaktiv kontaminierten Grundwassers und die Konzentration gelöster Radionuklide im Grundwasser, die Eintragsrate gasförmiger Radionuklide und die chemische Zusammensetzung des Grundwassers, insbesondere die Konzentration der gelösten Salze.

Bevorzugt sollen Messwerte aus dem Untersuchungsraum und hydrogeologische Modelle zur Abschätzung der Entwicklung von Grundwasserfluss und Grundwasserzusammensetzung verwendet werden. Es sind sowohl Grundwasser als auch Oberflächenwasser als Trinkwasser für die Bevölkerung, zum Tränken des Viehs und zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen zu betrachten.

Auch für die Grundwassernutzung sind nach heutigen Maßstäben realitätsnahe Annahmen zu treffen. Wenn beispielsweise ein Grundwasserspeicher in 20 Meter Tiefe ausreichend Wasser liefern kann, um den angenommenen Wasserbedarf zu decken, dann darf für die Berechnung beispielsweise davon ausgegangen werden, dass aus ökonomischen Gründen kein Grundwasserspeicher genutzt wird, der am selben Standort in 300 Meter Tiefe liegt. Außerdem ist zu prüfen, ob gefördertes Grundwasser zum Trinken, Tränken und Bewässern nutzbar ist. Die Nutzbarkeit des Grundwassers, etwa zur Zubereitung von Säuglingsmilchnahrung, kann zum Beispiel durch seinen Salzgehalt eingeschränkt sein. Zusätzlich ist für jeden Untersuchungsraum zu prüfen, ob in Abhängigkeit vom betrachteten klimatischen Zustand aufsteigendes kontaminiertes Grundwasser

vorkommt, das zu einer radioaktiven Kontamination des Bodens und der Pflanzen führen kann.

Expositionspfade

Maßgebend für die Dosisabschätzungen sind die ungünstigsten Einwirkungsstellen. Das sind die Orte für die Erzeugung von Lebensmitteln und für den Aufenthalt des Menschen, bei denen sich rechnerisch aufgrund der Umgebungskontamination jeweils die höchsten effektiven Dosen ergeben. Im Endergebnis werden für die einzelnen Untersuchungsräume Spannbreiten von Dosiswerten aus den zahlreichen Simulationsrechnungen ermittelt, die aus den Szenarienbetrachtungen der Geosphäre und den abdeckenden Betrachtungen der klimatischen Entwicklungen der Biosphäre resultieren. Letztlich ausschlaggebend ist für jeden Untersuchungsraum der höchste errechnete Dosiswert.

Bei der Abschätzung der effektiven Dosis der Bevölkerung sind die effektiven Dosen aus folgenden Pfaden zu addieren:

1. Äußere Exposition

Von der äußeren Exposition spricht man, wenn Radionuklide von außen auf den menschlichen Körper einwirken. Durch Bewässerung, aufsteigendes Grundwasser oder aufsteigende Gase gelangen Radionuklide in die Böden und werden dort akkumuliert. Durch die Radionuklide im Boden wird der Mensch in Abhängigkeit von der akkumulierten Aktivität, der Art der akkumulierten Radionuklide und der Aufenthaltszeit auf der kontaminierten Fläche exponiert.

Durch Sedimentation radioaktiv kontaminierter Schwebstoffe in Oberflächengewässern werden Radionuklide im Ufersediment angereichert. Wie hoch der Mensch durch Radionuklide im Ufersediment exponiert wird, ist von denselben Faktoren abhängig wie beim Boden.

2. Innere Exposition

Von der inneren Exposition spricht man, wenn Radionuklide über den Mund oder die Atemluft in den menschlichen Körper gelangen. Hierzu zählt die Exposition über die Nahrungskette durch den Verzehr

von radioaktiv kontaminierten Lebensmitteln. Zu betrachtende Pfade sind der Konsum von Trinkwasser und Tränkwasser von Mensch und Vieh sowie der Verzehr von Fisch, Milch, Fleisch, pflanzlichen Nahrungsmitteln und Muttermilch durch den Menschen. Als weiterer Aufnahmepfad über den Mund ist das versehentliche Verschlucken von Boden zu berücksichtigen. Das Verschlucken von Boden ist vor allem für kleine Kinder relevant, da diese beim Spielen im Freien häufiger Boden aufnehmen, als es Erwachsene tun.

Radionuklide, die aus dem Untergrund in die oberflächennahe Atmosphäre ausgasen, werden vom Menschen eingeatmet und führen zu einer Exposition über die Atemluft. Ebenso können radioaktiv kontaminierte Bodenpartikel aufgewirbelt werden und mit der Atemluft in den menschlichen Körper gelangen. Dieser Aufnahmepfad spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn Böden, die durch Bewässerung, Grundwasseraufstieg oder gegebenenfalls Gasaufstieg radioaktiv kontaminiert wurden, nicht bewachsen sind und austrocknen.

Wirtschaftsweisen

In der Landwirtschaft ist von den Verfahren auszugehen, wie sie in Industrienationen heutzutage üblich sind. Es wird unterstellt, dass die Umweltressourcen nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nachhaltig genutzt werden. Außerdem werden moderne Verfahren des Ackerbaus in Betracht gezogen sowie die entsprechenden aktuellen Ertragsleistungen bei Acker- und Weidepflanzen und Vieh. Zudem erfolgt die Bewässerung nach Bedarf, wobei sich die Bewässerungsmenge an der Differenz zwischen Niederschlagsmenge und der Verdunstung von Wasser durch Pflanzen sowie von Boden- und Wasseroberflächen orientiert.

Exposition der repräsentativen Person

Die Exposition der Bevölkerung wird für die repräsentative Person im Sinne des Strahlenschutzes berechnet, der bestimmte Lebensgewohnheiten (Aufenthaltszeiten und Aufenthaltsorte, Atemraten, Verzehrsmengen) unterstellt werden. Diese Lebensgewohnheiten charakterisieren eine hypothetische Person, die einer gegenüber dem Durchschnitt höheren, aber nicht unrealistischen Exposition ausge-

setzt ist. Die betrachteten Altersgruppen entsprechen dem üblichen Vorgehen im Strahlenschutz und decken die gesamte Lebenszeit, insbesondere auch Kinder, ab.

Die repräsentative Person hält sich an den jeweils ungünstigsten Stellen im Freien und in Gebäuden auf. Beim Aufenthalt im Freien sind der Aufenthalt auf Flächen, die für Daueraufenthalt geeignet sind, und der Aufenthalt auf Ufersediment zu berücksichtigen.

Da das zukünftige Ernährungsverhalten nicht vorhersagbar und auch sehr an kulturelle Gepflogenheiten gekoppelt ist, sind für den Betrachtungszeitraum ersatzweise die aktuellen Verzehrsmengen der deutschen Bevölkerung anzunehmen. Weiterhin wird angenommen, dass der Mensch am Ort der höchsten Exposition in der Nähe des Endlagers lebt und dass nur solche Nahrungsmittel lokal produziert werden, die unter dem vorgegebenen Klima auch landwirtschaftlich angebaut werden können. Für die Lebensmittel, die nicht lokal angebaut werden können, wird angenommen, dass diese überregional erzeugt und somit nicht durch das Endlager kontaminiert sind (wie beispielsweise Reis, der heute in Deutschland verzehrt wird). Beim Anteil der lokal erzeugten Lebensmittel wird von 50 Prozent der verzehrten Menge ausgegangen. Einzige Ausnahmen sind der Verzehr von Muttermilch und Trinkwasser, hier beträgt der angenommene Anteil 100 Prozent.

Es wird die über die Lebenszeit gemittelte Jahresdosis zugrunde gelegt. Diese Mittelung ist sinnvoll, da bei niedrigen Expositionen die Lebenszeitdosis für mögliche gesundheitliche Folgen maßgebend ist und bei der Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper ohnehin die effektive Dosis bis zum Lebensende berechnet wird (standardmäßig bis zum 70. Lebensjahr). Trotz des Abschneidens nach dem 70. Lebensjahr ist diese Vorgehensweise insgesamt konservativ, damit wird die Strahlenexposition im Sinne einer Lebenszeitdosis also insgesamt eher überschätzt.