

**Transportstudie
Konrad 2009**

Transportstudie Konrad 2009

Sicherheitsanalyse zur
Beförderung radioaktiver
Abfälle zum Endlager Konrad

F.-N. Sentuc
W. Brücher
U. Büttner
H.-J. Fett
F. Lange
R. Martens
B. M. Schmitz
G. Schwarz

Dezember 2009
mit Corrigendum vom April 2010

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde im Rahmen des FE-Vorhabens SR 2600 im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) erstellt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Corrigendum:

Gegenüber der Version vom Dezember 2009 wurde folgender Fehler behoben:

Auf Seite 70, Tabelle 7.3, Spalte 4, Zeile 5 (Ablaufüberwachung) wurde „0,016“ durch „0,16“ ersetzt.

Deskriptoren:

Beförderung radioaktiver Stoffe, radioaktive Abfälle, Endlager Konrad, radiologische Konsequenzen, transportbedingte Strahlenexposition, Transportrisikoanalyse, Transportunfall

Danksagung

Der vorliegende Untersuchungsbericht wurde mit Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt.

Die Bearbeiter der Studie sind neben dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und dem Bundesamt für Strahlenschutz einer Vielzahl von Personen und Organisationen, die die vorliegenden Untersuchungen durch die Bereitstellung von Sachinformationen und Unterlagen maßgeblich unterstützt und gefördert haben, zum Dank verpflichtet.

Besonderer Dank ergeht an:

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach
- DB AG (Konzernstrahlenschutz), Minden, und Railion AG, Mainz
- Energiewerke Nord (EWN), Lubmin
- Forschungszentrum Jülich
- GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, Essen
- Hahn-Meitner-Institut (HMI), Berlin
- Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe, Forschungszentrum Karlsruhe
- Landessammelstellen der Länder
- Nuclear Cargo + Service GmbH (NCS), Hanau
- Siemens AG, Karlstein
- Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf (VKTA)
- Zentrale Sammelstelle für radioaktive Abfälle der Bundeswehr (ZESAM)

Kurzfassung

Mit der Entscheidung des Bundesverwaltungsgerichts Leipzig vom 26. März 2007 ist der Planfeststellungsbeschluss für das Endlager Konrad mit einem genehmigten Endlagerungsvolumen (Brutto) von 303 000 m³ aus dem Jahre 2002 rechtskräftig und soll nach dem Willen der Bundesregierung zügig umgesetzt werden. Mit der Fertigstellung des Endlagers für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird voraussichtlich im Jahr 2014 gerechnet.

Zur Untersuchung und Bewertung der mit der Abfallanlieferung zum Endlager Konrad verbundenen potenziellen radiologischen Auswirkungen und Transportunfallrisiken hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH bereits 1991 eine umfangreiche *Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad* vorgelegt. Im Hinblick auf die zwischenzeitlichen Entwicklungen hat die GRS unter Berücksichtigung des aktuellen Planungs- und Erkenntnisstandes in Bezug auf die Arten und Mengen der einzulagernden radioaktiven Abfälle, die Beförderungsmodalitäten und die Bestimmung und Bewertung von Transportrisiken eine Überarbeitung und sicherheitstechnische Neubewertung der mit der Abfallanlieferung verbundenen potenziellen radiologischen Auswirkungen durchgeführt.

Die vorliegende Sicherheitsanalyse für die Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad stellt somit eine Aktualisierung der 1991er Transportstudie Konrad dar und hat zwei Hauptzielsetzungen:

1. Ermittlung und Bewertung der mit dem normalen (unfallfreien) Transport radioaktiver Abfälle verbundenen Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals,
2. Ermittlung und Bewertung der mit der Abfallanlieferung verbundenen Transportunfallrisiken in der Standortregion des Endlagers Konrad.

Hierzu wurden umfangreiche Datenerhebungen und Analysen über relevante Arten, Mengen und Eigenschaften endzulagernder radioaktiver Abfälle und Abfallverpackungen sowie Beförderungsmodalitäten und die möglichen radiologischen Auswirkungen durchgeführt. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf die Endlagerregion, in der aufgrund der Konzentration der angelieferten Abfalltransporte die bundesweit höchste Verkehrsdichte radioaktiver Abfallsendungen und dementsprechend auch das höchste Risiko für beförderungsbedingte radiologische Auswirkungen zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der Transportstudie Konrad 2009 und die Neubewertung der Abfalltransport-sicherheit zeigen insgesamt, dass die in der Standortregion des Endlagers Konrad zusammenlaufenden Abfalltransporte kein ins Gewicht fallendes radiologisches Risiko für die Bevölkerung, das Transportpersonal und die Umwelt darstellen. Dies gilt sowohl für den normalen Transport als auch für Transportunfälle. Die Untersuchungsergebnisse lassen für alle betrachteten Anlieferungsszenarien weiterhin die Schlussfolgerung zu, dass die von den Beteiligten vorgesehenen Schutz- und Vorsorgemaßnahmen für die Transportdurchführung in Verbindung mit den Anforderungen an die Abfallverpackungen und die Abfallanlieferung einen hohen Schutz- und Sicherheitsstandard für die Bevölkerung und das Transportpersonal gewährleisten.

Diese Gesamtbeurteilung stützt sich auf die nachfolgend kurz zusammengefassten Einzelergebnisse und Sachverhalte.

Abfallmengen und -eigenschaften

Nach dem derzeitigen Planungsstand ist zu erwarten, dass im Endlager Konrad jährlich etwa 2300 Transporteinheiten (TE) radioaktiver Abfälle bzw. im Mittel wöchentlich etwa 50 TE angeliefert und eingelagert werden. Eine Transporteinheit ist eine endlagerspezifische Transport- und Handhabungseinheit radioaktiver Abfälle und repräsentiert entweder ein quaderförmiges Abfallgebilde oder eine Tausch- bzw. Transportpalette mit 1 - 2 zylindrischen Abfallgebilden.

Der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Datenerhebung zufolge handelt es sich bei den in Deutschland aktuell vorliegenden und zur Anlieferung und Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ausschließlich um Abfälle deutscher Herkunft aus den Bereichen Forschung, Betrieb und Stilllegung von Kernkraftwerken und der kerntechnischen Industrie sowie aus Medizin und Technik mit einem Abfallgebildevolumen (Brutto) von etwa 110 000 m³. Dieses Abfallgebildevolumen entspricht etwa dem über einen 10-jährigen Betriebszeitraum kumulierten Endlagerungsvolumen. Der größte Volumenanteil entfällt davon auf Abfälle aus Forschungseinrichtungen mit einem Anteil von etwa 56 % und auf Betriebs- und Stilllegungsabfälle von Kernkraftwerken und der kerntechnischen Industrie mit einem Anteil von insgesamt etwa 41 %. Längerfristig ist – u. a. wegen des Ausstiegsbeschlusses – mit einem höheren Anteil radioaktiver Abfälle aus der Stilllegung und dem Rückbau von Kernkraftwerken zu rechnen. Die beförderungsrelevanten sicherheits-

technischen Eigenschaften dieser Abfälle unterscheiden sich nach derzeitiger Einschätzung jedoch nicht wesentlich von den bereits zurzeit vorliegenden konradgängigen Abfällen.

Die zur Anlieferung und Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle müssen neben den gefahrgutrechtlichen Anforderungen bestimmten sicherheitstechnischen und betrieblichen Anforderungen für die Endlagerung genügen, die in den Endlagerungsbedingungen festgelegt sind. Nach den Ergebnissen der Abfalldatenerhebung werden die radioaktiven Abfälle vorwiegend in quaderförmigen Abfallcontainern Typ IV und in zylindrischen Betonbehältern Typ I angeliefert. Die Aktivitätsinventare der Abfallgebände liegen mehrheitlich in einem Wertebereich von etwa 10^{10} - 10^{13} Bq pro Behälter und können in Einzelfällen etwa 10^{14} Bq betragen. Die Höchstwerte der Dosisleistungen betragen – bei den zylindrischen Gebinden in 1 m bzw. bei quaderförmigen Gebinden in 2 m Abstand – im Mittel etwa $25 \mu\text{Sv/h}$ und liegen damit deutlich unter den relevanten Dosisleistungsgrenzwerten der Endlagerungsbedingungen. Sie liegen auch unterhalb der Werte der 1991er Transportstudie Konrad.

Transportszenarien und Beförderungsmodalitäten

Nach den von den Ablieferungspflichtigen verfolgten Anlieferungspräferenzen ist davon auszugehen, dass die Abfälle mit einem Anteil von etwa 80 % mehrheitlich auf dem Schienenweg angeliefert werden und der Straßenbeförderungsanteil etwa 20 % beträgt (im Folgenden 80/20-Szenarium genannt). Dies entspricht im Mittel einem wöchentlichen Beförderungsaufkommen von etwa 40 Transporteinheiten auf der Schiene und etwa 10 Transporteinheiten auf der Straße. Dieses Anlieferungsszenarium wird als realistischer Referenzfall im Rahmen der Untersuchung der beförderungsbedingten radiologischen Auswirkungen auf die Bevölkerung und das Transportpersonal eingehender betrachtet. Ergänzend dazu werden aber auch davon abweichende hypothetische Anlieferungsszenarien mit einer unterstellten ausschließlichen Schienen- bzw. Straßenanlieferung analysiert.

Aufgrund der verkehrstechnischen Gegebenheiten und der Bereitstellungs- und Anlieferungskapazitäten der Ablieferungspflichtigen und des Endlagers kommt für die Anlieferung der Abfälle auf dem Schienenweg nur eine Beförderung im fahrplanmäßig verkehrenden Regelgüterverkehr in Betracht. Eine Anlieferung mittels Ganz- oder Sonderzügen kann aus den vorgenannten Gründen praktisch ausgeschlossen werden.

Die Hauptanlieferungswege der Abfalltransporte vom Absender zum Empfänger auf dem Schienennetz der DB Netz AG führen im Allgemeinen über den Güterverkehrsknotenpunkt Seelze/Hannover (Rangierbahnhof) zum Übergabebahnhof Beddingen und von dort unmittelbar zum Endlager Konrad. Der Bahnhof Braunschweig wird durch die Abfalltransporte im Regelfall nicht berührt. Als Transportwege für die Abfallanlieferung mittels Straßenfahrzeugen kommen aufgrund der Verkehrsanbindung des Endlagerstandortes an das öffentliche Verkehrsnetz insbesondere in der Endlagerregion vorrangig außerörtliche Verkehrswege wie Bundesautobahnen und Fernstraßen in Betracht.

Das zu erwartende Verkehrsaufkommen in der Endlagerregion beläuft sich für das 80/20-Szenarium abhängig von den sonstigen Randbedingungen auf wöchentlich etwa 8 Schienentransporte in Form von kleineren Wagenverbänden (2 - 3 Wagen pro Zug) und – je nach Ladekapazität der eingesetzten Straßentransportmittel – auf maximal 10 LKW-Transporte pro Woche. Im hypothetischen Fall einer ausschließlich schienengebundenen Abfallanlieferung würde die Zahl der Schienentransporte geringfügig auf wöchentlich etwa 10 Schienentransporte ansteigen, bei einer ausschließlich straßengebundenen Abfallanlieferung sich aber deutlich auf maximal 50 Straßentransporte pro Woche erhöhen.

Unfallfreier Transport

Personen, die sich als Arbeitskräfte oder Anwohner der Anlieferungsstrecken funktionsbedingt oder zufällig im Nahbereich der Abfalltransportbehälter oder Transportmittel aufhalten, sind der von den Abfallbehältern ausgehenden Reststrahlung ausgesetzt und können eine Strahlenexposition erfahren. Die diesbezüglichen Expositionsanalysen für die sogenannten „repräsentativen Personen“ (vormals kritische Personengruppe) haben ergeben, dass die beförderungsbedingt zu erwartenden Strahlenexpositionen der Bevölkerung in der Endlagerstandortregion mit Werten bis zu etwa 0,02 mSv/a (effektive Dosis) für den realistischen Fall eines 80/20-Szenariums generell gering bis sehr gering sind und nur Bruchteile des für die Bevölkerung maßgebenden Dosisgrenzwertes von 1 mSv/a betragen. Auch der Vergleich mit der natürlichen Strahlenexposition von etwa 2,1 mSv/a macht deutlich, dass die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Endlagerregion durch die Abfalltransporte praktisch nicht verändert wird.

Die beförderungsbedingt zu erwartenden Strahlenexpositionen der unmittelbar mit der Transportabwicklung befassten Arbeitskräfte wie Rangierer, Lokführer, LKW-Fahrer etc. belaufen sich den durchgeführten Untersuchungen zufolge auf Werte von etwa 0,1 - 0,6 mSv/a für das realistische Referenzszenarium und liegen damit im Rahmen vergleichbarer Richt- und Erfahrungswerte für solche berufsbedingten Strahlenexpositionen in Deutschland. Aufgrund der relativ geringen zu erwartenden beruflichen Strahlenexpositionen der betrachteten Personengruppe sind daher für die angesprochenen Tätigkeiten aus Strahlenschutzgründen weder detaillierte Dosisüberwachungsmaßnahmen (z. B. mittels Dosimeter) noch besondere über die gefahrgutrechtlichen Erfordernisse hinausgehenden Strahlenschutz- und Vorsorgemaßnahmen erforderlich. Aufgrund der im Zusammenhang mit Abfalltransporten zum Endlager Konrad zu erwartenden Strahlenexpositionen ist daher auch eine Einstufung des Transportpersonals als beruflich strahlenexponierte Personen (nach Strahlenschutzverordnung) in der Regel nicht erforderlich.

Während die oben genannten Werte der maximalen Strahlenexpositionen für das Transportpersonal mit den Werten der Transportstudie Konrad von 1991 etwa vergleichbar sind (0,2 - 0,7 mSv/a), ergibt sich für die Bevölkerung eine deutliche Reduktion der Maximalwerte. So beläuft sich beispielweise die potenzielle Strahlenexposition für die Anwohner der Hauptanlieferungsstrecke Seelze/Beddingen bei dem 80/20-Szenarium auf maximal 0,02 mSv/a, wogegen bei der Studie von 1991 für das gleiche Anlieferungsszenarium ein Maximalwert von 0,1 mSv/a für die Anwohner des ehemaligen Rangierbahnhofes Braunschweig (Alte Salzdahlumer Straße) ermittelt wurde. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass bei dem aktuell betrachteten Rangierbahnhof Seelze/Hannover andere örtliche Gegebenheiten mit größeren Abständen der nächsten Wohnbebauung zum Gleiskörper vorherrschen. Daneben machen sich jedoch auch die realistischeren Annahmen bzgl. des jährlichen Transportaufkommens, der Standzeiten der Abfallwagen (Verbot von Standzeiten am Wochenende bei der Bahn) sowie der Abfall- und Gebindeeigenschaften in einer Dosisreduktion (teilweise um mehr als eine Größenordnung) bemerkbar.

Transportunfälle

Zur Ermittlung des mit Transportunfällen verbundenen Risikos wurde für die Endlagerregion (25 km Umkreis um den Standort) eine probabilistische Transportunfallrisikolanalyse durchgeführt. Als wesentliche Einflussgrößen wurden die Unfallhäufigkeit, die

Unfallschwere, die Eigenschaften der Abfallprodukte und der Transportbehälter sowie die Ausbreitungsbedingungen in der Atmosphäre berücksichtigt. Hierzu wurden Unfallstatistiken des Güterzugverkehrs und des LKW-Verkehrs in Hinblick auf die Häufigkeit und Schwere von Unfällen (Unfallgeschwindigkeit und ggf. Brandeinwirkung) ausgewertet. Die Informationen zur Häufigkeit oder Wahrscheinlichkeit der genannten Parameter wurden zusammen mit den Erkenntnissen zum Freisetzungsverhalten der Abfallbinde bei mechanischen oder thermischen Unfalleinwirkungen verwendet, um für die verschiedenen untersuchten Beförderungsszenarien aus einer Vielzahl von Einzelberechnungen von Transportunfällen das Spektrum potenzieller Aktivitätsfreisetzungen und radiologischer Unfallfolgen mit ihren zugehörigen Eintrittshäufigkeiten zu berechnen.

Die Strahlenexposition wurde in Form der effektiven Dosis bzw. effektiven Folgedosis für eine erwachsene Referenzperson in Ausbreitungsrichtung über eine Integrationszeit von 50 Jahren unter Berücksichtigung der Expositionspfade Submersion, Bodenstrahlung, Inhalation, Ingestion und Resuspension mit nachfolgender Inhalation durch Ausbreitungs- und Dosismodelle ermittelt. Dabei wurden für jede Freisetzung jeweils entfernungsabhängig die ungünstigsten Aufpunkte betrachtet. Bei den Berechnungen von potenziellen Strahlenexpositionen sind für Entfernungen ab 150 m vom Unfallort generell keine dosisminimierenden Gegenmaßnahmen wie Dekontamination oder Verzehrseinschränkungen unterstellt worden. Es sind jedoch zur Orientierung auch gesonderte Rechnungen durchgeführt worden, mit denen das Reduktionspotenzial solcher Maßnahmen abgeschätzt werden kann.

Die Ergebnisse der probabilistischen Transportunfallrisikoanalyse für die Endlagerregion werden für alle betrachteten Anlieferungsszenarien in Form von kumulativen komplementären Häufigkeitsverteilungen der potenziellen Strahlenexposition dargestellt. Aus den Kurvenverläufen sind die erwarteten Häufigkeiten ablesbar, mit denen in der Endlagerregion aufgrund von Transportunfällen bestimmte Strahlenexpositionen in einer bestimmten Entfernungen vom Unfallort maximal auftreten können.

Die wesentlichen Ergebnisse der probabilistischen Transportrisikoanalyse für das realistische Transportszenarium lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die erwartete Unfallhäufigkeit von Güterzügen oder LKW mit radioaktiven Abfällen im 25 km Umkreis beträgt etwa $1,0 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr, was im Mittel einem Transportunfall in 100 Jahren entspricht. Die erwartete Häufigkeit, dass es zu einem Transport-

unfall in der Endlagerregion mit einer Freisetzung kommt ist mit etwa $3,9 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr noch niedriger (im Mittel alle 260 Jahre).

- Überwiegend sind mit Transportunfällen so geringe Freisetzungen verbunden, dass potenzielle Strahlenexpositionen auch ohne Annahme von Gegenmaßnahmen deutlich unterhalb der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres liegen. So würden in 150 m Entfernung in 9 von 10 Transportunfällen mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe, die berechneten Werte der effektiven Dosis unterhalb von 0,02 mSv bleiben und in 99 von 100 solchen Ereignissen unterhalb von 0,3 mSv.
- Der zur Orientierung herangezogene Störfallplanungswert von 50 mSv wird selbst in 150 m Entfernung bis zu einer erwarteten Häufigkeit von 10^{-7} pro Jahr (im Mittel alle 10 Millionen Jahre) in allen Fällen deutlich unterschritten. Die maximale effektive Dosis für dieses sehr niedrige Häufigkeitsniveau beträgt etwa 8 mSv im Abstand von 150 m vom Unfallort und nimmt für größere Entfernungen bis 1 km auf etwa 5 mSv ab.
- Das entsprechende Risiko einer Einzelperson (Individualrisiko) ist im Vergleich zu dem in der Studie betrachteten Risiko für die Gesamtbevölkerung der Endlagerregion nochmals um mehrere Zehnerpotenzen niedriger, da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit jeder Person der Gesamtbevölkerung im jeweils betroffenen Umkreis der Unfallstelle und gleichzeitig in der zum Unfallzeitpunkt herrschenden Ausbreitungsrichtung gering ist.
- Die potenziellen Expositionen bzw. erwarteten Häufigkeiten der aktuellen Transportrisikoanalyse liegen mehr als eine Zehnerpotenz unterhalb den entsprechenden Ergebnissen der Transportstudie von 1991, was auf das niedrigere jährliche Transportaufkommen, den Wegfall von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aus der Wiederaufarbeitung, eine verbesserte Datengrundlage und eine realistischere Berechnungsmethodik zurückzuführen ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung, Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Einzelzielsetzungen und Randbedingungen	4
2	Untersuchungsmethodik.....	9
3	Bewertungsgrundlagen	13
3.1	Gefahrgutrechtliche Transportvorschriften	13
3.2	Atomrechtliche Transportvorschriften.....	15
3.3	Endlagerungsbedingungen Konrad.....	16
4	Art und Volumen konradgängiger radioaktiver Abfälle.....	19
4.1	Abfallarten und allgemeine Anforderungen an Abfallprodukte.....	21
4.2	Abfall- und Transportbehältertypen	22
4.3	Abfalldatenerhebung	26
4.4	Abfallmengen- und Beförderungsaufkommen.....	28
5	Radiologische Charakterisierung der Abfall- und Transportbehälter	35
5.1	Anforderungen	35
5.2	Aktivitätsinventar	36
5.3	Ortsdosisleistung.....	38
6	Transportszenarien und Beförderungsmodalitäten.....	45
6.1	Transportszenarien	45
6.2	Beförderungsmodalitäten und Streckenführung.....	48
6.2.1	Schienenbeförderungsmodalitäten	50
6.2.2	Straßenbeförderungsmodalitäten.....	54
6.3	Verkehrsaufkommen	56

7	Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals aufgrund des normalen Transports.....	59
7.1	Beförderungsbedingte Strahlenexpositionen der Bevölkerung	61
7.2	Beförderungsbedingte Strahlenexpositionen des Transportpersonals.....	63
7.3	Zusammenfassung und Bewertung	65
8	Transportunfallrisiko	71
8.1	Generelle Vorgehensweise	71
8.2	Behälterversagen und Freisetzungsverhalten.....	74
8.2.1	Definition der Belastungsklassen	74
8.2.2	Freisetzungsteile	77
8.3	Unfallhäufigkeiten und Unfallschwere	84
8.3.1	Unfallabläufe und Unfallhäufigkeiten in Güterzugverkehr	84
8.3.2	Unfallhäufigkeiten beim Rangierbetrieb	97
8.3.3	Unfallhäufigkeiten beim Straßentransport.....	103
8.3.4	Übertragbarkeit der Unfalldaten auf den Standortbereich.....	106
8.4	Transportunfallsimulation - Quelltermbestimmung	109
8.4.1	Abfalltransport im Güterzugverkehr	110
8.4.2	Abfalltransport mit LKW	114
8.4.3	Übergabebahnhof Beddingen	115
8.4.4	Bildung von Quelltermgruppen.....	115
8.4.5	Freisetzungsklassen	118
8.5	Unfallhäufigkeiten mit Freisetzung	126
8.5.1	100 % Schienentransport.....	126
8.5.2	100 % Straßentransport	128
8.5.3	80 % Schienentransport / 20 % Straßentransport.....	130
8.5.4	Übergabebahnhof Beddingen	132
8.5.5	Szenarienübersicht	134
8.6	Radiologische Unfallfolgen.....	137
8.6.1	Berechnungsmethodik	137
8.6.2	Szenarium: 100 % Schienentransport.....	145
8.6.3	Szenarium: 100 % Straßentransport.....	156

8.6.4	Szenarium: 80 % Schienen- / 20 % Straßentransport.....	161
8.6.5	Übergabebahnhof Beddingen	165
8.7	Bewertung der Transportunfallrisiken.....	167
8.7.1	Konservative Annahmen der Transportunfallanalyse.....	167
8.7.2	Vergleich mit der 1991er Transportstudie Konrad	169
8.7.3	Einordnung und Bewertung.....	170
9	Literatur.....	173
	Abbildungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis.....	185
	Abkürzungsverzeichnis	189

1 Einführung, Problemstellung und Zielsetzung

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland ist eine originäre staatliche Aufgabe (§ 9a (3) AtG). Nach Maßgabe eines gemeinsamen Beschlusses der Regierungschefs von Bund und Ländern erfolgt die unbefristete Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, um Menschen und Umwelt dauerhaft vor den von radioaktiven Abfällen ausgehenden Gefahren zu schützen.

Diesem gesetzlichen Auftrag ist der Bund, vertreten durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) bzw. seine Rechtsvorgänger, 1982 nachgekommen und hat entsprechende Antragsunterlagen der zuständigen Behörde zur Einleitung eines atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens zugeleitet und verfahrensbegleitend auch der Öffentlichkeit (Anhörungsverfahren) vorgelegt. Das Planfeststellungsverfahren wurde mit dem positiven Beschluss des Niedersächsischen Umweltministeriums vom 22. Mai 2002 für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers Konrad abgeschlossen; der Sofortvollzug des Beschlusses wurde auf Veranlassung des BfS im Einvernehmen mit der Industrie jedoch ausgesetzt.

Mit der Entscheidung des Bundesverwaltungsgerichts in Leipzig vom 26. März 2007 über bestehende Zweifel hinsichtlich der Rechtmäßigkeit des Planfeststellungsverfahrens ist der Beschluss der Planfeststellungsbehörde aus dem Jahre 2002 über die Errichtung und den Betrieb des Endlagers Konrad als Bundesendlager für feste und verfestigte radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung damit rechtskräftig und soll nach dem Willen der Bundesregierung zügig umgesetzt werden. Die derzeitigen Planungen des BfS als Genehmigungsinhaber und Betreiber des Endlagers Konrad gehen davon aus, dass nach einer mehrjährigen Vorbereitungs-, Sanierungs- und Umrüstphase der Schachanlage Konrad mit der Fertigstellung des Endlagers im Jahr 2014 gerechnet werden kann.

1.1 Problemstellung

Gemäß dem Planfeststellungsbeschluss (PFB) sind im Endlager Konrad radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung mit einem Abfallgebundevolumen von bis zu 303 000 m³ zur Endlagerung zugelassen. Bei den zugelassenen radioaktiven Abfällen handelt es sich generell um radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung nationalen Ursprungs aus unterschiedlichen Herkunfts- und An-

wendungsbereichen radioaktiver Stoffe und Strahlenquellen wie der Forschung, Medizin und Technik sowie von Kernkraftwerken und der kerntechnischen Industrie.

Radioaktive Abfälle sind im verkehrsrechtlichen Sinne Gefahrgüter, von denen bei unsachgemäßer Handhabung und bei Transportunfällen Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung ausgehen können. Insbesondere können Personen, die sich funktionsbedingt oder zufällig im Nahbereich solcher Abfalltransporte aufhalten, durch die von den radioaktiven Abfällen ausgehende und die Behälterwandung (Abschirmung) durchdringende Reststrahlung exponiert werden. Weiterhin können Transportunfälle mit der Möglichkeit einer Aktivitätsfreisetzung und einer daraus folgenden Strahlenexposition von Personen und/oder unfallbedingten Umgebungskontamination nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Zum Schutz vor den damit verbundenen Gefahren für die Allgemeinheit, insbesondere für Leben, Gesundheit, Sachgüter und die Umwelt, ist die Beförderung radioaktiver Stoffe oder Abfälle nur unter besonderen Schutz- und Vorsorgemaßnahmen zulässig.

Nach den Schutz- und Sicherheitsgrundsätzen der internationalen Transportvorschriften (siehe Abschnitt 3.1) sind die für die Transportsicherheit zuständigen staatlichen Organe gehalten, die Einhaltung und Gewährleistung der für die Beförderung radioaktiver Stoffe maßgebenden Sicherheitsstandards zu überprüfen und zu beurteilen, ob die für die Transportdurchführung vorgesehenen oder getroffenen Schutz- und Vorsorgemaßnahmen angemessen sind und den Erfordernissen der Internationalen Basic Safety Standards (BSS) /IAEA 96/ genügen.

Dieser grundsätzlichen Verpflichtung sind die zuständigen staatlichen Stellen – begleitend zum Genehmigungs- und Anhörungsverfahren für das Endlager Konrad – bereits 1991 durch eine umfangreiche sicherheitstechnische Untersuchung über Art und Ausmaß der mit den Abfalltransporten zum Endlager Konrad einhergehenden Transportrisiken nachgekommen. Die im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit erstellte Untersuchung, die Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad (Bericht GRS-84, Juli 1991) /GRS 91/, stellte, gestützt auf den seinerzeitigen Planungs- und Erkenntnisstand über die geplanten Abfalltransporte zum Endlager Konrad zusammenfassend fest, dass die in der Standortregion des Endlagers zusammenlaufenden Abfalltransporte kein ins Gewicht fallendes Sicherheitsrisiko darstellen.

Aufgrund der technologischen und regulatorischen Fortentwicklung seit den frühen 1990er Jahren auf dem Gebiet der Behandlung und Minimierung des Anfalls radioaktiver Abfälle, der Regelung und Kontrolle der Beförderung radioaktiver Stoffe und der Bestimmung und Bewertung von Transportrisiken ist diese Feststellung der Transportstudie von 1991 jedoch zu überprüfen. So hat insbesondere die Entwicklung neuer Abfallbehandlungs- und Konditionierungsverfahren zu deutlichen Veränderungen beim bundesweiten Aufkommen, der Herkunft und der Zusammensetzung radioaktiver Abfälle in Deutschland geführt. Verschiedene Abfallströme, die in den früheren Planungen einen wesentlichen Anteil der konradgängigen Abfälle ausmachten, nämlich die rückzuführenden schwach- und mittelradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle aus Frankreich und Großbritannien, sind aufgrund anderweitiger Entscheidungen (z. B. Substitution schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gegen äquivalente Zusatzmengen verfestigter hochradioaktiver Wiederaufarbeitungsabfälle) gänzlich hinfällig geworden; andere – insbesondere solche aus den neuen Bundesländern – sind hinzugekommen. Darüber hinaus wurde die Regelung und Kontrolle der Beförderung radioaktiver Stoffe mit der Entwicklung und internationalen Umsetzung der von der Internationalen Atomenergieorganisation herausgegebenen Empfehlungen für die sichere Beförderung radioaktiver Stoffe aus dem Jahre 1996 auf eine neue Grundlage gestellt; weitere Überarbeitungen bzw. Revisionen dieser Transportsicherheitsempfehlungen folgten in den Jahren 2003 und 2005 /IAEA 05/.

Aufgrund dieser Sachlage hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit eine Aktualisierung der 1991er Transportstudie Konrad und Neubewertung der Sicherheit der Abfalltransporte zum Endlager Konrad durchgeführt.

Im Rahmen dieser Aktualisierung ist insbesondere zu untersuchen und zu prüfen, ob und inwieweit die für die Abfalltransportdurchführung vorgesehenen Schutz- und Vorsorgemaßnahmen angemessen und geeignet sind, um (i) einen hinreichenden Schutz vor den von radioaktiven Abfällen ausgehenden radiologischen Gefahren für Personen und die Umwelt beim normalen (unfallfreien) Transport und eventuellen Transportunfällen in der Endlagerregion zu gewährleisten und (ii) die Einhaltung der von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) und den Internationalen Basic Safety Standards empfohlenen Strahlenschutzgrundsätze und relevanten Dosisgrenzwerte sicherzustellen.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen sind in dem vorliegenden Arbeitsbericht zusammenfassend dargestellt und erläutert.

1.2 Einzelzielsetzungen und Randbedingungen

Nach den für die sichere Beförderung radioaktiver Stoffe bzw. Abfälle maßgebenden Sicherheitsbestimmungen (z. B. § 301 TS-R-1, /IAEA 05/) sind Schutz und Sicherheit zu optimieren, so dass die Höhe der Individualdosen, die Anzahl der exponierten Personen und die Wahrscheinlichkeit potenzieller (unfallbedingter) Expositionen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Faktoren so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar gehalten werden und die Personendosen unter den relevanten Dosisgrenzwerten liegen.

Die für die Beförderung radioaktiver Stoffe zu treffenden Schutz- und Vorsorgemaßnahmen richten sich nach dem Gefährdungsausmaß und werden beispielsweise insbesondere durch die Höhe und Wahrscheinlichkeit potenzieller Strahlenexpositionen oder Kontaminationen bestimmt. Höhere zu erwartende Strahlenexpositionen oder Kontaminationen begründen im Allgemeinen umfassendere Schutz- und Vorsorgemaßnahmen als etwa Strahlenexpositionen, die nur einen Bruchteil der beförderungsrelevanten Dosisgrenzwerte oder sonstiger relevanter Richt- und Erfahrungswerte betragen. Die Kenntnis der beim Transport radioaktiver Stoffe zu erwartenden Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals sowie der Transportunfallrisiken sind daher für die Transportsicherheitsverantwortlichen von zentraler Bedeutung. Sie hat darüber hinaus aber auch einen hohen Stellenwert für die Urteils- und Willensbildung der Entscheidungsträger sowie für die unabhängige Unterrichtung einer sensibilisierten Öffentlichkeit auf dem Gebiet der Abfalltransportsicherheit.

Die Untersuchung und Neubewertung der Sicherheit der erwarteten Abfalltransporte zum Endlager Konrad verfolgt in Übereinstimmung mit der 1991er Transportstudie Konrad und unter Berücksichtigung des aktuellen Planungs- und Kenntnisstandes zur Anlieferung und Einlagerung konradgängiger radioaktiver Abfälle dementsprechend zwei Hauptzielsetzungen:

1. Ermittlung und Bewertung der mit der normalen (unfallfreien) Anlieferung radioaktiver Abfälle verbundenen Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals
2. Abschätzung und Bewertung des mit der Abfallanlieferung verbundenen Transportunfallrisikos in der Standortregion des Endlagers Konrad, d. h. die Ermittlung der Häufigkeit und potenziellen radiologischen Auswirkungen etwaiger Transport-

unfälle in der Region mit dem höchsten Abfallbeförderungs- und Verkehrsaufkommen.

Für den vorliegenden Untersuchungszweck und die Quantifizierung der beförderungsbedingten radiologischen Auswirkungen wird dazu angenommen, dass nach der Inbetriebnahme des Endlagers Konrad die in der Bundesrepublik Deutschland im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte bereits angefallenen und zwischengelagerten radioaktiven Abfälle angeliefert und eingelagert werden. Der Abfallbestand an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (behandelt und unbehandelt) in Deutschland beläuft sich den jährlichen Erhebungen des BfS zufolge auf ein Volumen von derzeit etwa 120 000 m³ (Stand Ende 2007) und entspricht damit größenordnungsmäßig der geplanten betrieblichen Einlagerungskapazität des Endlagers Konrad für einen Zeitraum von etwa 10 Jahren. Für den über diesen Zeithorizont hinausgehenden Anlieferungs- und Einlagerungsbetrieb und dessen beförderungsbedingte radiologische Auswirkungen können nur noch mögliche Entwicklungstendenzen angegeben werden.

Hinsichtlich der mit dem regulären Anlieferungs- und Einlagerungsbetrieb des ersten Jahrzehnts verbundenen Abfallanlieferungs- und Beförderungsmodalitäten werden unter Berücksichtigung des aktuellen Planungs- und Entwicklungsstandes insbesondere in Bezug auf das geplante Einlagerungsvolumen, die Art und Eigenschaften der zur Anlieferung vorgesehenen Abfälle, der verkehrstechnischen Gegebenheiten in der Endlagerregion und der Unfallfolgenanalyse mittels fortgeschrittener Ausbreitungs- und Ablagerungsmodelle (Lagrange-Partikelsimulationsmodell) verschiedene Anlieferungs- und Beförderungsszenarien betrachtet und bewertet. Als zentraler Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Transportsicherheitsanalyse wird zum einen ein realistisches Anlieferungsszenarium betrachtet, das von einer bestimmten Aufteilung des Abfallbeförderungsaufkommens auf die beiden Verkehrsträger Straße und Schiene ausgeht und dem Sachverhalt Rechnung trägt, dass alleine aus verkehrstechnischen Gründen (z. B. fehlender Schienenanschluss des Ablieferers) eine ausschließliche Anlieferung auf dem Schienenweg ausgeschlossen werden kann. Zum anderen werden ergänzend zwei weitere, aber hypothetische Anlieferungsszenarien mit einer unterstellten ausschließlichen Schienen- bzw. Straßenanlieferung der radioaktiven Abfälle eingehender analysiert. Die diesbezüglichen Ergebnisse lassen Rückschlüsse zu auf die Sensitivität und Bandbreite der potenziellen radiologischen Auswirkungen bei etwaigen zukünftigen Änderungen der Abfalltransport- und Anlieferungsmodalitäten während der Gesamtbetriebsdauer des Endlagers.

Für die Bereitstellung der dazu erforderlichen sicherheitstechnischen und transportrelevanten Informationen und Basisdaten wurden umfangreiche Datenerhebungen und Analysen in Bezug auf das bundesweite Abfallaufkommen, deren radiologisch relevante Abfalleigenschaften (z. B. Aktivitätsinventar und -zusammensetzung), die vorgesehene Verpackungs- und Konditionierungsform, die Beförderungsart und Beförderungsmodalitäten, die Art, Häufigkeit und Schwere von Transportunfällen und die damit verbundenen radiologischen Auswirkungen durchgeführt. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei schwerpunktmäßig auf die Gegebenheiten und Beförderungsmodalitäten in der Standortregion des Endlagers, in der aufgrund der Zusammenführung von Abfallsendungen unterschiedlicher Herkunft das bundesweit höchste Abfallbeförderungsaufkommen und die höchste Abfallverkehrsichte zu erwarten ist.

Der vorliegende Untersuchungsbericht dokumentiert zusammenfassend die auf der Basis des derzeitigen Planungs- und Erkenntnisstandes beruhenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen der aktualisierten Transportsicherheitsanalyse für die Anlieferung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad (Abb. 1.1). Die Untersuchungsergebnisse berücksichtigen und repräsentieren die bis Ende 2008 verfügbaren Planungen und absehbaren Entwicklungstendenzen, soweit sie die Anlieferung und Einlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in dem Endlager Konrad betreffen.

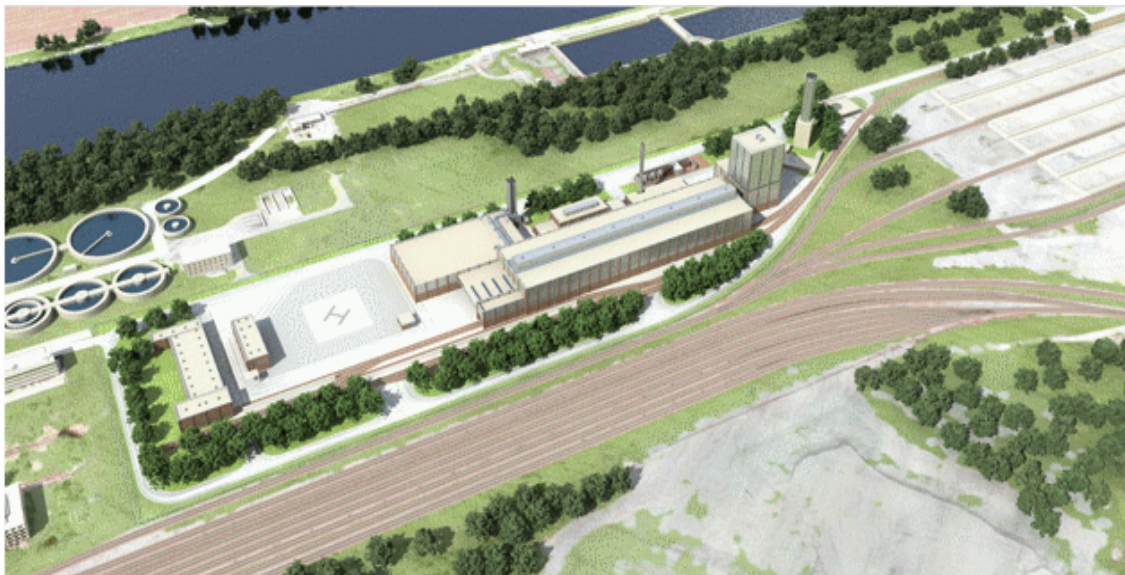


Abb. 1.1 Geplante Anlagen des Endlagers Konrad über Tage – Bereich Konrad 2 (Quelle: BfS)

Die durchgeführten Untersuchungen erstrecken sich nicht auf den innerbetrieblichen Transport radioaktiver Abfälle in den obertägigen und untertägigen Betriebsteilen des Endlagers Konrad.

2 Untersuchungsmethodik

Die Untersuchung und Bewertung der mit der Abfallanlieferung verbundenen radiologischen Auswirkungen umfasst den bestimmungsgemäßen Transport sowie potenzielle Transportunfälle und erfolgt auf der Grundlage der transportbedingt zu erwartenden Strahlenexpositionen bestimmter Personen oder Personengruppen und einem Vergleich dieser Werte mit einschlägigen Grenzwerten bzw. sonstigen relevanten Richt- und Erfahrungswerten. Des Weiteren wird unterstellt, dass die für die Beförderung radioaktiver Stoffe einschlägigen Sicherheitsvorschriften und Bestimmungen (wie z. B. Aktivitätsbegrenzungen und Dosisleistungsgrenzwerte für Abfalltransportbehälter) uneingeschränkt Anwendung finden und eingehalten werden.

Bestimmungsgemäßer Transport:

Personen, die als Arbeitskräfte mit dem Umschlag oder der Transportabwicklung radioaktiver Abfallsendungen befasst sind, oder sich als Anwohner oder Passant im Nahbereich des Fahrweges oder Umschlagortes solcher Abfallsendungen aufhalten, sind dem von den Abfallbehältern ausgehenden Strahlungsfeld ausgesetzt. Die Höhe der daraus resultierenden Strahlenexpositionen variiert erfahrungsgemäß in weiten Grenzen und wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Hierzu gehören als maßgebliche Einflussfaktoren insbesondere die Art und Intensität des von einem Abfallbehälter ausgehenden Strahlungsfeldes (z. B. Gamma- und/oder Betastrahlung) am Aufenthaltsort einer Person und die Zeitdauer, während der sich eine Person im Strahlungsfeld aufhält.

Für die quantitative Bestimmung der beförderungsbedingten Strahlenexpositionen von Personen oder bestimmten Personengruppen stehen im Prinzip verschiedene Untersuchungsmethoden zur Verfügung: die messtechnische Erfassung oder deren Abschätzung mittels detaillierter Expositionsanalysen. Im vorliegenden Zusammenhang erfolgt die quantitative Bestimmung der Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals vorrangig mittels einer Analyse der mit der Abfallanlieferung verbundenen „expositionsintensiven“ Transport- und Betriebsabläufe, die zu einer Exposition der Bevölkerung oder des Transportpersonals führen oder führen können. Zu diesem Zwecke wurden daher u. a. Ortsbesichtigungen, Datenerhebungen und Arbeitsablaufanalysen typischer Transport- und Betriebsabläufe auf dem Übergabebahnhof Beddingen, dem Rangierbahnhof Seelze/Hannover und am Endlagerstandort

durchgeführt, um insbesondere eine realistische Dosisabschätzung für jene Bereiche, nämlich die Endlagerregion, zu gewährleisten, in der aufgrund der Anlieferungsgegebenheiten und einer möglichen Aggregation von Abfalltransporten unterschiedlicher Herkunft mit einem vergleichsweise hohen Abfallverkehrsaufkommen zu rechnen ist. Unsicherheits- und Entscheidungsspielräume einzelner Sachverhalte und Festlegungen werden dabei im Allgemeinen in konservativ vereinfachender Weise, d. h. dosisüberschätzender Form, berücksichtigt.

Im Hinblick auf die Gewährleistung eines hinreichenden Sicherheitsstandards beim Transport radioaktiver Stoffe sind vor allem jene Expositionssituationen von Interesse, bei denen Einzelpersonen oder bestimmte Personengruppen funktionsbedingt oder aufgrund ihrer Lebensumstände (z. B. Anwohner der Hauptanlieferungsstrecken) dem Strahlungsfeld der Abfallbehälter in besonderer Weise ausgesetzt sind oder sein könnten und damit höhere Strahlenexpositionen erfahren als andere Vergleichsgruppen. Diese (vormals sogenannten kritischen) Personengruppen werden im Sinne der neuen Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission /ICRP 07, ICRP 08/ als „repräsentative Personen“ bezeichnet. Lässt sich nun zeigen, dass für repräsentative Personen in der Endlagerregion eine hinreichende Strahlenschutzvorsorge besteht, so gilt dies umso mehr für Personen und Personengruppen, die nicht zu den repräsentativen Personen gehören – wie beispielsweise Anwohner/Passanten von Abfallanlieferungsrouten, die nur gelegentlich durch Abfalltransporte berührt werden.

Aus Gründen des Gesundheitsschutzes des Einzelnen und des Nachweises der Einhaltung der jeweils relevanten Personendosisgrenzwerte kommt der Bestimmung und Bewertung der beförderungsbedingt zu erwartenden Individualdosen bestimmter Personen oder Personengruppen besondere Bedeutung zu. Die durchgeführten Individualdosisabschätzungen konzentrieren sich daher auf die Ermittlung der Strahlenexpositionen repräsentativer Personen, ausgedrückt durch die Individualdosis der jeweiligen Einzelperson oder Personengruppe als Beurteilungsgröße des gebotenen Schutz- und Sicherheitsstandards.

Die Maßeinheit der Individualdosis ist – ausgedrückt als effektive Dosis oder als Äquivalentdosis – die Einheit Sievert, abgekürzt „Sv“, oder Bruchteile dieser Maßeinheit, z. B. Millisievert, abgekürzt „mSv“, oder Mikrosievert, abgekürzt „ μ Sv“. Die so ermittelte oder gemessene Strahlenexposition kann unmittelbar mit einer Strahlenexposition anderer Herkunft einschließlich derjenigen natürlichen Ursprungs verglichen werden.

Die auf dieser Grundlage ermittelten beförderungsbedingten Strahlenexpositionen werden im Folgenden für die verschiedenen verkehrsträgerspezifischen Transport- und Betriebsabläufe (Anlieferungsszenarien) zusammenfassend dargestellt und erläutert.

Transportunfallrisiko:

Transportunfallrisikoanalysen verfolgen im Allgemeinen das Ziel, Transportunfallsituationen hinsichtlich ihres Ablaufes, ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und ihrer Unfallfolgen in ihrer Gesamtheit zu erfassen und zu beschreiben. Dabei sind ausdrücklich auch solche Transportunfallsituationen zu berücksichtigen, die ihrer Natur nach zwar relativ unwahrscheinlich sind, bei denen die auslegungsgemäßen Belastungsgrenzen der betroffenen Abfalltransportbehälter aber überschritten und zu einem Verlust der Behälterintegrität und zu Aktivitätsfreisetzungen führen können.

Diese Methodik und Verfahrensweise zählt zu den fortgeschrittenen Unfallanalyseinstrumentarien und wird auch als probabilistische Unfallrisikoanalyse bezeichnet. Sie ist vor allen anderen Analysemethoden dadurch gekennzeichnet, dass als Beurteilungs- und Bewertungskriterium nicht nur das Schadensausmaß, sondern auch die Schadenseintrittshäufigkeit bzw. -wahrscheinlichkeit angegeben werden kann.

Die Anwendung dieser Methodik und Verfahrensweise setzt aber ein grundlegendes Verständnis und die Verfügbarkeit entsprechender Datenbasen für diverse Einflussparameter einer probabilistischen Unfallrisikoanalyse voraus. Hierzu gehören – neben einer entsprechenden Charakterisierung des verkehrsträgerspezifischen Abfalltransportaufkommens – beispielsweise folgende Informationen:

- Verkehrsträgerspezifisches Abfallbeförderungsaufkommen und die Beförderungsmodalitäten einschl. der Streckenführung
- Unfallstatistische Angaben über Art, Häufigkeit und Schwere potenzieller Transportunfälle für den jeweiligen Verkehrsträger
- Versagen und Versagensausmaß eines Abfalltransportbehälters unter unfallbedingten Lasteinwirkungen (z. B. bei Aufprall, Quetschung, Brand etc.)
- Fraktionierungs- und Freisetzungsverhalten eines radioaktiven Abfallmaterials unter unfallbedingten Lasteinwirkungen (Quellterm)

- Ausbreitungs- und Ablagerungsverhalten partikel- oder gasförmiger Aktivitätsfreisetzungen in der Umgebung des Unfallortes und der damit verbundenen potenziellen Strahlenexpositionen von Personen oder Personengruppen bzw. Umgebungskontamination (z. B. Boden, Bewuchs etc.).

Die diesbezüglichen auf die 1991er Transportstudie Konrad zurückgehenden Unterlagen wurden unter Berücksichtigung des Erfahrungs- und Erkenntnisfortschrittes auf dem Gebiet der Analyse, Bestimmung und Bewertung von Transportrisiken überprüft und – soweit erforderlich – auf der Grundlage des derzeitigen Wissensstandes aktualisiert. Die Überprüfung ergab insbesondere Anpassungs- und Revisionsbedarf im Hinblick auf folgende Sachverhalte: das Beförderungsaufkommen und die Eigenschaften der zur Endlagerung zugelassenen Abfallgebinde, die Beförderungsmodalitäten und Transportwege, die Transportunfallhäufigkeiten auf Straße und Schiene, das Abfallfraktionierungs- und Freisetzungsverhalten unter unfallbedingten Lasteinwirkungen und das Ausbreitungs- und Depositionsverhalten partikelförmiger Aktivitätsfreisetzungen in der Umgebung.

Die Grundlagen und wesentlichen Ergebnisse der Aktualisierung und Anpassung der erforderlichen Modellparameter und Datenbasen zur Durchführung probabilistischer Transportrisikoanalysen werden in den nachfolgenden Kapiteln im Einzelnen dargestellt und erläutert. Die Komplexität der Transportunfallabläufe und der Unfallfolgenmodellierung erfordert notwendigerweise diverse Vereinfachungen bei der modellmäßigen Erfassung und Kategorisierung der relevanten Geschehensabläufe. Die für die Durchführung einer probabilistischen Transportrisikoanalyse erforderlichen Vereinfachungen, Kategorisierungen und Festlegungen erfolgten jedoch durchgehend in einer vorsichtig-konservativen, aber noch realitätsnahen Art und Weise.

3 Bewertungsgrundlagen

Grundlage der Bewertung der mit der Beförderung von radioaktiven Abfällen auf öffentlichen oder der Öffentlichkeit zugänglichen Verkehrswegen einhergehenden radiologischen Auswirkungen sind die für die sichere Beförderung radioaktiver Stoffe maßgeblichen gesetzlichen Regelwerke. In der Bundesrepublik Deutschland sind die auf die Beförderung von radioaktiven Stoffen anwendbaren Rechtsvorschriften im Wesentlichen in zwei Rechtsgebieten angesiedelt: dem Gefahrgutrecht und dem Atomrecht. Die national bindenden Überwachungs- und Verwaltungsvorschriften beider Rechtsgebiete bilden eigenständige Rechtsordnungen und finden unabhängig voneinander Anwendung. Darüber hinaus sind die Endlagerungsbedingungen mit ihren speziellen Anforderungen an radioaktive Abfälle und deren Verpackung zu erfüllen. Zusätzlich sind ggf. weitere gesetzliche Vorschriften und Richtlinien zu beachten, die jedoch im vorliegenden Sachzusammenhang von nachrangiger Bedeutung sind und daher nicht weiter behandelt werden.

Anders als für die Bewertung und Regelung der radiologischen Auswirkungen des normalen (unfallfreien) Transports radioaktiver Stoffe existieren jedoch – praktisch weltweit – keine verbindlichen probabilistisch formulierten Sicherheitsstandards und Akzeptanzkriterien für die Beförderung radioaktiver Stoffe. Die Bewertung des Transportunfallrisikos hinsichtlich der radiologischen Auswirkungen erfolgt im vorliegenden Zusammenhang daher in Anlehnung an den entsprechenden Planungsrichtwert für Störfälle in oder an Kernkraftwerken (§ 49 der Strahlenschutzverordnung /BMU 07a/).

3.1 Gefahrgutrechtliche Transportvorschriften

Die für die sichere Beförderung von radioaktiven Stoffen auf öffentlichen Verkehrswegen wichtigen Regelungen sind in den Gefahrgutvorschriften des Gesetzes über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG) und den aufgrund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen festgelegt.

Die gefahrgutrechtlichen Vorschriften für die Beförderung radioaktiver Stoffe basieren in sachlicher Hinsicht auf den weltweit anerkannten und von der Internationalen Atomenergieorganisation herausgegebenen "Empfehlungen für die sichere Beförderung radioaktiver Stoffe", No. TS-R-1 /IAEA 05/, kurz IAEO-Transportvorschriften genannt. Sie sind ein wichtiges Instrument zur Einführung und Umsetzung eines international harmonisierten Sicherheitskonzeptes für die Beförderung radioaktiver/spaltbarer Stoffe

und zur Gewährleistung eines einheitlich hohen Sicherheitsstandards beim Transport von radioaktiven Gütern im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Güterverkehr sowie bei einem Wechsel des Verkehrsmittels oder Verkehrsträgers (Umschlag).

Die IAEA-Transportvorschriften definieren in Übereinstimmung mit den gefahrgutrechtlichen Vorschriften verschiedene Versandstücktypen (z. B. Freigestellte Versandstücke, Industrie-, Typ A- oder Typ B-Versandstücke), die sich durch abgestufte Auslegungs- und Prüfanforderungen unterscheiden. Der Begriff des Versandstückes bezeichnet die Verpackung mit ihrem radioaktiven Inhalt, wie es zur Beförderung übergeben wird. Für die Beförderung und Anlieferung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad kommen je nach Höhe der Abfallaktivität typischerweise Industrie-, Typ A- oder Typ B-Versandstücke zum Einsatz.

Die für die Beförderung radioaktiver Stoffe oder Abfälle maßgebenden Strahlenschutzgrundsätze und -kriterien basieren auf den von der IAEA herausgegebenen International Basic Safety Standards /IAEA 96/ und entsprechen den 1990er Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission /ICRP 90/. Entsprechend den vorgenannten Strahlenschutzvorschriften darf die aus der bestimmungsgemäßen Beförderung radioaktiver Stoffe und Abfälle resultierende Strahlenexposition von Personen (Bevölkerung/Arbeitskräfte) bestimmte Höchstwerte nicht überschreiten. Die jeweiligen höchstzulässigen Personendosen für die Bevölkerung und für Arbeitskräfte sind in Tab. 3.1 angegeben.

Die von der ICRP empfohlenen Personendosisgrenzwerte sind primäre Grenzwerte. Sie sind Grundlage verschiedener abgeleiteter sekundärer Grenzwerte und Sicherheitsanforderungen wie beispielsweise die nuklidspezifischen Aktivitätsgrenzwerte und die Dosisleistungs- und Kontaminationsgrenzwerte für Versandstücke und Transportfahrzeuge. Die nach den geltenden Transportvorschriften höchstzulässigen Dosisleistungen für Versandstücke und deren Transportmittel sind in Tab. 3.2 angegeben.

Tab. 3.1 Personendosisgrenzwerte für Arbeitskräfte und die Bevölkerung

	Individualdosisgrenzwerte (mSv/a)	
	Arbeitskräfte	Bevölkerung
Effektive Dosis	20 ¹	1
Äquivalentdosis:		
- Augenlinse	150	15
- Haut	500 ²	50 ²
- Extremitäten	500	---
¹ Effektive Dosis gemittelt über einen Zeitraum von fünf aufeinander folgenden Jahren, wobei die effektive Dosis 50 mSv/a für ein einzelnes Kalenderjahr nicht überschreiten darf. ² Grenzwert gilt unabhängig von der exponierten Hautoberfläche für jede Fläche von 1 cm ²		

Tab. 3.2 Dosisleistungsgrenzwerte für Versandstücke und Transportmittel gemäß den gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften

	Dosisleistungsgrenzwerte (mSv/h)		
	Oberfläche	in 1 m Abstand	in 2 m Abstand
Versandstücke:			
Freigestellte Versandstücke Industrie-, Typ A-, Typ B- Versandstücke	0,005 2 ¹	-- 0,1 ²	-- --
Transportmittel:	2	--	0,1
¹ Bei Transporten unter ausschließlicher Verwendung und der Beachtung weiterer einschränkender Bedingungen sind hiervon abweichende höhere Dosisleistungen bis zu 10 mSv/h zulässig ² Abgeleiteter Richtwert			

3.2 Atomrechtliche Transportvorschriften

Der durch die international vereinheitlichten Schutz- und Sicherheitsvorschriften des Gefahrgutbeförderungsrechtes gebildete Ordnungsrahmen zur Gefahrenabwehr und Schadensvorsorge wird durch die nationalstaatlich bindenden Überwachungs- und Verwaltungsvorschriften des Atomrechts konkretisiert und erweitert. So unterliegt die

Beförderung von Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen auf öffentlichen Verkehrswegen grundsätzlich der Genehmigungspflicht. Für die Mehrzahl der Abfalltransporte zum Endlager Konrad ist eine Beförderungsgenehmigung für sonstige radioaktive Stoffe nach § 16 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) erforderlich. Nach § 18 StrlSchV ist diese Genehmigung zu erteilen, wenn sämtliche Genehmigungsvoraussetzungen (z. B. in Bezug auf die Zuverlässigkeit, Fachkunde, Haftung, Einwirkungen Dritter etc.) erfüllt sind. Nur unter bestimmten, eng umgrenzten Voraussetzungen (z. B. Transporte sehr kleiner Aktivitätsmengen) sind sonstige radioaktive Stoffe von der atomrechtlichen Genehmigungs- oder Anzeigepflicht befreit (vgl. § 17 StrlSchV).

Die Beförderungsgenehmigung nach dem Atomrecht enthält ausdrücklich die bindende Verpflichtung zur Beachtung der für den jeweiligen Verkehrsträger geltenden Gefahrgutvorschriften. Die Einhaltung der atomrechtlichen Sicherheitsbestimmungen und Verwaltungsvorschriften wird – ebenso wie die Einhaltung der gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften – von den zuständigen staatlichen Behörden überwacht (Aufsicht). Zuständig für die Transportgenehmigungen gemäß StrlSchV und alle Formen der Kontrolle sind für die hier betrachteten radioaktiven Abfälle das Eisenbahn-Bundesamt für Schienentransporte und die jeweiligen Landesbehörden (wie z. B. Gewerbeaufsichtsämter) für Straßentransporte.

3.3 Endlagerungsbedingungen Konrad

Zur Gewährleistung der Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers sowie eines geordneten Einlagerungsablaufes müssen die radioaktiven Abfälle bestimmten Anforderungen genügen, die bereits vor der Anlieferung und Annahme der Abfälle und Abfallgebinde erfüllt sein müssen. Diese Anforderungen wurden aus den standortspezifischen Sicherheitsanalysen abgeleitet und sind in den vom BfS herausgegebenen Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995 – Schachtanlage Konrad – /BFS 95/ wiedergegeben. Sie beinhalten allgemeine Anforderungen an Abfallgebinde (Grundanforderungen) und die Abfallanlieferung sowie spezielle Anforderungen an die Abfallprodukte und Abfallbehälter sowie Aktivitätsbegrenzungen für einzelne Radionuklide und Radionuklidgruppen.

Nach den Endlagerungsbedingungen ist eine Anlieferung und Einlagerung radioaktiver Abfälle nur in standardisierten Abfallbehältern zulässig, wobei hinsichtlich der Bauform zwischen zylindrischen und quaderförmigen Behältergrundtypen unterschieden wird.

Gemäß den Grundanforderungen an Abfallgebinde darf die Ortsdosisleistung jedes Abfallgebundes an der Oberfläche und in 1 m bzw. 2 m Abstand von der Oberfläche zum Zeitpunkt der Anlieferung die in Tab. 3.3 angegebenen Werte nicht überschreiten.

Darüber hinaus spezifizieren die Endlagerungsbedingungen Konrad in Abhängigkeit vom Abfallprodukt und der Verpackungsart nuklidspezifische Aktivitätsgrenzwerte und Qualitätsmerkmale sowie Auslegungsanforderungen für Abfallbehälter.

Tab. 3.3 Dosisleistungsgrenzwerte für Abfallgebinde gemäß den Endlagerungsbedingungen /BFS 95/

	Dosisleistungsgrenzwerte (mSv/h)		
	Oberfläche	in 1 m Abstand	in 2 m Abstand
Endlagerungsbedingungen:			
Zylindrische Abfallgebinde	2 ¹	0,1	
Quaderförmige Abfallgebinde (Container)	2 ¹		0,1
¹ Grenzwert bezieht sich auf die über die Gebindeoberfläche gemittelte Ortsdosisleistung und darf lokal bis zu 10 mSv/h betragen			

4 Art und Volumen konradgängiger radioaktiver Abfälle

Nach Maßgabe des Planfeststellungsbeschlusses sollen im Endlager Konrad feste und verfestigte radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung mit einem Abfallgebindevolumen von bis zu 303 000 m³ endgelagert werden. Bei den zur Endlagerung zugelassenen Abfällen handelt es sich ausschließlich um radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung deutscher Herkunft aus dem Anwendungsfeld radioaktiver Stoffe in kerntechnischen Anlagen sowie in Forschung, Medizin und Technik; eine Endlagerung von radioaktiven Abfällen ausländischer Herkunft ist nicht zulässig. Der aktuelle bundesweite Bestand an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in behandelter (konditionierter) und unbehandelter Form beträgt den Erhebungen des Bundesamtes für Strahlenschutz zufolge etwa 120 000 m³ (Stand Ende 2007). Abb. 4.1 zeigt beispielhaft ein Zwischenlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Das Abfallvolumen von ca. 120 000 m³ entspricht etwa einem Drittel der genehmigten Einlagerungskapazität des Endlagers Konrad. Das bis zum Jahre 2040 anfallende Gesamtvolumen radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird den BfS-Abfallprognosen zufolge einschließlich des derzeitigen Bestandes auf insgesamt etwa 280 000 m³ geschätzt /KUG 07/.



Abb. 4.1 Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Quelle: FZK)

Die betrieblichen Planungen des Bundesamtes für Strahlenschutz als Genehmigungsinhaber und Endlagerbetreiber sehen – gestützt auf den prognostizierten Endlagerungsbedarf für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bis zum Jahre 2040 – einen einschichtigen Einlagerungsbetrieb mit einer Einlagerungsmenge von etwa 2300 Transporteinheiten pro Jahr bzw. unter Zugrundelegung von 230 Betriebstagen eine Einlagerungskapazität von etwa 50 Transporteinheiten pro Woche vor. Eine Transporteinheit ist eine endlagerungsspezifische Handhabungseinheit radioaktiver Abfälle und bezeichnet entweder ein quaderförmiges Abfallgebinde (Container) oder eine sogenannte Tauschpalette bzw. Transportpalette, die je nach Behältergewicht mit einem oder zwei zylindrischen Abfallgebinden beladen sein kann. Entsprechend den Endlagerungsbedingungen /BFS 95/ darf die Masse einer Transporteinheit 20 Mg nicht überschreiten. Eine jährliche Einlagerungskapazität von 2300 Transporteinheiten entspricht je nach Anteil der angelieferten Behältertypen einem Abfallbehältervolumen (Brutto) von etwa 10 000 - 12 000 m³ pro Jahr.

Die vorliegenden beförderungsspezifischen Untersuchungen gehen davon aus, dass mit Betriebsbeginn des Endlagers Konrad zunächst vorrangig radioaktive Abfälle aus dem bundesweiten Bestand konradgängiger Abfälle angeliefert und eingelagert werden. Zur Erfassung und Bereitstellung der für eine fundierte Abfalltransportsicherheitsanalyse erforderlichen abfallspezifischen Informationen und Basisdaten wurde eine bundesweite Abfalldatenerhebung durchgeführt. Die mit Unterstützung des Bundesamtes für Strahlenschutz durchgeführte Erhebung richtete sich an die Hauptablieferungspflichtigen (Kernkraftwerke, Forschungszentren, Landessammelstellen, kerntechnische Industrie etc.) und hatte das Ziel, belastbare beförderungsrelevante Angaben und Informationen über Arten (Abfallprodukte), Mengen, Eigenschaften (z. B. Aktivitätsinventar) und die Verpackungsform der bereits vorliegenden konradgängigen radioaktiven Abfälle bereitzustellen.

Die von den Ablieferungspflichtigen überlassenen Angaben und Informationen beziehen sich auf ein Abfallgebinderolumen konradgängiger Abfälle von etwa 110 000 m³ (Brutto) und repräsentieren damit mehr als 91 Prozent des bundesweiten Gesamtbestandes radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Sie enthalten insbesondere die Abfallmengen aller wesentlichen Ablieferungspflichtigen und haben somit einen hohen Abdeckungsgrad. Die Datenerhebungen und Analysen zur Ermittlung und Charakterisierung des Abfallbestandes, der Abfalleigenschaften und Abfalltransportaufkommens wurden ergänzt durch Strahlungstransport- und Abschirmungs-

rechnungen zur Ermittlung der Dosisleistungen für jene Abfallgebinde, für die entsprechende ablieferseitige Angaben nicht oder nur eingeschränkt vorlagen.

Hinsichtlich der radiologisch relevanten Abfallprodukt- und Behältereigenschaften für den über das erste Jahrzehnt des Endlagerbetriebes hinausgehenden Zeitraum können nur noch qualitative Entwicklungstrends angegeben werden. Die vorliegende Untersuchung stützt sich insoweit auf das prognostizierte Mengenaufkommen radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung des Bundesamtes für Strahlenschutz für die nächsten Jahrzehnte und die typischen Abfallprodukteigenschaften derartiger Abfälle aus verschiedenen Herkunftsbereichen.

Der auf der vorgenannten Abfalldatenerhebung und den dazu ergänzend durchgeführten Untersuchungen beruhende Erkenntnistand über Art, Aufkommen, Eigenschaften und die Verpackungsform der zur Anlieferung und Endlagerung vorgesehenen und zugelassenen radioaktiven Abfälle wird in Verbindung mit den Grundanforderungen an Abfallprodukte und Abfallgebinde im Folgenden zusammenfassend dargestellt und erläutert.

4.1 Abfallarten und allgemeine Anforderungen an Abfallprodukte

Die zur Anlieferung und Endlagerung im Endlager Konrad zugelassenen radioaktiven Abfälle und deren Verpackung müssen vor allem bestimmten sicherheitstechnischen und endlagerungsrelevanten Anforderungen genügen, die bereits vor der Anlieferung im Endlager erfüllt sein müssen. Detaillierte Anforderungen sind in den Endlagerungsbedingungen /BFS 95/ festgelegt. Insbesondere dürfen Abfälle nur in endlagerfähigen Abfallbehältern angeliefert werden. Zur Gewährleistung der Einhaltung der in den Endlagerungsbedingungen festgelegten Anforderungen und Spezifikationen unterliegen die endzulagernden radioaktiven Abfälle der Produktkontrolle.

Radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung fallen in den Bereichen der Kerntechnik, der Forschung, Medizin und Industrie an. Sie liegen ursprünglich in verschiedenen Arten von Rohabfällen vor, wie z. B.:

- Flüssigkeiten, Konzentrate, Schlämme
- Ionenaustauscherharze
- kompaktierbare und/oder brennbare Feststoffe

- formbeständige Feststoffe, z. B. Bau- und Anlagenteile
- Filter, Filterkerzen.

Zur Erfüllung der in den Endlagerungsbedingungen spezifizierten Grundanforderungen werden die Rohabfälle, soweit sie nicht bereits in fester Form vorliegen, verfestigt, wobei als Verfestigungsmittel vornehmlich Zement und Beton, vereinzelt aber auch Bitumen und Kunststoffe Verwendung finden. Darüber hinaus werden z. B. Verdampferkonzentrate eingedampft. Abfälle, die faulen, gären oder in flüssiger Form vorliegen oder nennenswerte Anteile in dieser Form beinhalten, sind nicht zur Endlagerung zugelassen.

Die verschiedenen radioaktiven Abfälle sind so zu Abfallprodukten zu verarbeiten, dass sie einer der im Folgenden genannten Abfallproduktgruppen (APG) zugeordnet werden können /BFS 95/:

- APG 01: z. B. Bitumen- und Kunststoffprodukte
- APG 02: z. B. Feststoffe
- APG 03: z. B. metallische Feststoffe
- APG 04: z. B. Presslinge
- APG 05: z. B. zementierte/betonierte Abfälle
- APG 06: z. B. Konzentrate

Diese Unterteilung entsprechend den Produkteigenschaften ist in Bezug auf das Freisetzungsverhalten bei Störfällen und Unfällen von Bedeutung. Neben den Qualitätsmerkmalen der Abfallproduktgruppen werden in den Endlagerungsbedingungen auch die entsprechenden zulässigen Aktivitätsgrenzwerte sowie Anforderungen an die Abfallbehälter festgelegt.

4.2 Abfall- und Transportbehältertypen

Handhabung und Einlagerungsablauf der Abfallgebinde setzen ein auf die sicherheitstechnischen und betrieblichen Belange des Endlagers abgestimmtes System standardisierter Abfallbehälter voraus. Zu diesem Zweck werden in den Endlagerungsbedin-

gungen insgesamt 11 Behältergrundtypen beschrieben, die sich nach ihrer Bauform und dem Behältermaterial in drei Gruppen einteilen lassen:

- zylindrische Betonbehälter
- zylindrische Gussbehälter
- quaderförmige Container (aus Stahlblech, Guss oder Beton).

Die zur Endlagerung zugelassenen Abfallbehälter unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Konstruktion, Größe, Wandstärke und Masse (vgl. Tab. 4.1). Die Abfallbehälter/Verpackungen müssen den in den Endlagerungsbedingungen definierten Anforderungen genügen. Die Einhaltung dieser Anforderungen muss in Bauartprüfungen nachgewiesen werden.

Zylindrische Betonbehälter (Abb. 4.2 links) bestehen im Allgemeinen aus einem stahl-armierten Betonkörper aus Normal- oder Schwerbeton, in den meist ein mit radioaktivem Abfall gefüllter Innenbehälter, z. B. ein 200 l- oder 400 l-Blechfass (Abb. 4.3), eingesetzt wird. Der verbleibende Ringspalt und der Kopfbereich des Behälters werden mit Beton vergossen.



Abb. 4.2 Betonbehälter (links) und Gussbehälter (rechts) (Quelle: BfS)

Bei Gussbehältern in zylindrischer Ausführung (Abb. 4.2 rechts) handelt es sich um dickwandige Gebinde aus Gusswerkstoff, die u. a. für die Verpackung von unfixierten radioaktiven Abfällen mit vergleichsweise hoher Aktivität eingesetzt werden und hinsichtlich ihrer Wandstärke und deren Abschirmwirkung dem endzulagernden Abfallprodukt angepasst werden können. Diese Gebinde werden mit einem Deckel aus dem

gleichen Material verschlossen, der mit dem Behälterkörper entweder verschraubt oder verschweißt wird.



Abb. 4.3 200 I-Blechfässer (Quelle: HDB)

Container (Abb. 4.4) sind quaderförmige Behälter, die aus mindestens 3 mm dickem Stahlblech, armiertem Beton oder Gusswerkstoff gefertigt sind. Sie werden vornehmlich zur Aufnahme von 200 I- oder 400 I-Fässern oder von größeren, kontaminierten bzw. aktivierten Bauteilen und Komponenten aus der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen eingesetzt. Die größten Container (Container Typ V) sind konstruktiv so gestaltet, dass sie bis zu 28 Fässer à 200 l bzw. 14 Fässer à 400 l aufnehmen können. Die Container werden mit einem Deckel aus dem gleichen Material verschlossen, der entweder mit dem Grundkörper verschraubt oder mittels Zuganker arretiert wird. Das Gesamtgewicht eines quaderförmigen Abfallgebindes darf 20 Mg nicht überschreiten.



Abb. 4.4 Konrad-Container Typ IV (Quelle: HDB)

Tab. 4.1 gibt eine Übersicht über die Abmessungen und Massen der standardisierten Abfallbehältertypen. Die an sie gestellten Auslegungs- und Qualitätsanforderungen sind in den Endlagerungsbedingungen spezifiziert.

Tab. 4.1 Behältergrundtypen für die Verpackung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, nach /BFS 95/

Nr.	Bezeichnung	Außenabmessungen			Bruttovolumen (m ³)	Gebindemasse (Mg)
		Länge/ Durchmesser (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)		
1	Betonbehälter Typ I	Ø 1060	–	1370 ¹	1,2	ca. 3...6
2	Betonbehälter Typ II	Ø 1060	–	1510 ²	1,3	ca. 4...6
3	Gussbehälter Typ I	Ø 900	–	1150	0,7	ca. 3...7
4	Gussbehälter Typ II	Ø 1060	–	1500 ³	1,3	ca. 5...7
5	Gussbehälter Typ III	Ø 1000	–	1240	1,0	ca. 3...6
6	Container Typ I	1600	1700	1450 ⁴	3,9	max. 20
7	Container Typ II	1600	1700	1700	4,6	max. 20
8	Container Typ III	3000	1700	1700	8,7	max. 20
9	Container Typ IV	3000	1700	1450 ⁴	7,4	max. 20
10	Container Typ V	3200	2000	1700	10,9	max. 20
11	Container Typ VI	1600	2000	1700	5,4	max. 20

¹ Höhe 1370 mm + Lasche von 90 mm = 1460 mm
² Höhe 1510 mm + Lasche von 90 mm = 1600 mm
³ Höhe 1370 mm beim Typ KfK
⁴ Stapelhöhe 1400 mm beim Typ KfK

Aus sicherheitstechnischer Sicht werden die Abfallbehälter in zwei sogenannte Abfallbehälterklassen (ABK) eingeordnet. Für die ABK I werden Anforderungen an die mechanische Stabilität und thermische Beständigkeit eines Abfallbehälters definiert, für die ABK II sind Anforderungen an die Dichtigkeit des Abfallbehälters nach einem Fall auf eine unnachgiebige Unterlage und nach einem Schadensfeuer beschrieben. Weiterhin wird zwischen störfallfesten und nicht störfallfesten Verpackungen unterschieden. In störfallfesten Verpackungen müssen die Abfälle formstabil fixiert oder in Innenbehältern verpackt sein, die ihrerseits formstabil vergossen sind. Die speziellen sicherheitstechnischen Anforderungen sind abhängig von der Abfallbehälterklasse.

Diese Abfallbehälterklassifizierung nach den Endlagerungsbedingungen ist unabhängig zu sehen von der gefahrgutrechtlichen Einordnung der zu befördernden Abfallbehälter (siehe Abschnitt 3.1). In vielen Fällen erfüllen die Abfallgebilde selbst nicht die Anforderungen für Versandstücke im Sinne des Gefahrgutrechtes, so dass für den Transport ins Endlager qualifizierte Zusatzverpackungen oder Container zum Einsatz kommen (z. B. 20'-Frachtcontainer mit einer Einstufung als IP-2-Versandstück, in die das Abfallgebilde eingestellt wird). Einige konradgängige Abfallbehälter erfüllen dagegen selbst die gefahrgutrechtlichen Anforderungen und können somit ohne Zusatzverpackung transportiert werden. Dies trifft z. B. für eine Reihe von Gussbehältern Typ II zu, die in Kombination mit einer sogenannten Transportpalette mit integriertem Stoßdämpfer über eine Zulassung als Typ B(U)-Versandstück verfügen.

4.3 Abfalldatenerhebung

Für den Zweck dieser Transportstudie wurde durch die GRS in den Jahren 2007 und 2008 mit Unterstützung des Bundesamtes für Strahlenschutz eine umfangreiche Datenerhebung über die derzeit in Deutschland vorhandenen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bei den wesentlichen Verursachern und Ablieferungspflichtigen durchgeführt. Im Rahmen dieser Abfalldatenerhebung sollten die Abfallverursacher (für die Hauptabfallströme) die zur Ablieferung an das Endlager Konrad vorgesehenen Abfallgebilde charakterisieren. Als Mindestanforderung wurden im Allgemeinen folgende Angaben erbeten und zur Verfügung gestellt:

- Abfallherkunft
- Abfallart
- Fixierungs-/Konditionierungsform (tatsächliche oder vorgesehene)
- Verpackungsform (tatsächliche oder vorgesehene)
- (voraussichtliche) Anzahl der anzuliefernden Abfallbehälter
- Aktivitätsinventar und Nuklidzusammensetzung
- Masse des Abfallgebildes
- Ortsdosisleistung der Abfallgebilde.

Die Mitwirkung an dieser Datenerhebung erfolgte auf freiwilliger Basis, die Kooperationsbereitschaft war jedoch sehr hoch. Die erhobene Datenbasis umfasst somit umfangreiche Angaben zu den vorhandenen radioaktiven Abfällen aller maßgeblichen Abfallablieferer in Deutschland.

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung befand sich die Planung bzgl. der Konditionierung und Verpackung konradgängiger radioaktiver Abfälle seitens der Ablieferungspflichtigen in sehr unterschiedlichen Stadien. Nicht alle Ablieferungspflichtigen verfügten über bereits endlagergerecht konditionierte und verpackte Abfälle. Sofern den Ablieferungspflichtigen noch nicht bekannt war, welche endgültige Verpackungsform favorisiert wird, wurden zumindest Angaben zu den in Fässern verpackten Abfällen gemacht. Dabei konnte es sich ebenso um fertig konditionierte Abfallprodukte handeln wie um noch nicht konditionierte bzw. noch nachzukonditionierende Abfälle.

Die zur Verfügung gestellten Daten der Ablieferungspflichtigen wurden in einer Datenbank erfasst. In einer begrenzten Zahl von Fällen wurden fehlende Angaben durch ergänzende Untersuchungen oder Rückfragen vervollständigt. Beispielsweise konnten in einigen Fällen Angaben zu den Dosisleistungswerten der Abfallgebinde nur unvollständig zur Verfügung gestellt werden (z. B. nur für die Abfallfässer und nicht für das konradgängige Abfallgebinde). Diese fehlenden Angaben wurden daher ggf. durch ergänzende Abschirmrechnungen sowie vergleichende Betrachtungen komplettiert. Konnten generell nur Angaben zu den (vor-)konditionierten Abfällen bzw. Abfallfässern selbst gemacht werden, wurden diese nach Angaben der Ablieferungspflichtigen in sogenannte virtuelle Konradbehälter bzw. -container eingestellt, d. h. sie wurden gemäß ihrer voraussichtlichen Verpackungsform und ihren Eigenschaften (z. B. Aktivitätsinventar und Konditionierungsart) einem Behältergrundtyp (siehe Abschnitt 4.2) konservativ zugeordnet.

Beim Aktivitätsinventar wiederum beinhalteten die Daten der Ablieferungspflichtigen teilweise nur Angaben für die Hauptnuklide und die Gesamtaktivität. Die Angaben berücksichtigten darüber hinaus überwiegend keine Korrektur durch radioaktiven Zerfall für ein Referenzdatum. In ersterem Fall wurde die geringe Differenz zwischen angegebener Gesamtaktivität und der Summe der Aktivitäten der Einzelnuklide für die nachfolgenden Betrachtungen als unspezifizierter Alphastrahler bzw. Beta-/Gammastrahler in der Datenbank ergänzt. In letzterem Fall bezogen sich die zur Verfügung gestellten Aktivitätsangaben meist auf den Zeitpunkt der erstmaligen Erfassung des entsprechenden Abfalls in dem jeweiligen Abfallerfassungssystem des Verursachers. Die Akti-

vitätsangaben stellen somit abdeckende Werte für das zu erwartende Abfallspektrum dar.

Auf Grundlage der ergänzten Abfalldatenbank wurden insgesamt 153 sogenannte Referenzabfälle gebildet, die sich nach Herkunft und Art des Abfalls, der Verpackungsform und Fixierung sowie Nuklidzusammensetzung und Aktivitätsmenge unterscheiden.

4.4 Abfallmengen- und Beförderungsaufkommen

Die zur Einlagerung im Endlager Konrad bestimmten radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung müssen in für das Endlager Konrad zugelassenen Abfallbehältern angeliefert werden. Diese Behälter unterscheiden sich aufgrund der verschiedenen Bauformen (siehe Tab. 4.1) auch in ihren Außenabmessungen und somit in ihrem Volumen. Zur Bestimmung der Menge der endzulagernden Abfälle wird dieses Volumen der anzuliefernden Abfallgebinde herangezogen (Bruttovolumen).

Die in den Jahren 2007 und 2008 durchgeführte Datenerhebung erfasst Abfälle mit einem Bruttovolumen von etwa 110 000 m³. Dabei erfolgte die Angabe des verwendeten bzw. vorgesehenen Behältertyps meist durch den Ablieferungspflichtigen. In Einzelfällen, in denen diese Angaben noch nicht abschließend festgelegt waren, z. B. weil die radioaktiven Abfälle noch nachzukonditionieren waren, wurde die voraussichtliche Verpackungsform angegeben. Diese Abfälle wurden unter Berücksichtigung ihrer Eigenschaften wie z. B. Abfallart, Aktivität, Konditionierung, Menge und Ortsdosisleistung konservativ einem bestimmten Abfallbehältertyp zugeordnet.

Die Abfalldatenbank enthält Angaben zu etwa 20 400 Transporteinheiten konradgängiger radioaktiver Abfälle unterschiedlicher Ablieferungspflichtiger. Für Vergleichszwecke wurden die Abfallmengendaten auf 2300 Transporteinheiten normiert, was nach den derzeitigen Planungen dem jährlichen Abfallbeförderungsaufkommen entspricht. In Abb. 4.5 ist der erfasste Abfallbestand – aufgeteilt nach den folgenden Herkunftsbereichen – dargestellt:

- Forschungseinrichtungen,
- Betrieb und Stilllegung von Kernkraftwerken (KKW),

- Betrieb und Rückbau von Anlagen der kerntechnische Industrie (z. B. Brennelementfertigung),
- Landessammelstellen (LSS) und Sammelstelle der Bundeswehr (BW).

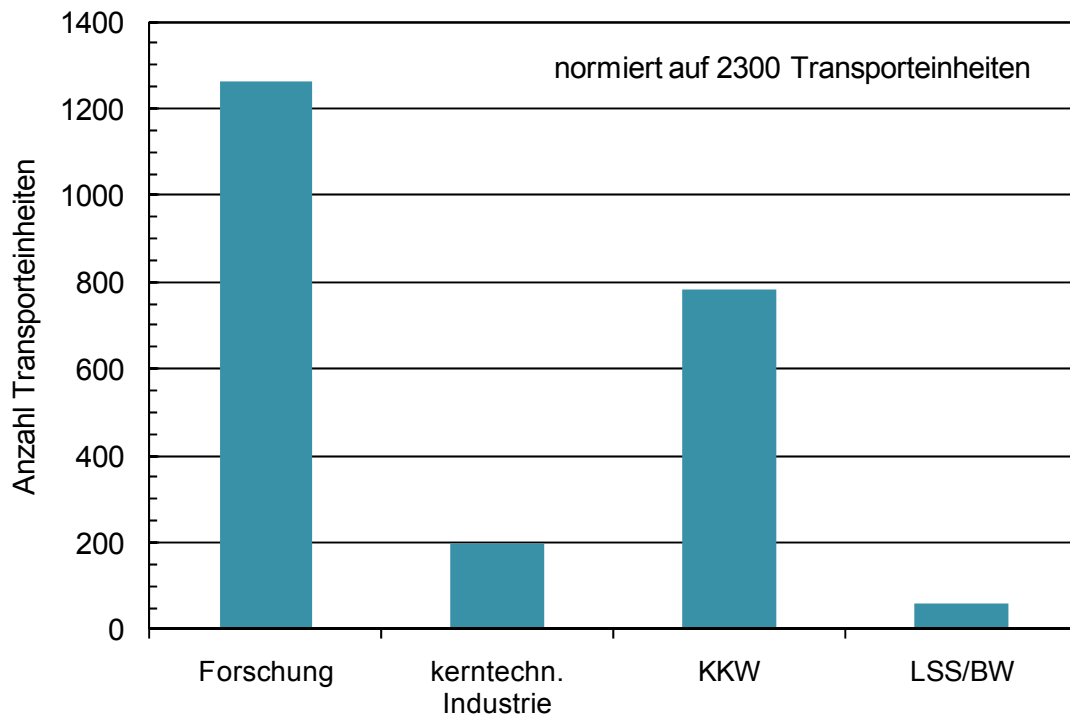


Abb. 4.5 Aufschlüsselung des Abfallbestandes bzw. jährlichen Abfallbeförderungsaufkommens nach Herkunftsbereichen

Nach Abb. 4.6 haben gemäß der Abfalldatenerhebung radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aus Forschungseinrichtungen den größten Anteil (55 %) am derzeitigen Abfallbestand bzw. Abfallbeförderungsaufkommen, gefolgt von Betriebs- und Stilllegungsabfällen aus Kernkraftwerken mit 34 %. Hinzu kommen noch radioaktive Abfälle aus sonstigen Anlagen der kerntechnischen Industrie (9 %) sowie von Landessammelstellen und der Sammelstelle der Bundeswehr mit etwa 2 %.

Die Übersicht der Transporteinheiten nach Behältertypen in Abb. 4.7 zeigt, dass bei zylindrischen Abfallgebinden der Betonbehälter Typ I der häufigste genutzte Abfallbehälter ist, gefolgt vom Gussbehälter Typ II, während bei den quaderförmigen Abfallbehältern der Container Typ IV vorherrscht. Insgesamt entfallen 24 % der Transporteinheiten auf zylindrische Betonbehälter und 15 % auf zylindrische Gussbehälter (Abb. 4.8). Den größten Anteil am Beförderungsaufkommen mit 61 % stellen somit die Container in den verschiedenen Bauformen.

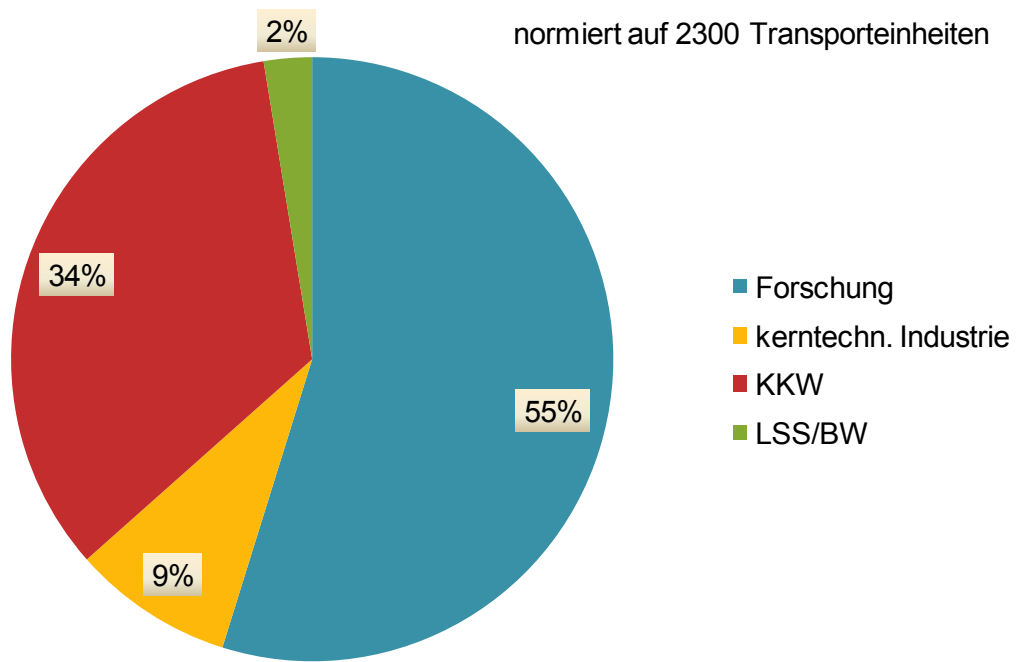


Abb. 4.6 Prozentuale Anteile der Herkunftsbereiche des erwarteten Abfallbeförderungsaufkommens

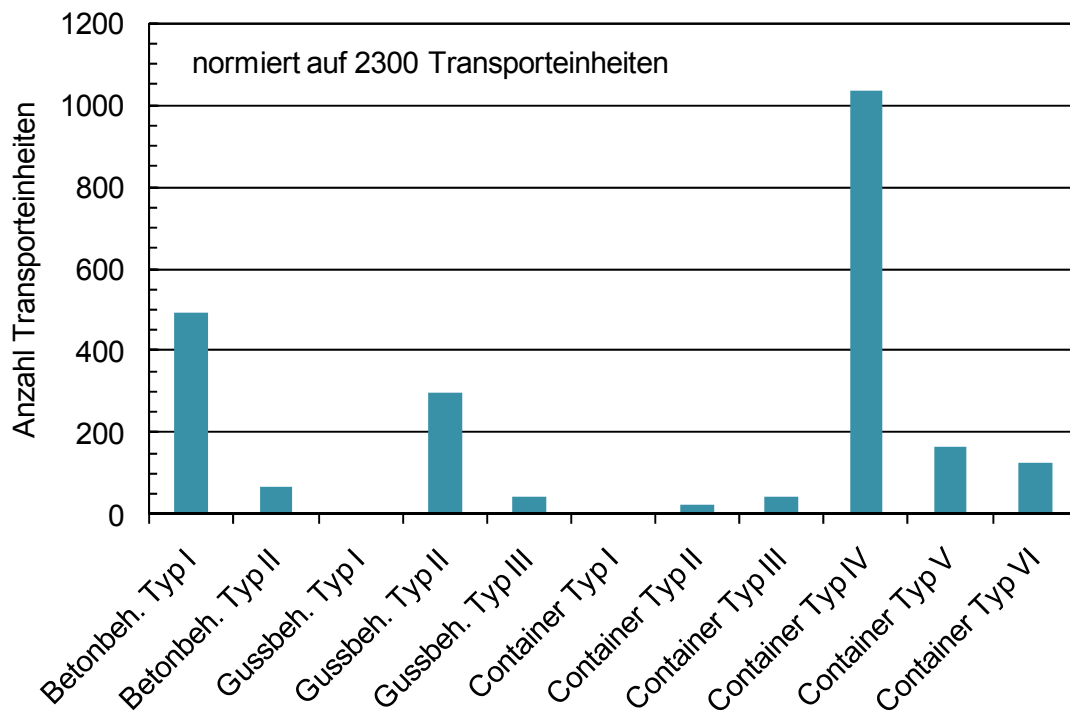


Abb. 4.7 Erwartete Transporteinheiten pro Jahr nach Behältertypen sortiert

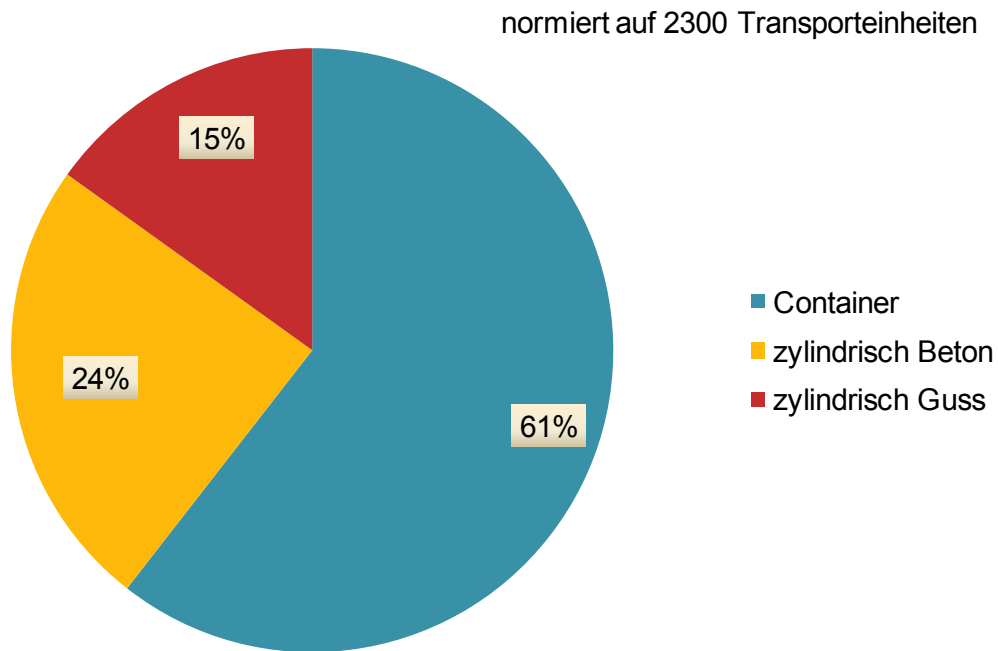


Abb. 4.8 Prozentuale Anteile der Gebindetypen an den Transporteinheiten

Die vorgenannten Angaben zu den in der Datenbank erfassten konradgängigen radioaktiven Abfällen sind insbesondere als repräsentativ anzusehen für die im ersten Betriebsjahrzehnt anzuliefernden Abfallströme und die entsprechenden Mengengerüste. Die vom BfS durchgeführten Erhebungen und Prognosen zum langfristigen Abfallaufkommen in Deutschland lassen erkennen, dass längerfristig insbesondere Änderungen hinsichtlich der Abfallherkunft zu erwarten sind. Die Langzeitprognosen zeigen, dass u. a. aufgrund des Ausstiegsbeschlusses bzgl. der nuklearen Energieerzeugung in den kommenden Jahrzehnten mit einem vermehrten Anfall von radioaktiven Abfällen aus der Stilllegung und dem Rückbau von KKW zu rechnen ist. Weiterhin werden kontinuierlich radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung z. B. aus dem Bereich Forschung und bei den Sammelstellen der Länder und der Bundeswehr anfallen.

Für zukünftig anfallende radioaktive Abfallströme, die erwartungsgemäß erst nach den ersten 10 Betriebsjahren im Endlager Konrad angeliefert und endgelagert werden, muss daher von einer veränderten Zusammensetzung des Abfallbeförderungsaufkommens ausgegangen werden. Nehmen die Forschungsabfälle nach dem derzeitigen in der Datenbank erfassten Bestand radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bisher den größten Teil (ca. 56 %) des Abfallbruttovolumens ein (siehe Abb. 4.9), so wird den Prognosen des BfS zufolge im Jahr 2040 etwa 58 % des erwar-

teten kumulierten Abfallvolumens von insgesamt etwa 280 000 m³ aus dem Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken in Deutschland stammen (derzeit ca. 31 % von etwa 110 000 m³). Dabei werden die Stilllegungsabfälle den derzeitigen Schätzungen zufolge etwa 90 % des gesamten Abfallvolumens aus dem Bereich der KKW ausmachen. Bei dieser Bilanzierung werden nur die anfallenden radioaktiven Abfallströme betrachtet und nicht die davon abzugrenzenden Reststoffströme, die meist in Form von (sehr schwach radioaktivem) Beton den Großteil der beim Rückbau anfallenden Materialien ausmachen und freigegeben werden können.

Nach den vorliegenden Erfahrungen und Prognosen kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Hauptabfallströmen und -mengen aus den zu erwartenden Stilllegungsabfällen überwiegend um schwachradioaktive Abfälle (mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) handelt. Art und Eigenschaften der aus der Stilllegung anfallenden Abfallströme variieren jedoch in weiten Grenzen und umfassen beispielsweise neben schwachradioaktiven Materialien, kontaminierten Komponenten und Sekundärabfällen auch wärmeentwickelnde aktivierte Bauteile und Komponenten (in kleinen Mengen). Die Eigenschaften der Stilllegungsabfälle hinsichtlich z. B. des Aktivitätsinventars und der Nuklidzusammensetzung werden nach derzeitiger Einschätzung nicht wesentlich von dem in der Datenbank abgebildeten Abfallspektrum abweichen. Gewisse Beurteilungsunsicherheiten liegen dagegen im Bereich der zukünftigen Verfahrensweise bezüglich der Konditionierungsart und Verpackungsform, die sich auf das zu erwartende Abfallvolumen auswirken kann.

Hinsichtlich des für die weiteren Betrachtungen wichtigen Aktivitätsinventars und der Nuklidzusammensetzung wird sowohl die Bandbreite der Stilllegungsabfälle als auch die „frischer“ Betriebsabfälle (sowohl explizit als auch aufgrund der teilweise fehlenden Zerfallskorrektur) durch das in der Datenbank enthaltene Abfallspektrum abgedeckt. Die kumulierte Gesamtaktivität der in der Datenbank erfassten Abfallgebinde wird dabei maßgeblich durch die radioaktiven Abfälle aus dem Bereich der KKW (Betrieb und Stilllegung) bestimmt (vgl. auch Abschnitt 5.2). Nach derzeitiger Einschätzung ist das in der Datenbank erfasste Abfallgebindingespektrum daher abdeckend auch für zukünftig anfallende Abfallströme, die nach dem ersten Betriebsjahrzehnt im Endlager Konrad angeliefert werden.

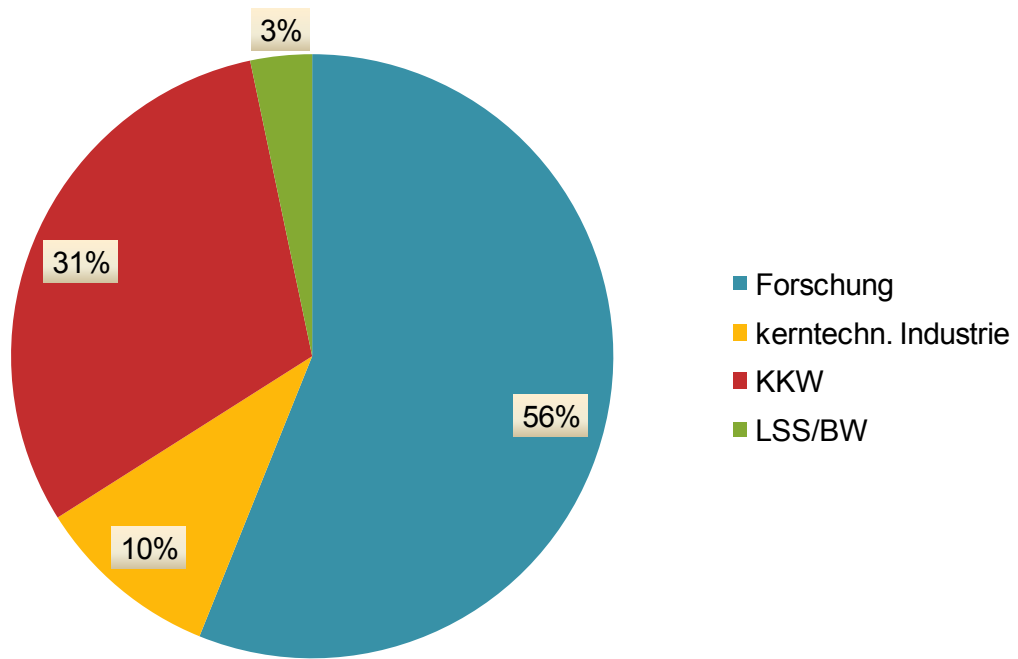


Abb. 4.9 Prozentuale Anteile der Herkunftsbereiche am Bruttovolumen der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

5 Radiologische Charakterisierung der Abfall- und Transportbehälter

Neben den Eigenschaften der Abfall- und Transportbehälter selbst und des zu erwartenden Transportaufkommens sind insbesondere die radiologischen Charakteristika der radioaktiven Abfälle, wie z. B. das Aktivitätsinventar, wichtige Eingangsdaten für die nachfolgenden Betrachtungen. Die in der Datenbank erfassten Abfallgebinde wurden hinsichtlich ihrer radiologischen Merkmale auf die Kompatibilität mit den gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften sowie den Endlagerungsbedingungen hin überprüft, um sicherzustellen, dass bei den weiteren Untersuchungen z. B. keine unrealistischen Kombinationen aus Abfallprodukt und Abfallbehälter verwendet werden. Die dabei anzuwendenden Anforderungen sowie die Ergebnisse der Datenbankanalyse hinsichtlich der radiologischen Eigenschaften der Abfallgebinde werden nachfolgend kurz erläutert.

5.1 Anforderungen

Neben den Begrenzungen bzgl. der Ortsdosisleistung gelten für die Abfallbehälter zusätzliche Beschränkungen hinsichtlich der maximal zulässigen Aktivitäten, die sich sowohl aus den Transportvorschriften als auch aus den Endlagerungsbedingungen /BFS 95/ ergeben. Gemäß den Endlagerungsbedingungen sind für die Abfallgebinde verschiedene nuklidspezifische Aktivitätsbegrenzungen festgelegt, die sich jeweils aus der Sicherheitsanalyse für den bestimmungsgemäßen Betrieb des Endlagers Konrad, der Störfallanalyse, der Untersuchungen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins bzw. den Analysen zur Kritikalitätssicherheit ableiten. Dabei gelten die Aktivitätsbegrenzungen unabhängig voneinander und der jeweils restriktivste muss in einem Abfallgebinde eingehalten werden.

Die Aktivitätsgrenzwerte der radiologisch wichtigsten Radionuklide (Leitnuklide) und weiterer Nuklide, die für die Betrachtungen im Rahmen dieser Transportstudie relevant sind, ergeben sich in Abhängigkeit von der Abfallbehälterklasse und Abfallproduktgruppe aus der Störfallanalyse für das Endlager. Liegen die radioaktiven Abfälle in den Gebinden als Nuklidgemische vor, so sind die einzelnen Aktivitätsanteile gewichtet mit dem jeweiligen Grenzwert des Einzelnuklides zu summieren und ggf. mit einem Faktor zu multiplizieren (Summenkriterium). Dieser sogenannte Summenwert eines Gebindes muss kleiner eins sein.

Je nach Art des zu transportierenden radioaktiven Materials können zusätzlich noch weitere Bestimmungen zur Anwendung kommen. Die gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften unterscheiden beispielsweise zwischen verschiedenen Arten von radioaktiven Stoffen, wie z. B. solche mit geringer spezifischer Aktivität (low specific activity material, LSA) und weitere Untergruppen. Derartige radioaktive Abfälle können beispielsweise als radioaktive Stoffe der Gruppe LSA-II in Industrierversandstücken Typ IP-2 transportiert werden, wenn die entsprechenden Bedingungen (z. B. Aktivitätsbeschränkungen) erfüllt sind. Für größere Aktivitätsmengen kommen ggf. auch Versandstücke vom Typ A oder Typ B (z. B. Gussbehälter auf einer Transportpalette mit entsprechender Zulassung) oder Abfallbehälter vergleichbarer Bauart zum Einsatz.

5.2 Aktivitätsinventar

Aufgrund der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Abfalldatenerhebung liegen in Verbindung mit den ergänzenden Untersuchungen umfassende Angaben über die Art, Menge und Zusammensetzung der in den Abfällen enthaltenen Aktivitäten vor. Die von den Ablieferungspflichtigen bereitgestellten Aktivitätsangaben sind jedoch teilweise nicht zerfallskorrigiert und repräsentieren somit obere Anhaltswerte.

Die Abfallbinde und das entsprechende Aktivitätsinventar wurden hinsichtlich der Transportvorschriften (z. B. Kriterien für LSA-II) sowie der Endlagerungsbedingungen Konrad (Summenkriterium der Aktivitätsgrenzwerte aus der Störfallanalyse) auf Plausibilität geprüft. In Abb. 5.1 wird die Häufigkeitsverteilung der mittleren Aktivität pro Transporteinheit für die Referenzabfälle gezeigt. Die Abbildung zeigt einen Variationsbereich von etwa acht Größenordnungen. Dabei beinhalten die Transporteinheiten mehrheitlich radioaktive Abfälle mit mittleren Aktivitäten zwischen $1 \cdot 10^9$ Bq und $1 \cdot 10^{13}$ Bq je Transporteinheit.

Die Verteilung der (kumulierten) Gesamtaktivität der in der Datenbank erfassten radioaktiven Abfälle in Abb. 5.2 zeigt, dass Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken bzw. Abfälle aus deren Stilllegung den größten Beitrag an der Aktivität (ca. 81 %) haben. Der Bereich Forschung sowie die kerntechnische Industrie sind nahezu mit dem gleichen Anteil (10 % bzw. 8 %) an der Gesamtaktivität beteiligt.

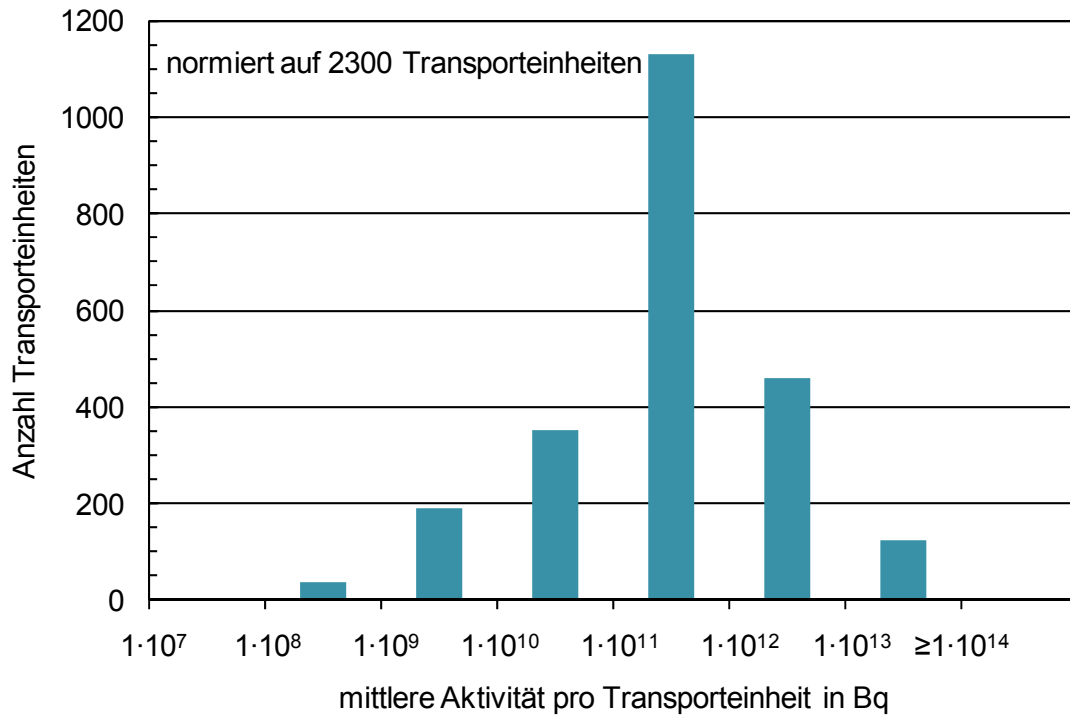


Abb. 5.1 Häufigkeitsverteilung der Aktivität pro Transporteinheit (Mittelwerte je Referenzabfall)

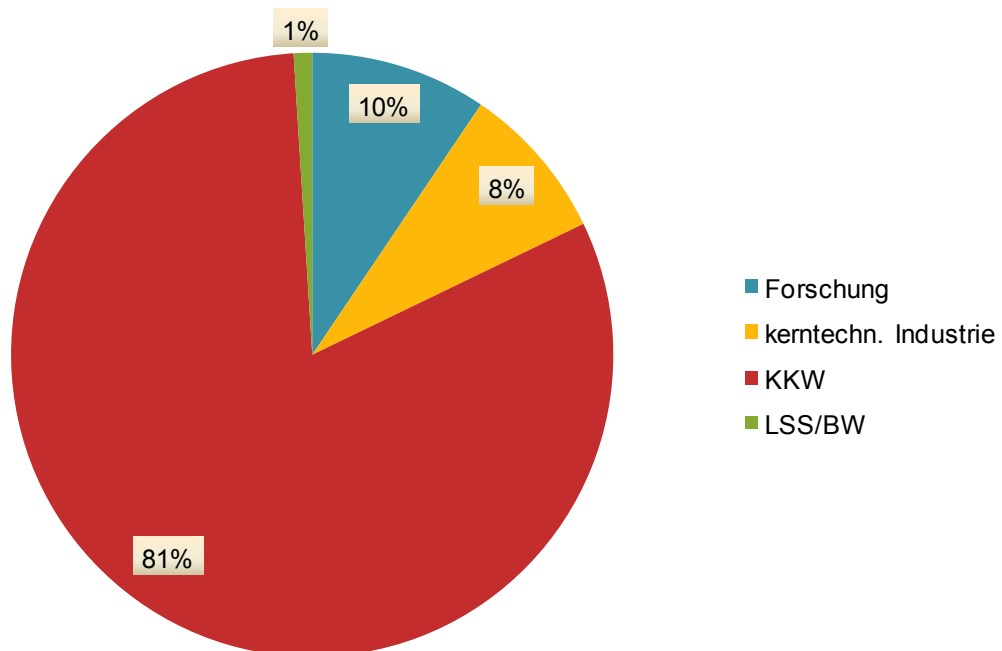


Abb. 5.2 Anteile der Herkunftsbereiche an der in den Abfällen enthaltenen Aktivität

Für zahlreiche Referenzabfälle liegen auch detailliertere Informationen zur Häufigkeitsverteilung des Aktivitätsinventars der Abfallgebinde vor. Es zeigen sich dabei ebenfalls Verteilungen der Aktivität über mehrere Größenordnungen.

In der Datenbank sind insgesamt etwa 75 verschiedene in den Abfällen enthaltene Radionuklide mit unterschiedlichen Halbwertszeiten erfasst. Viele dieser Nuklide sind zum Teil nur mit geringen Aktivitätsmengen in den Abfällen vorhanden. Die wesentlichen Radionuklide, die aufgrund ihrer Aktivitätsmenge oder aus radiologischen Gesichtspunkten wichtig sind, werden in Tab. 5.1 aufgelistet.

Tab. 5.1 Radionuklide mit erheblichem Aktivitätsanteil bzw. hoher radiologischer Relevanz

Radionuklid	Halbwertszeit	Strahlungsart
H-3	12,3 a	β
C-14	$5,7 \cdot 10^3$ a	β
Fe-55	2,7 a	β, γ
Co-60	5,3 a	β, γ
Ni-63	100,0 a	β
Sr-90	28,5 a	β
Cs-137	30,2 a	β, γ
Eu-154	8,8 a	β, γ
Pu-238	87,7 a	α
Pu-239	$2,4 \cdot 10^4$ a	α
Pu-241	14,4 a	β, γ
Am-241	432,6 a	α

5.3 Ortsdosisleistung

Neben den Angaben zu den in dem Abfall enthaltenen Radionukliden und den entsprechenden Aktivitäten wurden in der Datenbank auch die für die Berechnung der Strahlenexposition (vgl. Abschnitt 7.1) wichtigen Angaben zur Behälterdosisleistung erfasst. Die von dem radioaktiven Abfallprodukt ausgehende γ-Strahlung kann durch das Behälter-, Fixierungs- und evtl. Abschirmmaterial im Allgemeinen nicht vollständig abgeschirmt werden und führt so zu einem über den Abfallbehälter hinausreichenden Strahlungsfeld. Die Intensität dieses Strahlungsfeldes und die damit verbundene Ortsdosisleistung (ODL) sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Sie werden entscheidend durch die Aktivitätsmenge, Strahlungsart und -energie und die Abschirmwirkung des Fixierungs- und Behältermaterials bestimmt.

Der prinzipielle räumliche Verlauf der Ortsdosisleistung eines typischen Gebindes mit radioaktiven Abfällen – hier beispielhaft für einen mit radioaktivem Abfall befüllten Container Typ IV aus Stahlblech – ist in Abb. 5.3 dargestellt. Der nach den Endlagerungsbedingungen geltende Grenzwert für quaderförmige Behälter von 0,1 mSv/h in 2 m Abstand von der Behälteroberfläche wird für den im Beispiel betrachteten Container deutlich unterschritten. Der Kurvenzug illustriert anschaulich, dass die Ortsdosisleistung mit wachsendem Abstand von der Behälterwandung sehr rasch abfällt. Bereits ab ca. 10 m Entfernung wird ein Niveau erreicht, welches geringer ist als die durch die kosmische Strahlung verursachte Dosisleistung bei einem Transkontinentalflug (etwa 2 μ Sv/h – das entspricht 0,002 mSv/h – in 8 km Höhe und bis zu 11 μ Sv/h in 12 km Flughöhe /FRA 07/). In einer Entfernung von etwa 40 m vom Container befindet sich die Ortsdosisleistung des Abfallcontainers bereits im Größenordnungsbereich der natürlichen Umgebungsstrahlung.

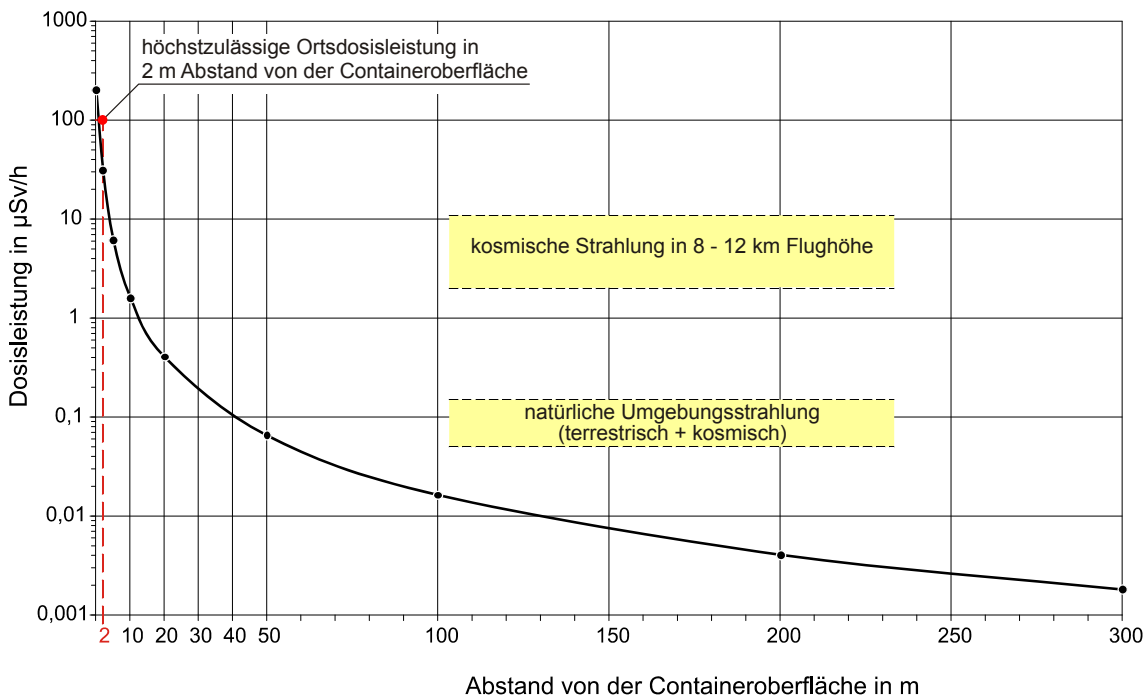


Abb. 5.3 Typische Ortsdosisleistungsverteilung eines Abfallbehälters (Konrad-Container Typ IV), Abstand mittig von der Containerlängsseite

In Deutschland beträgt die mittlere externe Strahlenexposition aus natürlichen Quellen (d. h. Exposition durch terrestrische und kosmische Strahlung) etwa 0,7 mSv/a (das entspricht 0,08 μ Sv/h), die Bandbreite liegt etwa zwischen 0,5 mSv/a und 1,2 mSv/a, in den Mittelgebirgen bis zu 2 mSv/a (das entspricht 0,23 μ Sv/h) /BAY 06/. Im weltweiten Vergleich gibt es Orte mit deutlich höheren Spitzenwerten. Der Parlamentsbericht

/BMU 07b/ weist für Deutschland eine mittlere jährliche effektive Gesamtdosis der natürlichen Strahlenexposition von 2,1 mSv aus, zu der die kosmische Strahlung mit 0,3 mSv, die terrestrische Strahlung mit 0,4 mSv, die Ingestion natürlicher Radionuklide mit 0,4 mSv und die Inhalation von Radon und Radonfolgeprodukten mit 1,1 mSv beitragen.

In der Abfalldatenbank sind Angaben zur Ortsdosisleistung für verschiedene Abstände vom Abfallbehälter (0 m und 1 m bzw. 2 m) erfasst. Diese Daten basieren überwiegend auf den Angaben der Ablieferungspflichtigen und sind in Einzelfällen durch ergänzende Untersuchungen (z. B. mittels Strahlungstransport- und Abschirmrechnungen) bestimmt worden. In diesem Zusammenhang wurde auch die Einhaltung der Endlagerungsbedingungen hinsichtlich der Ortsdosisleistung der Abfallgebinde überprüft (vgl. Tab. 3.3), da die dort festgelegten Grenzwerte restriktiver sind als die Transportvorschriften. Die Angaben liegen in der Datenbank größtenteils als (über einen Referenzabfall) gemittelte Werte der zu einem Zeitpunkt an einer Stelle jeweils gemessenen bzw. berechneten Höchstwerte der Ortsdosisleistung vor. Seltener wurden seitens der Ablieferungspflichtigen nur Maximalwerte zur oberen Abschätzung angegeben.

In Abb. 5.4 und Abb. 5.5 sind die Verteilungen der Ortsdosisleistung für die in der Datenbank erfassten Abfallgebinde dargestellt. Da die Endlagerungsbedingungen hinsichtlich der einzuhaltenden ODL-Grenzwerte zwischen zylindrischen und quaderförmigen Abfallgebinden unterscheiden, sind die Verteilungen der Ortsdosisleistung für diese Behältertypen getrennt aufgeführt.

Der für alle Behältertypen geltende Grenzwert für die Dosisleistung an der Behälteroberfläche von 2 mSv/h wird von der überwiegenden Mehrheit der Abfallgebinde deutlich unterschritten und liegt mehrheitlich sogar unterhalb von 0,5 mSv/h. Auch der Grenzwert für die Ortsdosisleistung von 0,1 mSv/h, der je nach Behältertyp in 1 m bzw. 2 m Abstand einzuhalten ist, wird überwiegend deutlich unterschritten. In den meisten Fällen liegt die Ortsdosisleistung – in 1 m Abstand bei zylindrischen bzw. in 2 m Abstand bei quaderförmigen Abfallgebinden – unterhalb von 50 µSv/h. Der ODL-Mittelwert liegt dabei für beide Behältertypen bei etwa 25 µSv/h (jeweils in entsprechendem Abstand), das entspricht einem Viertel des jeweiligen Grenzwertes.

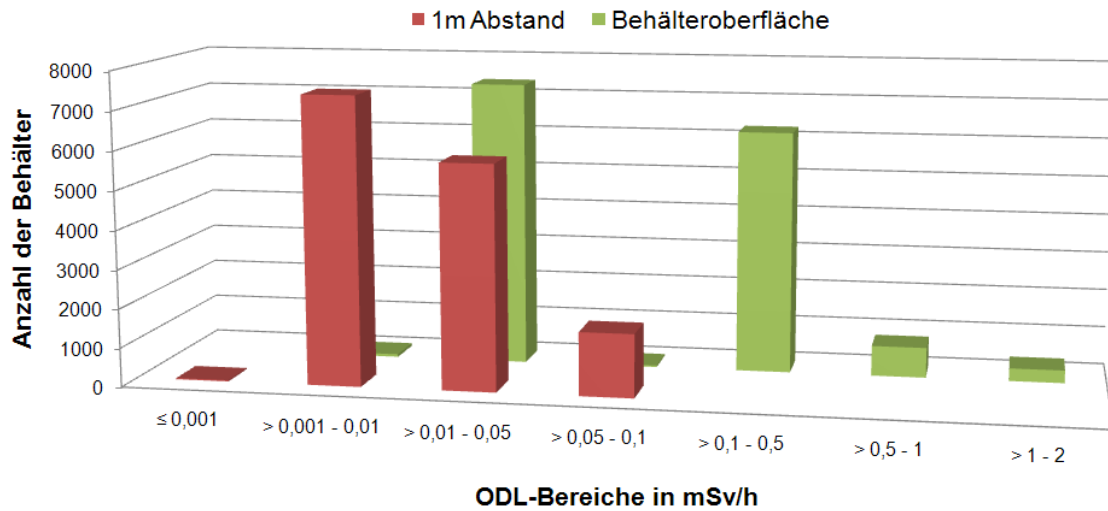


Abb. 5.4 Verteilung der Ortsdosisleistung (Höchstwerte an der Behälteroberfläche bzw. in 1 m Abstand) für zylindrische Gebinde (Basis: 14 830 Abfallbehälter)

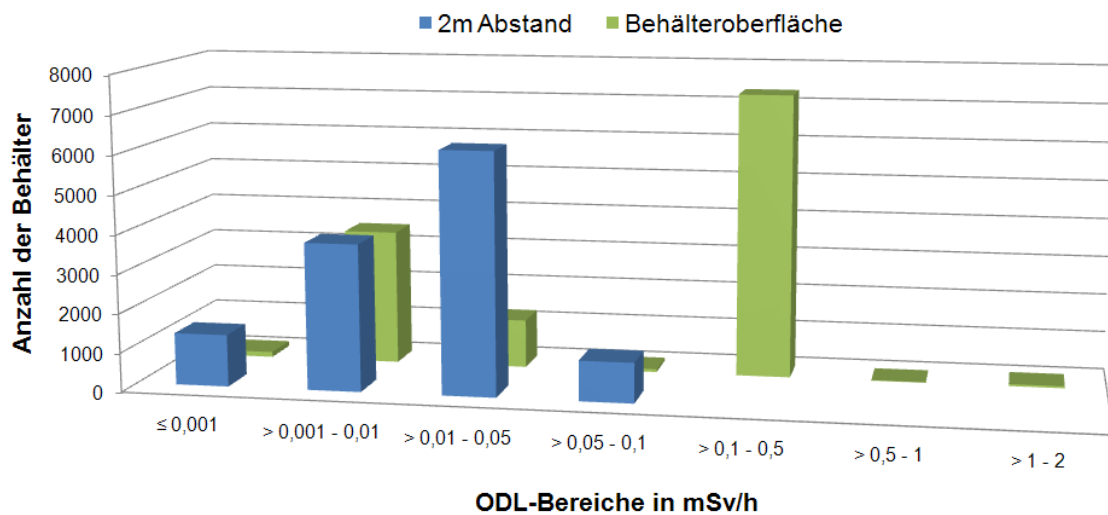


Abb. 5.5 Verteilung der Ortsdosisleistung (Höchstwerte an der Behälteroberfläche bzw. in 2 m Abstand) für quaderförmige Gebinde (Basis: 12 324 Abfallbehälter)

Da quaderförmige Abfallgebände im Sinne der Endlagerungsbedingungen eine Transporteinheit bilden, können die oben genannten Werte (für 0 m und 2 m Entfernung) direkt auf die Ortsdosisleistung der TE übertragen werden. Bei zylindrischen Gebänden besteht die Möglichkeit, dass diese zu zweit auf einer Tauschpalette liegend transportiert werden und sich somit das Strahlungsfeld der Transporteinheit erhöht. Unter Berücksichtigung dieser Transportkonfiguration liegt die mittlere Ortsdosisleistung für TE mit zylindrischen Gebänden in 1 m Abstand bei etwa 35 $\mu\text{Sv/h}$. Als ODL-Mittelwert in 1 m Entfernung von einer Transporteinheit ergibt sich unabhängig vom Behältertyp ein Wert unterhalb von 50 $\mu\text{Sv/h}$.

Während der Beförderung der Abfälle zum Endlager Konrad sind die Bestimmungen der entsprechenden Transportvorschriften hinsichtlich der Ortsdosisleistung maßgeblich, insbesondere die Einhaltung des Grenzwertes von 0,1 mSv/h in 2 m Abstand von den senkrechten Außenflächen des Transportfahrzeugs. Dieser Wert muss jedoch aufgrund der restriktiveren Anforderungen der Endlagerungsbedingungen bereits in 1 m bzw. 2 m Abstand vom Abfallgebände eingehalten werden. Ein Transportfahrzeug (z. B. ein Containertragwagen) kann zwar mehrere Abfallgebände aufnehmen, aufgrund des Abstands zwischen Abfallgebände und Transportfahrzeug, der oft großen Abstände zwischen den Gebänden selbst und des raschen Strahlungsfeldabfalls mit zunehmender Entfernung wird der gefahrgutrechtliche Dosisleistungsgrenzwert unterschritten.

Abb. 5.6 und Abb. 5.7 zeigen beispielhaft den prinzipiellen Verlauf der Ortsdosisleistung für eine Transportkonfiguration bestehend aus zwei Abfallgebänden auf einem Containertragwagen, die in einen 20'-Frachtcontainer als Umpackung oder Zusatzverpackung eingestellt sind. Es wird der Verlauf der Ortsdosisleistung als Funktion des Abstandes vom Containertragwagen für jeweils zwei Messebenen (a) und (b) dargestellt. Beide Messebenen verlaufen auf Höhe der Mittelachsen der Abfallgebände über Grund. Weiterhin verläuft Messebene (a) von der horizontalen Mitte des Containertragwagens aus, zwischen den beiden 20'-Frachtcontainern. Die Messebene (b) liegt in Abb. 5.6 in der Mittelachse des äußeren Gussbehälters, in Abb. 5.7 in der Mittelachse des Containers Typ IV. In beiden Graphiken ist der schnelle Abfall der Ortsdosisleistung mit wachsendem Abstand vom Containertragwagen zu sehen. Der im Gefahrgutrecht definierte Dosisleistungsgrenzwert von 0,1 mSv/h in 2 m Abstand vom Fahrzeug wird deutlich unterschritten.

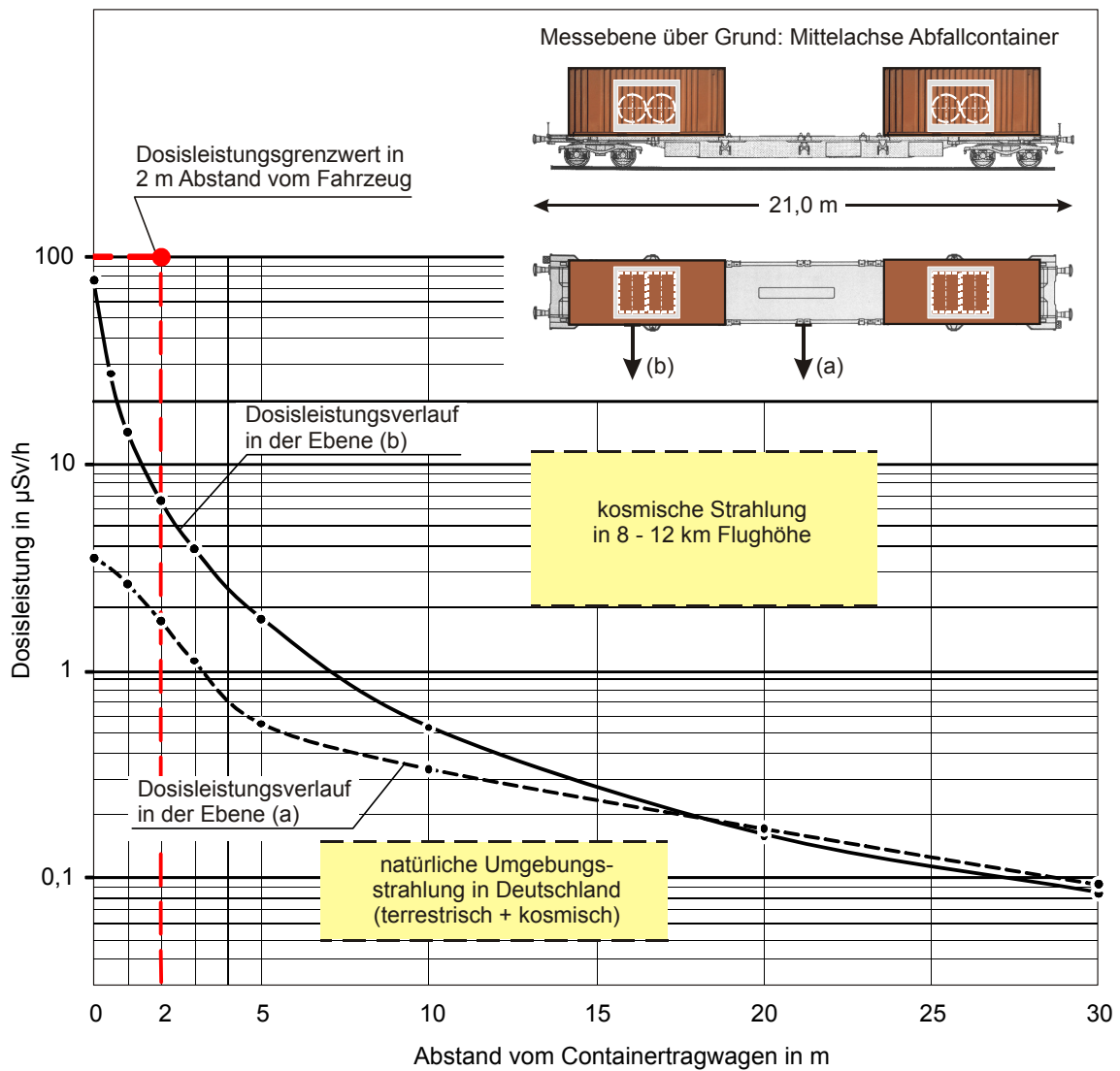


Abb. 5.6 Typischer Verlauf der Ortsdosisleistung für eine Transportkonfiguration aus 2 Tauschpaletten mit jeweils 2 Gussbehältern auf einem Containertragwagen

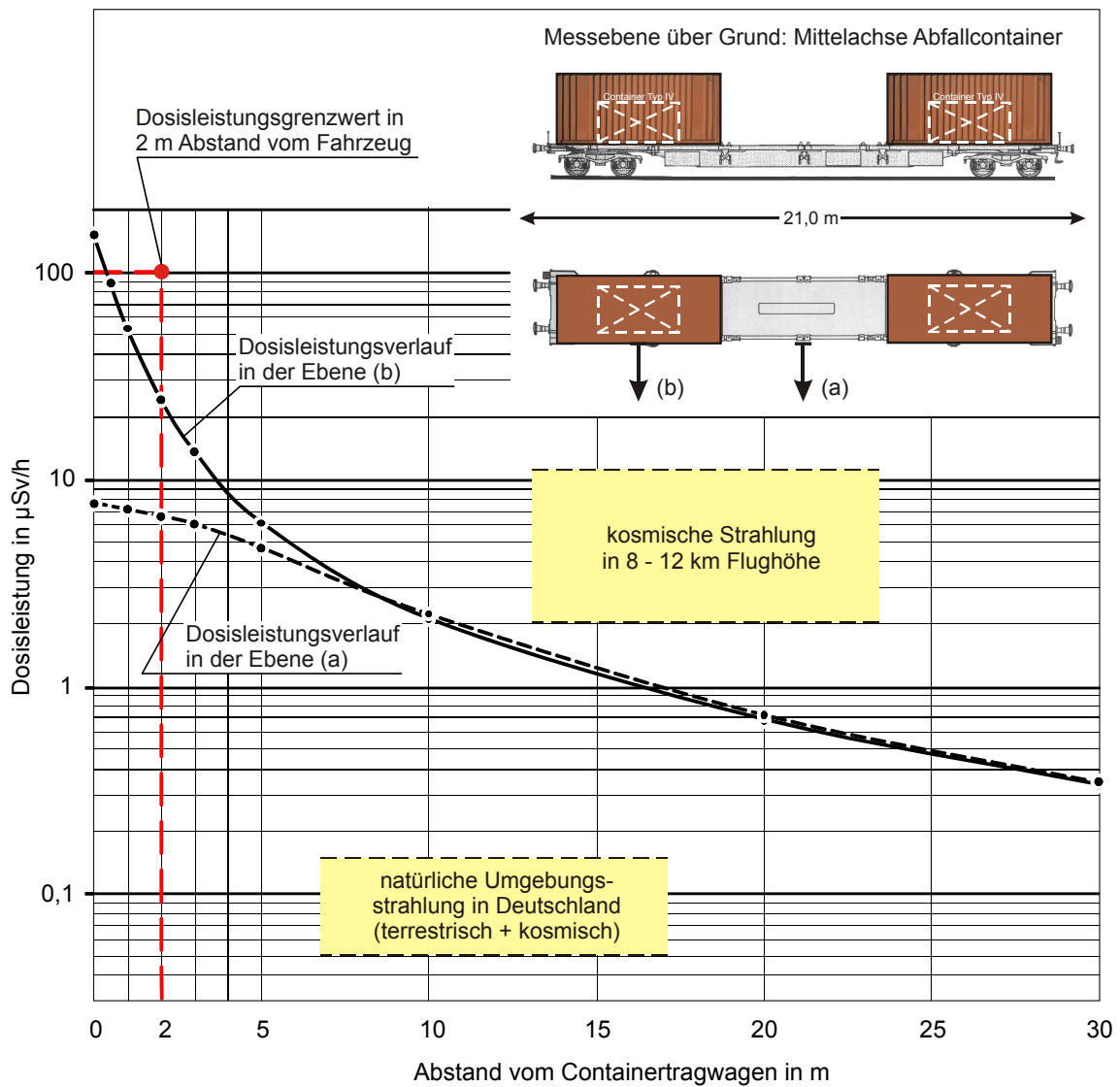


Abb. 5.7 Typischer Verlauf der Ortsdosisleistung für eine Transportkonfiguration aus Containertragwagen mit 2 Konrad-Containern Typ IV

6 Transportszenarien und Beförderungsmodalitäten

Die potentiellen radiologischen Auswirkungen des normalen Abfalltransports und eventueller Transportunfälle während der Beförderung bis zum Endlager werden durch die radiologisch relevanten Abfallprodukt- und Behältereigenschaften sowie durch die Art und Weise der Abfallanlieferung und die voraussichtliche Streckenführung der Abfalltransporte bestimmt. Das vorliegende Kapitel beschreibt und erläutert auf der Grundlage umfangreicher Erkundungen und Erhebungen bei einschlägigen mit der Beförderung radioaktiver Abfälle befassten Transportunternehmen und sonstigen Beteiligten (z. B. Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden) den diesbezüglichen Planungs- und Erkenntnisstand.

6.1 Transportszenarien

Das Endlager Konrad soll in Übereinstimmung mit seinem geplanten Bestimmungszweck mit radioaktiven Abfällen beliefert werden und nach derzeitiger Planung jährlich ca. 2300 Transporteinheiten verpackter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung annehmen und endlagern.

Eine Anlieferung und Annahme radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad ist grundsätzlich nur nach Voranmeldung der Abfälle durch den Ablieferungspflichtigen und den Abruf der Abfallgebände nach zuvor erfolgter Freigabe zur Endlagerung durch das BfS möglich. Eine innerbetriebliche Pufferung oder Zwischenlagerung auf dem obertägigen Betriebsgelände ist gegeben, um kurzfristige Störungen im Annahme- und Einlagerungsbetrieb bzw. Schwankungen bei der Anlieferung auszugleichen.

Für die Durchführung der Abfalltransporte kommt entsprechend den betrieblichen Gegebenheiten sowie der Lage und der Anbindung des Endlagerstandortes an das öffentliche Verkehrswegenetz mittels einer Direktverbindung mit dem Übergabebahnhof Beddingen und der nördlich des Schachtes Konrad 2 verlaufenden Industriestraße Nord K 39 praktisch nur eine Anlieferung auf dem Straßen- und Schienenwege in Betracht, vgl. Abb. 6.1 und Abb. 6.2. Eine Abfallanlieferung mittels anderer Verkehrsträger, insbesondere auf dem Wasserwege, ist nicht genehmigt. Die neu zu bauenden Straßen- und Schienenwege zur Anbindung des Endlagers an das bestehende Straßen- und Schienennetz sind in Abb. 6.2 dargestellt.

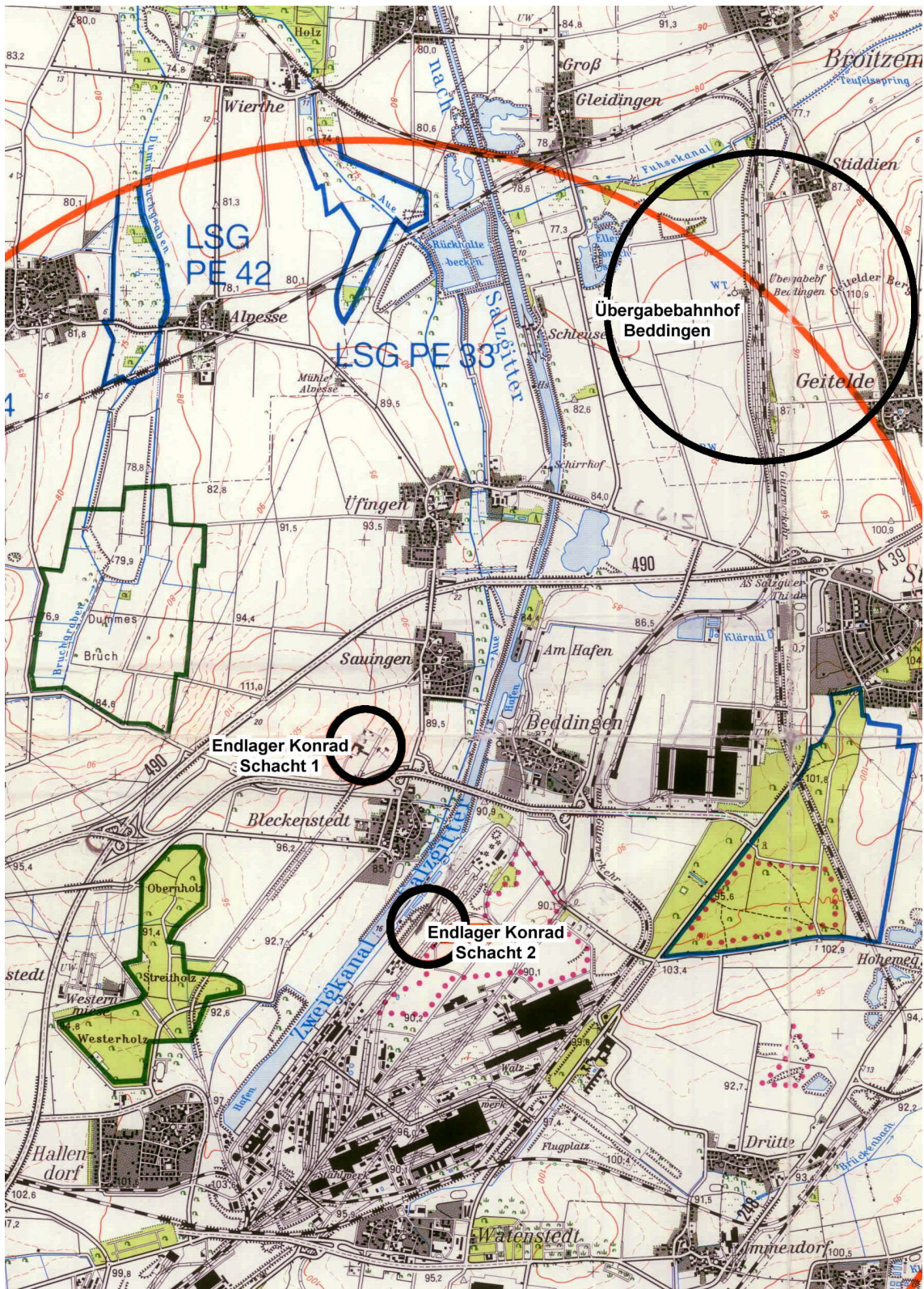


Abb. 6.1 Lageplan des Endlagers Konrad mit den übertägigen Betriebsanlagen Schacht Konrad 1 (Personen- und Materialbeförderung) und Schacht Konrad 2 (Annahme/Einlagerung radioaktiver Abfälle) (Quelle: BfS)

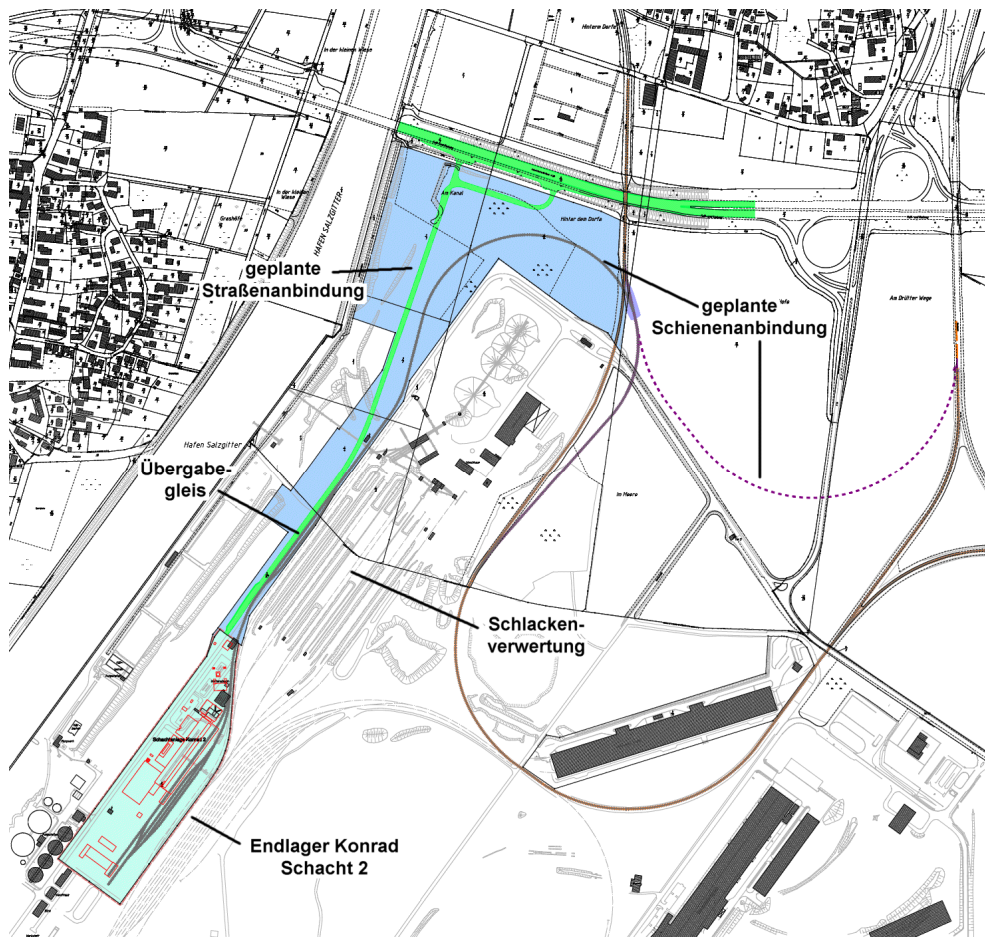


Abb. 6.2 Geplante Verkehrsanbindung des Endlagers Konrad (Schacht Konrad 2) an das öffentliche Verkehrsnetz (Quelle: BfS)

Die frist- und anforderungsgerechte Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager einschließlich der Wahl des Verkehrsträgers und Transportmittels liegt in der Verantwortung der Ablieferungspflichtigen. Die Ablieferungspflichtigen bedienen sich dabei in der Regel eines dafür geeigneten und zugelassenen Unternehmens. Zur Bestimmung des verkehrsträgerspezifischen Beförderungsaufkommens und der Beförderungsmodalitäten wurden im Rahmen der Abfalldatenerhebung ergänzend Angaben über die Anlieferungspräferenzen der Ablieferungspflichtigen und bei (voraussichtlich) beteiligten Transportunternehmen eingeholt. Nach den Ergebnissen dieser Erhebung kann davon ausgegangen werden, dass die Abfallanlieferung im Endlager Konrad vorrangig auf dem Schienenweg erfolgt und der auf die Schienenbeförderung entfallende Anteil etwa 80 % und der Straßenbeförderungsanteil etwa 20 % beträgt – bezogen auf die Anzahl der anzuliefernden Transporteinheiten. Eine Straßenanlieferung kommt insbesondere für diejenigen Ablieferungspflichtigen in Betracht, die über keine direkte Gleisanbindung an das öffentliche Schienennetz verfügen.

Dieses so genannte 80/20-Szenarium wird in der vorliegenden Transportsicherheitsanalyse für das Endlager Konrad als realistischer Referenzfall eingehender betrachtet. Darüber hinaus werden als Ergänzung zum Referenzfall zwei hypothetische Anlieferungsszenarien mit einer angenommenen ausschließlichen Beförderung auf dem Schienen- und Straßenwege untersucht, um die Sensitivität und Bandbreite der beförderungsbedingten radiologischen Auswirkungen in Abhängigkeit von etwaigen zukünftigen Änderungen der Abfalltransportbedingungen beurteilen zu können.

6.2 Beförderungsmodalitäten und Streckenführung

Die Art und Weise der Abfallanlieferung auf dem Schienen- und Straßenweg sowie die Größe, Handhabung, Anlieferungshäufigkeit und Laufstrecke von Abfallsendungen wird durch zahlreiche endlagerspezifische, ablieferseitige, verkehrstechnische und genehmigungsrechtliche Anforderungen, Randbedingungen und Einschränkungen beeinflusst. Hierzu gehören insbesondere die verfügbaren logistischen Infrastruktureinrichtungen der Ablieferungspflichtigen und des Endlagers (Umschlag-, Abfertigungs- und Puffereinrichtungen und entsprechende Kapazitäten), die Rahmenbedingungen und Einschränkungen der Transportabwicklung (z. B. Ladekapazitäten), die genehmigungsrechtlichen Erfordernisse und Auflagen sowie ggf. die Abrufstrategie des Endlagerbetreibers.

Für die Endlagerung bestimmte radioaktive Abfälle werden beim Ablieferungspflichtigen gezielt zur Anlieferung und Einlagerung im Endlager Konrad abgerufen. Zylindrische Abfallgebinde sind auf sogenannten Tauschpaletten oder Transportpaletten liegend anzuliefern, die je nach Behältergewicht mit einem oder zwei Abfallgebinden beladen sein können (Abb. 6.3). Die Gesamtmasse einer Transporteinheit, d. h. das Gewicht eines Abfallcontainers oder einer beladenen Tausch- oder Transportpalette, darf 20 Mg nicht überschreiten. Beladene Abfallcontainer und Tauschpaletten/Transportpaletten müssen mit ISO-Eckbeschlägen versehen und konstruktiv so ausgeführt sein, dass sie im Endlager mittels Spreadertechnik gehandhabt und gestapelt werden können (Abb. 6.4).

Darüber hinaus sind für die Endlagerung vorgesehene Abfallbehälter trocken anzuliefern. Als Beförderungsmittel kommen daher im Allgemeinen nur sogenannte bedeckte oder gedeckte Transportmittel zum Einsatz. Soweit es sich bei den konradgängigen Abfallbehältern um gefahrgutrechtlich zugelassene Versandstücke handelt, können als

Transportcontainer handelsübliche Frachtcontainer eingesetzt werden. Anderenfalls sind prüfpflichtige Spezialcontainer erforderlich (vgl. Abb. 6.5), die den Anforderungen der gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften für die Beförderung radioaktiver Stoffe genügen, z. B. den Auslegungsanforderungen für Industrierversandstücke. Das Gesamtgewicht (Eigengewicht und Zuladung) derartiger Transportcontainer darf auslegungsbedingt üblicherweise 24 Mg nicht überschreiten.

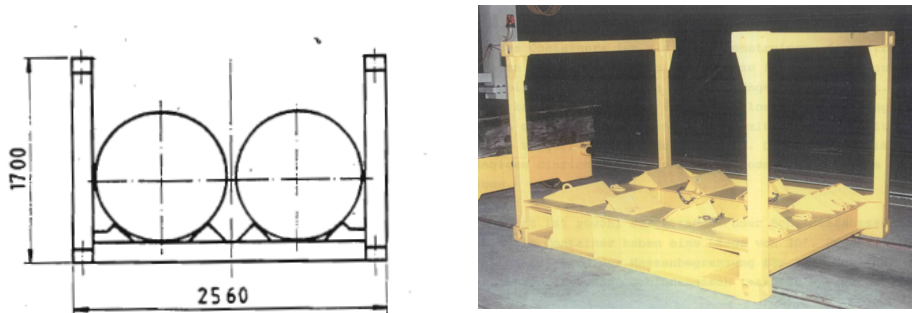


Abb. 6.3 Tauschpalette zur Beförderung zylindrischer Abfallbehälter, mit Anschlagmöglichkeiten für Spreadertechnik und Gabeln (Quelle: GNS)



Abb. 6.4 Beispiel für den Umschlag eines quaderförmigen Abfallbehälters, hier mit Topspreadertechnik (Quelle: GNS)



Abb. 6.5 Für Spreadertechnik geeigneter Abfalltransportcontainer (Typ IP-2) – 20'-Open-all-Container (Quelle: GNS)

Darüber hinaus stellen sich die verkehrsträgerspezifischen Betriebsabläufe, Rahmenbedingungen und Erfordernisse der Abfalltransportabwicklung für den Schienen- und Straßengüterverkehr wie folgt dar.

6.2.1 Schienenbeförderungsmodalitäten

Die Anlieferung radioaktiver Abfälle auf dem Schienenwege erfolgt – bundesweit gesehen – im Allgemeinen in zwei Transportabschnitten: Der erste Abschnitt umfasst die Übernahme einer Abfallsendung beim Ablieferungspflichtigen durch das beauftragte Eisenbahnverkehrsunternehmen und die anschließende Weiterbeförderung bis zum Übergabebahnhof Beddingen in der Endlagerstandortregion, vgl. Abb. 6.1. Von dort werden für das Endlager Konrad bestimmte Abfallsendungen nach entsprechender rangierdienstlicher Behandlung zum Übergabegleis des Endlagers Konrad (Abb. 6.2) weitergeleitet und dem Endlager Konrad übergeben. Die Übernahme und Transportabwicklung auf dem Betriebsgelände des Endlagers erfolgt durch den Betreiber mittels der betriebseigenen Rangierlok. Vereinzelt können je nach den betrieblichen Gegebenheiten eines Ablieferungspflichtigen im Vorlauf eines Schienentransportes auch zusätzliche Straßentransporte vom Abfallversandort zu einem naheliegenden Containerterminal oder Umschlagbahnhof erforderlich sein, sofern der jeweilige Ablieferer über keinen direkten Gleisanschluss verfügt.

Die Durchführung der geplanten Abfalltransporte auf dem Verkehrsnetz der DB Netz AG erfolgt nach derzeitigem Kenntnisstand im fahrplanmäßig verkehrenden Güterverkehr mittels Regelgüterzügen. Eine Abfallanlieferung mittels Sonder- oder Ganzzügen, die ausschließlich radioaktive Abfälle befördern, kann – im Gegensatz zum Planungsstand der 1991er Transportstudie – u. a. aufgrund des Wegfalls der Wiederaufarbeitungsabfälle praktisch ausgeschlossen werden.

Ein Abfalltransport im Rahmen des bundesweiten Regelgüterverkehrs ist dadurch charakterisiert, dass zu befördernde Sendungen (z. B. Einzelwagen oder Wagenverbände) vom Versandort zunächst zu einer im Nahbereich befindlichen sogenannten Zugbildungsanlage (z. B. ein Bahnhof oder ein zentraler Rangierbahnhof) transportiert und von dort über das bestehende Schienennetz über einen oder mehrere Verkehrsknoten dem Zielort zugeleitet werden.

Die für die vorliegenden Untersuchungen seitens der Firma Railion AG bereitgestellten exemplarischen Laufpläne für potenzielle Abfallsendungen zeigen, dass der Transportweg sowohl aus dem süd- und westdeutschen Raum als auch aus dem nord- und ostdeutschen Raum typischerweise über den Schienengüterverkehrsknoten Seelze/Hannover (Rangierbahnhof) zum Übergabebahnhof Beddingen und von dort über die geplante Direktanbindung zum Endlager Konrad führt (Abb. 6.6). Der genaue Verlauf der Schienentransportroute in der Endlagerregion wird in Abschnitt 8.5.1 behandelt (Abb. 8.9). Der Bahnhof Braunschweig wird den exemplarischen Zuglaufplänen zufolge durch die geplanten Abfalltransporte im Regelfalle nicht berührt.

Die rangierdienstlichen Betriebs- und Handhabungsabläufe auf dem Rangierbahnhof Seelze sind teilautomatisiert und damit wenig personalintensiv. Die Umlauf- bzw. Umschaltzeiten eines angelieferten Eisenbahnwagens belaufen sich je nach Herkunft und Weiterbeförderung auf etwa 3 bis 6 Stunden. Der Rangierbahnhof Seelze/Hannover wird in Teilbereichen durch Wohnbebauung begrenzt; die Abstände zu Gleisbereichen, die für reguläre Transporte nach Beddingen in Betracht kommen, sind aufgrund des ausgedehnten Rangierbahnhofsgebietes jedoch erheblich (> 100 m).

Die derzeitige Zug- bzw. Belieferungsfrequenz von Seelze über Lehrte und Peine zum Übergabebahnhof Beddingen im Rahmen des Regelgüterverkehrs beträgt etwa 5 Güterzüge/Tag mit einem durchschnittlichen Lieferumfang von etwa 30 - 50 Eisenbahnwagen je Zug (Regelgüterzug). Darüber hinaus verfügt der Rangierbahnhof Beddingen

über Verkehrsrelationen mit anderen Zulieferstellen beispielsweise für die Anlieferung von Erzen, Kohle, Kalk etc. mittels Ganzzügen.

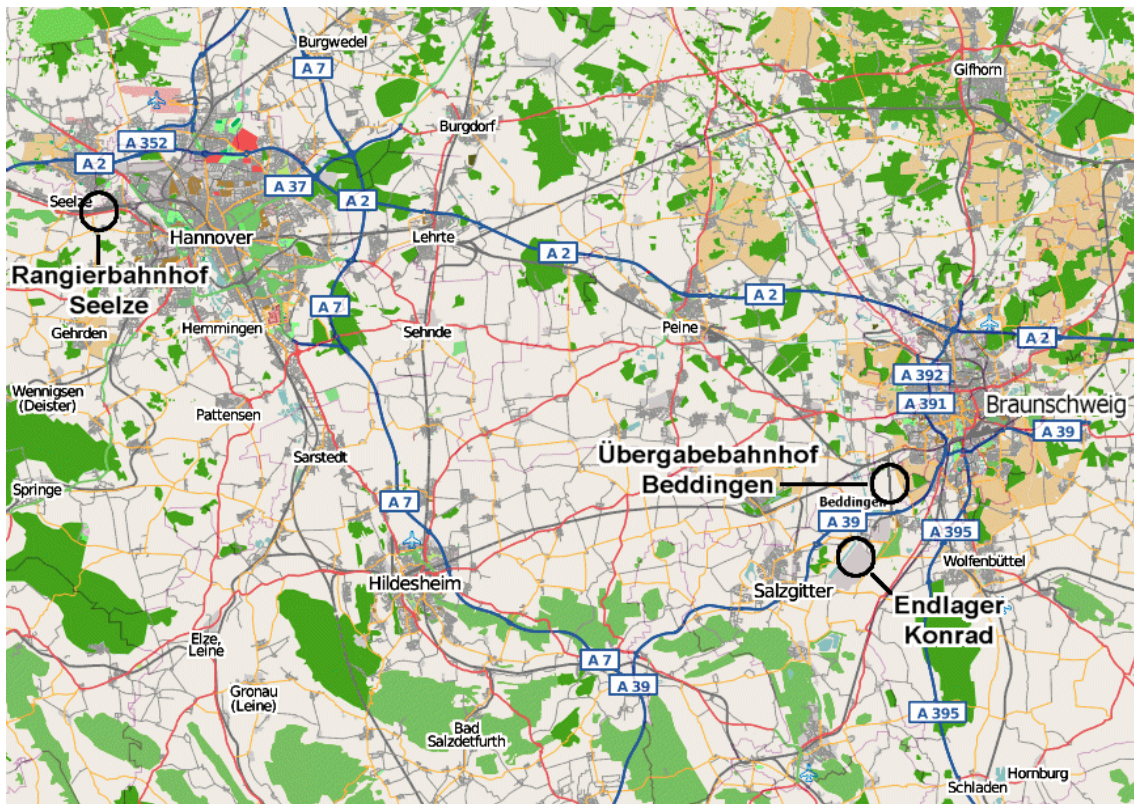


Abb. 6.6 Verkehrswegenetz der erweiterten Endlagerstandortregion, Autobahnen blau, Schienennetz dunkelgrau (Quelle: OpenStreetMap)

Der funktionale Aufbau und die prinzipiellen rangierdienstlichen Betriebsabläufe auf dem Übergabe- bzw. Rangierbahnhof Beddingen entsprechen weitgehend denen des Rangierbahnhofs Seelze. Der Gleiskörper des Übergabebahnhofs Beddingen erstreckt sich über mehrere Kilometer und umfasst von Nord nach Süd die Einfahrgruppe, die Richtungsgruppe mit Ablaufberg und die Ausfahrgruppe. Der Gleiskörper liegt – mit Ausnahme des Ablaufbergs (Höhe etwa 1 m) – etwa auf gleichem Höhenniveau und ist somit praktisch gefällefrei. Die notwendigen rangierdienstlichen Betriebs- und Handhabungsabläufe wie das Entkuppeln, Kuppeln, Abbremsen etc. erfolgen ausschließlich manuell. Der Personalbestand des mehrschichtig betriebenen Rangierbahnhofs beläuft sich je Schicht im Allgemeinen auf einen Lokrangierführer (mit Zusatzbefähigung zum Bedienen von Triebfahrzeugen mit Funkfernsteuerung) und drei Rangierer.

Angelieferte Regelgüterzüge werden nach Übergabe in der Einfahrgruppe zunächst an den erforderlichen Trennstellen gelängt und entschlachtet und sodann mittels einer

Rangierlok langsam (Schrittgeschwindigkeit) über den Ablaufberg gedrückt. Die vollständige Entkupplung der Wagen bzw. Wagenverbände an den vorbestimmten Stellen erfolgt kurz vor der höchsten Stelle des Ablaufbergs durch manuelle Trennung. Danach laufen die Einzelwagen oder Wagengruppen der 10-gleisigen Richtungsgruppe zu. Die vom Ablaufberg ablaufenden Eisenbahnwagen oder Wagenverbände werden im jeweiligen Richtungsgleis mittels handverlegten Hemmschuhen zum Stillstand gebracht. Die erforderlichen Rangier- und Betriebsabläufe werden durch das lokale Bereichsstellwerk (Rangiermeister) koordiniert und gesteuert. Durch ein elektronisches Betriebsinformationssystem sind Merkmale der einzelnen Wagen verfügbar, die der Identifizierung dienen und für die Steuerung der betrieblichen Abläufe von Bedeutung sind, z. B. Wagennummer, Länge, Eigengewicht, Ladegut, Transportrelation, Ladungsgewicht etc.

Nach Abschluss der Zugbildung erfolgt die Weiterbeförderung zu dem vor dem umzäunten Betriebsgelände befindlichen Übergabegleis des Endlagers Konrad (Abb. 6.2). Die diesbezüglichen betrieblichen Planungen des Schienenbeförderers sehen in Übereinstimmung mit den genehmigungsrechtlichen Nebenbestimmungen für die Beförderung radioaktiver Stoffe (Minimierung der Beförderungszeit) eine zügige Überstellung an das Endlager vor. Die Anzahl der mittels einer einzelnen Zugfahrt anlieferbaren Eisenbahnwagen ist aufgrund der verkehrstechnischen Gegebenheiten im Allgemeinen auf etwa 6 - 8 Eisenbahnwagen begrenzt (Länge des Übergabegleises ca. 150 m).

Die maximal zulässige Fahrgeschwindigkeit beim Rangier- und Fahrbetrieb auf dem Übergabebahnhof Beddingen und dem regionalen Gleisstreckennetz einschließlich der Direktverbindung zum Endlager ist auf 25 km/h begrenzt. Die unmittelbare Umgebung des Übergabebahnhofs Beddingen ist – mit Ausnahme eines Anwesens im nordöstlichen Anliegerbereich (siehe Abschnitt 7.1) – weitestgehend frei von öffentlicher Bebauung.

Für die schienengebundene Beförderung von Frachtcontainern werden im Allgemeinen Containertragwagen eingesetzt. Abb. 6.7 zeigt als exemplarisches Beispiel einen mehrachsigen Tragwagen der Baureihe Sgjs für Großcontainer, der vielfach für Abfalltransporte verwendet wird und eine Beladepazität von bis zu drei 20'-Frachtcontainern aufweist, wobei die Traglast auf etwa 56 Mg begrenzt ist. Im Falle einer Verwendung von Spezialcontainern wie dem Open-all-Container, die über verschiebbare Seiten- und Oberteile verfügen, ist die Beladung derartiger Tragwagen aus Handhabungsgründen jedoch auf maximal zwei Transportcontainer beschränkt. Grundsätzlich sind aber auch anderweitige Schienentransportmittel einsetzbar, soweit diese für

die Abfallanlieferung geeignet sind und den gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften entsprechen.



Abb. 6.7 Tragwagen für Großcontainer/Wechselbehälter der Baureihe Sgjs 712 (Quelle: GNS)

Die bundesweite Anliefer- bzw. Laufzeit eines Abfalltransportes vom Ablieferungspflichtigen bis zum Empfänger, dem Endlager Konrad, hängt von der Transportentfernung ab und wird für den gesamten Beförderungsvorgang mit etwa 24 - 48 Stunden veranschlagt. Eine Schienenanlieferung von Abfalltransporten an Wochenenden und Feiertagen und – wegen der relativ langen Laufzeiten – an dem jeweils darauf folgenden Tag ist in der Endlagerregion aufgrund üblicher genehmigungsrechtlicher Auflagen und Nebenbestimmungen praktisch nicht zu erwarten (Wochenend- und Feiertagsstandzeitverbot). Nach den Bestimmungen des Planfeststellungsbeschlusses sind außerhalb der regulären Anlieferzeiten ankommende Abfallsendungen (LKW/Eisenbahnwagen) im Übrigen unverzüglich auf dem umzäunten Betriebsgelände des Endlagers abzustellen.

6.2.2 Straßenbeförderungsmodalitäten

Hinsichtlich der Abfallanlieferung auf der Straße kann als Regelfall davon ausgegangen werden, dass endzulagernde Abfälle auf unmittelbarem Weg und umschlagfrei vom Ablieferer zum Endlager Konrad befördert werden. Aufgrund der Abmessungen und des Gewichtes der Abfallgebilde und der Transportausrüstung (Transporteinheit

maximal 20 Mg) sind dazu typischerweise Lastkraftwagen oder Sattelzüge erforderlich; Abb. 6.8 zeigt ein Beispiel. Grundsätzlich sind aber auch andere Fahrzeugkombinationen einsetzbar, soweit diese den Erfordernissen der Transportvorschriften entsprechen.

Nach den Bau- und Betriebsvorschriften des Straßenverkehrsrechts ist das zulässige Gesamtgewicht (Eigengewicht plus Zuladung) für Fahrzeuge oder Fahrzeugkombinationen (Fahrzeug und Anhänger) derartiger Bauart und Größe im Allgemeinen auf maximal 40 Mg begrenzt. Die Zuladung eines Fahrzeuges in Form verpackter radioaktiver Abfälle ist daher je nach Gewicht der Abfallbehälter im Allgemeinen auf höchstens 2 Transporteinheiten pro Fahrzeug beschränkt.



Abb. 6.8 Straßentransportfahrzeug für radioaktive Abfälle (Quelle: GNS)

Als Transportwege für die Abfallanlieferung kommen vorrangig außerörtliche Verkehrswege wie Bundesstraßen und Bundesautobahnen in Betracht (Abb. 6.6). Dies gilt aufgrund der Lage und Verkehrsanbindung des Endlagerstandortes und der unmittelbaren Anbindung des Endlagers an die Industriestraße Nord K 39 insbesondere für die Endlagerstandortregion. Der exemplarische Verlauf einer Straßentransportroute in der Endlagerregion wird in Abschnitt 8.5.2 behandelt (Abb. 8.10). Für einen Abfallbeförderungsvorgang vom Absender bis zum Empfänger ist je nach Entfernung die Fahrzeit auf bis zu etwa 10 Stunden zu veranschlagen.

6.3 Verkehrsaufkommen

Die nachfolgenden Abschätzungen über das mit der geplanten Anlieferung und Einlagerung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad verbundene Abfallverkehrsaufkommen basieren auf dem aktuellen Planungsstand, nach dem im ersten Jahrzehnt nach Betriebsaufnahme bei einschichtigem Einlagerungsbetrieb jährlich etwa 2300 Transporteinheiten bzw. im Mittel wöchentlich etwa 50 Transporteinheiten an radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung eingelagert werden sollen. Unter Zugrundelegung der im Vorangehenden beschriebenen Anlieferungspräferenzen der Ablieferungspflichtigen ist weiterhin ein Anlieferungsszenarium zu erwarten, dass – bezogen auf die Anzahl der angelieferten Transporteinheiten – im Mittel etwa 80 % der radioaktiven Abfälle auf der Schiene und die übrigen 20 % auf der Straße angeliefert werden; dies entspricht einem verkehrsträgerspezifischen wöchentlichen Beförderungsaufkommen pro Woche von 40 TE auf dem Schienenweg und 10 TE auf dem Straßenweg.

Die sich auf dieser Grundlage ergebende Anzahl von straßen- und schienengebundenen Abfalltransporten ist in Tab. 6.1 für das 80/20-Szenarium (Referenzfall) zusammenfassend angegeben. Die Angaben beziehen sich auf die Endlagerregion, in der aufgrund der Konzentration der Abfalltransporte unterschiedlicher Herkunft mit der bundesweit höchsten Verkehrsdichte konradgängiger radioaktiver Abfälle zu rechnen ist. Ergänzend dazu sind in der Übersichtstabelle die entsprechenden Vergleichszahlen für die beiden extremen, aber hypothetischen Abfallbeförderungsszenarien angegeben, bei denen eine ausschließliche Abfallanlieferung auf dem Straßen- bzw. Schienenweg unterstellt wurde.

Nach Tab. 6.1 beläuft sich das prognostizierte wöchentliche Abfallverkehrsaufkommen in der Endlagerregion für das kombinierte Schienen/Straßen-Anlieferungsszenarium (Referenzfall) auf wöchentlich etwa 8 schienengebundene Abfalltransporte in Form von kleineren Wagenverbänden und – je nach Behältergewicht und Ladekapazität der eingesetzten Straßentransportfahrzeuge – auf etwa 5 - 10 LKW-Transporte mit einer Beladung von 1 - 2 Transporteinheiten pro LKW.

Tab. 6.1 Anzahl der erwarteten wöchentlichen Abfalltransporte in der Endlagerstandortregion für verschiedene Anlieferungsszenarien (Basis: Anlieferung von 2300 TE pro Jahr bzw. 50 TE pro Woche bei einschichtigem Einlagerungsbetrieb)

Verkehrsträger/Beförderungsart	Abfallbeförderungsszenarien		
	100% Schiene	100% Straße	80% Schiene/ 20% Straße
Schienebeförderung im Regelgüterverkehr: Maximale Anzahl der Abfalltransporte bestehend aus durchschnittlich 2 - 3 (max. 4 - 5) Abfallwagen	ca. 10	---	ca. 8
Straßentransport mittels LKW bzw. Sattelzügen: Maximale Anzahl der LKW-Transporte mit einer Beladung von jeweils 1 - 2 Transporteinheiten pro LKW	---	25 - 50 ¹	ca. 5 - 10 ¹
¹ je nach Abfallbehältergewicht und Ladekapazität der eingesetzten LKW			

Bei einer angenommenen ausschließlichen Abfallanlieferung auf dem Schienenweg würde sich die Anzahl der schienengebundenen Abfalltransporte – vergleichbare Transportbedingungen wie im Referenzfall vorausgesetzt – in der Endlagerregion im Durchschnitt geringfügig von etwa 8 Abfalltransporten/Woche auf wöchentlich insgesamt etwa 10 Schienentransporte erhöhen. Eine ausschließliche oder überwiegende Straßenanlieferung hätte dagegen eine deutliche Erhöhung des straßengebundenen Abfallverkehrsaufkommens in der Standortregion des Endlagers zur Folge. Tab. 6.1 zufolge würde sich das straßengebundene Abfallverkehrsaufkommens gegenüber den realistischerweise zu erwartenden 5 - 10 LKW-Transporten – je nach Ladekapazität der eingesetzten LKW – auf wöchentlich etwa 25 - 50 Transporte erhöhen.

Nach Maßgabe der geplanten Puffer- und Einlagerungskapazität des Endlagers Konrad können die vorgenannten Anhaltswerte der zu erwartenden Abfalltransporte im Übrigen kurzzeitig überschritten oder unterschritten werden. Zusammenfassend ist jedoch hervorzuheben, dass das zu erwartende endlagerbedingte zusätzliche Abfallverkehrsaufkommen in der Endlagerregion vergleichsweise gering ist und nur einen Bruchteil

des in der hochindustrialisierten Standortregion des Endlagers bereits bestehenden Güterschwerverkehrs und Güterverkehrsaufkommens beträgt /BAST 07/.

Die prognostizierte Anzahl der Schienentransporte stützt sich auf die Einschätzung, dass die zur Endlagerung im Endlager Konrad vorgesehenen radioaktiven Abfälle von den Ablieferungspflichtigen vorrangig mittels Frachtcontainern und entsprechenden Containertragwagen zum Versand gebracht werden und ein Eisenbahnwagen typischerweise mit zwei Frachtcontainern bzw. 2 Transporteinheiten beladen ist (vgl. Abb. 6.7). Damit beläuft sich das wöchentliche schienengebundene Abfalltransportaufkommen in der Endlagerregion im Mittel auf etwa 20 anzuliefernde Eisenbahnwagen.

Aufgrund der beschränkten ablieferseitigen Abfertigungskapazität (beispielsweise aufgrund begrenzter Übergabegleislängen) ist weiterhin davon auszugehen, dass die im Rahmen eines Abrufvorgangs und Anliefertermins von einem Ablieferungspflichtigen abgegebenen Abfälle mehrheitlich in Form von kleineren Wagenverbänden mit höchstens etwa 4 - 5 Eisenbahnwagen versandt werden. Unterstellt man, dass im Durchschnitt aller Ablieferungspflichtigen etwa 2 - 3 Eisenbahnwagen im Rahmen eines Abrufvorganges zur Anlieferung und Einlagerung bereitgestellt und angeliefert werden, so ergeben sich bei einem kumulierten Beförderungsaufkommen von wöchentlich etwa 40 TE im Mittel bis zu etwa 8 anzuliefernde Abfalltransporte pro Woche, sofern man eine mehr oder weniger zufällige Aggregation von Abfallsendungen auf dem Anlieferungswege, beispielsweise insbesondere ab dem Rangierbahnhof Seelze/Hannover, unberücksichtigt lässt. Aufgrund der hohen Belieferungsfrequenz des Übergabebahnhofs Beddingen (5 Züge/Tag) aus Richtung Seelze/Hannover einerseits und des relativ begrenzten Abfallbeförderungsaufkommens andererseits ist eine solche Aggregation bzw. Bündelung von Abfallsendungen unterschiedlicher Herkunft in einem Anlieferzug jedoch nur in begrenztem Umfang zu erwarten.

Die für die Durchführung der Transportunfallrisikoanalyse erforderlichen konkreteren Daten und Informationen zur Beschreibung der jeweiligen Transport- und Handhabungsabläufe sind in den Abschnitten 8.4 und 8.5 im Einzelnen spezifiziert.

7 Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals aufgrund des normalen Transports

Personen, die sich als Arbeitskräfte oder Passanten/Anwohner funktionsbedingt oder zufällig in der Nähe eines Abfalltransportfahrzeuges aufhalten, sind der von den Abfallbehältern ausgehenden Reststrahlung, die von der Behälterwandung und Abschirmung nicht vollständig absorbiert wird, ausgesetzt und können eine Strahlenexposition erfahren. Eine solche Strahleneinwirkung (praktisch ausschließlich Gamma-Strahlung) ist jedoch aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten nahezu auf den unmittelbaren Nahbereich eines Abfalltransportbehälters bzw. Transportfahrzeuges beschränkt und liegt in einer Entfernung von etwa 30 - 40 m bereits im Bereich der natürlichen Umgebungsstrahlung, vgl. z. B. Abb. 5.3 sowie Abb. 5.6. Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Individualdosisabschätzungen wurden in Form von Einzelbetrachtungen für solche Orte und Funktionsbereiche durchgeführt, die beispielsweise aufgrund ihres hohen Beförderungsaufkommens oder der Beförderungsmodalitäten und der damit verbundenen potentiellen Strahlenexposition in besonderer Weise ausgezeichnet sind.

Zur Bestimmung und Bewertung der beförderungsbedingt zu erwartenden Strahlenexpositionen der Bevölkerung und Arbeitskräfte (Transportpersonal) werden daher im Folgenden typische mit der geplanten Abfallanlieferung verbundene Transport- und Betriebsabläufe betrachtet, bei denen Personen funktionsbedingt oder aufgrund ihrer Lebensumstände der von den Abfalltransportbehältern ausgehenden Reststrahlung in besonderer Weise ausgesetzt sind oder ausgesetzt sein könnten. Zu diesen Personengruppen, die in den neuen Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission /ICRP 08/ als repräsentative Personen bezeichnet werden, gehören erfahrungsgemäß Personen, die unmittelbar mit der Abfalltransportabwicklung befasst sind aber auch z. B. ganzjährig anwesende Anwohner von Transportstrecken mit hohem Abfallverkehrsaufkommen oder Passanten, die sich häufig (zufällig) zum Transportzeitpunkt entlang des Transportweges aufhalten könnten. Die Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Endlagerregion, in der aufgrund der Konzentration der Abfalltransporte unterschiedlicher Herkunft die bundesweit höchste Abfallverkehrsdichte und damit auch die potenziell höchsten beförderungsbedingten Strahlenexpositionen zu erwarten sind. Für Personen, die nicht zu den repräsentativen Personen zählen wie z. B. Anwohner/Passanten von Verkehrswegen, die nur gelegentlich von Transporten mit radioaktivem Abfall berührt werden, kann davon ausgegangen werden, dass die

beförderungsbedingt zu erwartende Strahlenexposition niedriger ist als diejenige der repräsentativen Personen.

Dementsprechend wurden in der Endlagerstandortregion eingehende Erkundungen und Erhebungen über typische „expositionensintensive“ Transport- und Betriebsvorgänge durchgeführt und die entsprechenden Strahlenexpositionen unter Verwendung des Messgrößensystems der 1990er ICRP-Empfehlungen /ICRP 90/ bestimmt. Die Dosisberechnung erfolgte – in Übereinstimmung mit der 1991er Transportstudie Konrad – generell mittels einfacher Expositionsmodelle und einfacher Strahler-Rezeptor-Anordnungen, die einer analytischen Lösung zugänglich sind, wie beispielsweise die Strahlenexposition einer Person, die durch ein in kurzem Abstand passierendes Abfalltransportfahrzeug (Strahlungsquelle) bei gegebener Geschwindigkeit exponiert wird, oder die Exposition einer Person, die sich während eines kurzzeitigen Stopps zeitweilig in der Nähe eines solchen Fahrzeuges aufhält. Komplexere transporttypische Expositionssituationen lassen sich in der Regel auf solch einfache, analytisch fassbare Strahler-Rezeptor-Konfigurationen zurückführen und somit quantitativ beschreiben.

Hinsichtlich der Ermittlung des abstandsabhängigen Dosisleistungsverlaufes eines Abfallbehälters entspricht diese Vorgehensweise der 1991er Transportstudie Konrad und beruht im Wesentlichen auf der für Transportsicherheitsanalysen entwickelten RADTRAN 4-Methodik /NEU 93/. Die RADTRAN 4-Methodik basiert – in leicht modifizierter Form – auf dem bekannten quadratischen Abstandgesetz. Ihre Anwendung führt insbesondere im Nahbereich in wenigen Metern Abstand zu großen Transportbehältern im Allgemeinen zu einer deutlichen Überschätzung des tatsächlichen Dosisleistungsverlaufes und den daraus resultierenden Personendosen, vgl. /WIE 91, STE 02, MIL 07/; in größeren Abständen vom Behälter lässt sich jedoch eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen gemessenen und analytisch bestimmten Dosisleistungsverläufen feststellen.

Die auf dieser Grundlage für normale (unfallfreie) Transportbedingungen ermittelten Strahlenexpositionen der Bevölkerung und des Transportpersonals sind zusammenfassend in Tab. 7.1 (Bevölkerung) und in Tab. 7.3 (Arbeitskräfte) für die in dieser Untersuchung betrachteten Anlieferungsszenarien angegeben. Die tabellierten Personendosen beziehen sich auf repräsentative Personen (vormals kritische Personen oder Personengruppen genannt) und berücksichtigen insbesondere die in den vorangehenden Kapiteln erläuterten Angaben und Erkenntnisse zu dem geplanten Beförderungsaufkommen, den Beförderungsmodalitäten, den radiologisch relevanten Abfallbehälter-

eigenschaften und den logistischen und verkehrstechnischen Gegebenheiten in der Standortregion. Beurteilungsunsicherheiten in der Datenlage oder aufgrund vorläufiger Planungen wurde dabei in konservativ-vereinfachender Weise Rechnung getragen, um eine Unterschätzung der potenziellen beförderungsbedingten Strahlenexpositionen auszuschließen. Die ermittelten Strahlenexpositionen sind somit obere Dosisabschätzungen, die unter normalen Transportbedingungen weder innerhalb noch außerhalb der engeren Standortregion überschritten werden.

7.1 Beförderungsbedingte Strahlenexpositionen der Bevölkerung

Für die Bestimmung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Transporte mit radioaktiven Stoffen wird in Übereinstimmung mit den internationalen Transportvorschriften /IAEA 05/ der Erwachsene (Altersgruppe > 17 Jahre) als Referenzperson betrachtet. Die in dieser Studie ermittelten Werte stellen obere Abschätzungen für diese Referenzperson dar, ohne Berücksichtigung individueller Schwankungen z. B. infolge von Unterschieden bei Gewicht und Größe. Für die Belange des Strahlenschutzes ist diese Betrachtungsweise in der Regel ausreichend. Für jüngere Altersgruppen können die ermittelten Werte für die externe Strahlenexposition aufgrund der Körpergeometrie geringfügig abweichen. Zur Berücksichtigung dieser Unterschiede werden hier daher zusätzlich die für die ungünstigste Altersgruppe 0 bis 1 Jahr (Säugling) berechneten Werte für das realistische Szenarium ausgewiesen

Im Zusammenhang mit der Dosisberechnung der Anwohner/Passanten der Hauptanlieferungsstrecken wurde dabei generell ein unabgeschirmter Aufenthalt einer permanent im Freien anwesenden Person unterstellt und entsprechende Dosisbeiträge durch sämtliche Abfalltransporte während der Vorbeifahrt in einem Abstand von 5 m bzw. 10 m berücksichtigt. Zusätzlich wurde bei 5 % der Abfalltransporte auch ein Expositionsanteil während gelegentlicher verkehrsbedingter Haltezeiten z. B. an Verkehrssampeln oder an Bahnsignalen unterstellt, bei der das Transportfahrzeug während des Stopps von 2 min (Straße) bzw. 5 min (Schiene) in ungünstigster Position vor der betrachteten Person anhält.

Demgegenüber liegt der Dosisberechnung für die Anwohner der Rangierbahnhöfe bzw. Übergabebahnhöfe, auf denen Abfalltransporte betriebsbedingt längeren Standzeiten (Dauer ca. 1 - 2 Stunden) unterworfen sein können, ein entsprechender Expositionsverlauf für eine repräsentative Person mit permanenter Anwesenheit zugrunde. Der für

die Berechnungen zugrunde gelegte Mindestabstand dieser Person zu den Abfallwagen, die sich auf dem gesamten Gleis verteilt befinden können, beträgt aufgrund des Abstandes der nächsten Wohnbebauung zum Gleiskörper 130 m im Fall Beddingen und 100 m für Seelze/Hannover. Zur realitätsnahen Expositionsrechnung wurde hierbei nicht ein permanenter Aufenthalt im Freien angenommen sondern zeitanteilig (75 % Aufenthalt innerhalb von Wohngebäuden und 25 % im Freien) eine erhöhte Abschirmung durch Gebäudestrukturen (mittlerer Schwächungsfaktor DRF = 10) berücksichtigt.

Für die Berechnung der transportbedingten Strahlenexposition der Beschäftigten der Schlackenverwertung (siehe Abb. 6.2) der nahegelegenen Stahlwerke wurde vorausgesetzt, dass eine Exposition nur während der kurzen Zeit des Abkippens der Schlacke (kleiner als eine halbe Stunde) gegeben ist und ein Beschäftigter im durchgehenden Schichtbetrieb nur durch etwa 10 % der Abfalltransporte in einem Mindestabstand von etwa 50 m exponiert wird. Damit wird berücksichtigt, dass nicht während jeder Schicht mit einem gleichzeitigen Eintreffen eines Abfalltransportes auf dem Übergabegleis zu rechnen ist.

Die auf dieser Basis berechneten Werte sind in Tab. 7.1 (Bevölkerung) und Tab. 7.3 (Arbeitskräfte) zusammenfassend dargestellt. Demnach liegen die nach Maßgabe des 80/20-Szenariums zu erwartenden beförderungsbedingten höchsten Strahlenexpositionen der Bevölkerung (Erwachsene) – ausgedrückt als effektive Dosis – in der Endlagerstandortregion in einem Größenbereich von bis zu 0,02 mSv/a und betragen damit nur einen Bruchteil des relevanten Dosisgrenzwertes für die Bevölkerung von 1 mSv/a. Die höchsten prognostizierten Personendosen beziehen sich auf die unmittelbaren Anwohner/Passanten der Hauptanlieferungsstrecken radioaktiver Abfälle sofern sie im Freien durch alle passierenden Abfalltransporte und während gelegentlicher verkehrsbedingter Haltezeiten exponiert werden (s. o.). Für Anwohner bzw. an den Abfalltransporten unbeteiligte Beschäftigte z. B. im Bereich der Rangier- und Übergabebahnhöfe in der Region, an denen betriebsbedingt üblicherweise längere Stand- oder Verweilzeiten von Abfallsendungen zu erwarten sind, liegen die zu erwartenden Strahlenexpositionen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten, insbesondere jedoch aufgrund der erheblichen Abstände zwischen den Transportfahrzeugen und den Gebäuden, noch unterhalb der vorgenannten Dosiswerte. Diese Feststellungen gelten im Grundsatz auch für den hypothetischen Fall einer ausschließlichen Abfallanlieferung auf dem Schienen- oder Straßenweg sowie bei Betrachtung des Säuglings (Altersgruppe 0 bis 1 Jahr, vgl. Tab. 7.2), für den die gleichen konservativen Annahmen wie beim Erwachse-

nen getroffen wurden. Unter diesen Annahmen erhöht sich die potenzielle Strahlenexposition maximal um den Faktor 1,2.

7.2 Beförderungsbedingte Strahlenexpositionen des Transportpersonals

Die in Tab. 7.3 angegebenen Strahlenexpositionen für das Transportpersonal beziehen sich auf Funktionsträger (repräsentative Personen) in der Endlagerregion wie Rangierer, Triebfahrzeugführer, LKW-Fahrer/Begleiter etc., die unmittelbar mit der Durchführung der geplanten Abfalltransporte befasst sind und basieren auf einer eingehenden Analyse der mit der Transportabwicklung durchzuführenden ortstypischen expositionintensiven Arbeitsabläufe und Tätigkeiten. Beim Schienentransport sind dies beispielsweise Expositionen während des Entkuppelns und Entschlauchens beim Rangieren sowie bei der Passage vorbeifahrender Wagen z. B. bei der Ablaufüberwachung. Als weitere Personengruppe werden die an den Abfalltransporten beteiligten Fahrzeugführer der jeweiligen Verkehrsträger gesondert betrachtet.

Der in Tab. 7.3 genannte Wert für Fahrzeugführer von Straßenfahrzeugen berücksichtigt, dass – aufgrund der zahlreichen Ablieferungspflichtigen und gängiger Betriebspraktiken und Einsatzhäufigkeiten der LKW-Fahrer – im Allgemeinen eine größere Anzahl von Einzelpersonen mit der Abfalltransportabwicklung befasst ist. Ein ausschließlicher oder überwiegender Einsatz einer Einzelperson als Fahrzeugführer eines Straßentransportfahrzeugs für die Anlieferung zum Endlager Konrad kann aufgrund gängiger Betriebspraktiken (Job-Rotation) einschlägiger Abfalltransportunternehmen dagegen ausgeschlossen werden. Für das realistische 80/20-Szenarium wurde dabei aufgrund der Angaben der Transportunternehmen für die Berechnungen eine Mindestanzahl von 15 Fahrern unterstellt, für das Szenarium 100 % Straßentransport wurde diese Zahl auf Grund des höheren Transportaufkommens auf 40 Fahrer erhöht. Neben der Exposition während der Fahrt wurde für den Fahrer/Begleiter auch ein Expositionsanteil während der Abfertigung durch einen 10minütigen Aufenthalt im Nahbereich berücksichtigt. Als mittlere Fahrtzeit und Expositionsdauer wurden 6 Stunden unterstellt.

Für den Schienenverkehr ergaben die durchgeführten Erhebungen zu den Transportmodalitäten ebenfalls, dass aufgrund von Schichtbetrieb und wechselndem Personaleinsatz nicht jede bei der Abfertigung beteiligte Person durch sämtliche Abfalltransporte exponiert wird. Auf dem Rangierbahnhof Seelze/Hannover herrscht durchgängiger

Schichtbetrieb, so dass für die Bestimmung der Strahlenexposition ein Personalwechsel mit 3 Schichten unterstellt wurde. Der Übergabebahnhof Beddingen wird dagegen nur mit zwei Schichten betrieben, wobei das Rangierpersonal jedoch verstärkt wechselnde Funktionen und Tätigkeiten ausübt (Job-Rotation). Für die Berechnungen wurden dabei die jeweils typischen Zeiten und Expositionsszenarien für die entsprechenden Tätigkeiten angesetzt. Für die Überführungsfahrt von Beddingen zum Endlager Konrad wurde beispielsweise für den Triebfahrzeugführer eine Fahrtzeit von 20 min unterstellt.

Die für diese anzahlmäßig sehr begrenzte Personengruppe ermittelten Individualdosen belaufen sich nach Maßgabe des 80/20-Szenariums auf Werte bis zu etwa 0,4 mSv/a für den Schienentransport (Rangierer etc.) und etwa 0,6 mSv/a für den Straßentransport (Fahrzeugführer/Begleitpersonal) und liegen damit nicht nur deutlich unterhalb des für sogenannte beruflich strahlenexponierte Arbeitskräfte relevanten Dosisgrenzwertes von 20 mSv/a, sondern unterschreiten auch den Dosisgrenzwert für die allgemeine Bevölkerung. Die angegebenen Personendosiswerte für das Transportpersonal liegen damit im Übrigen in der gleichen Größenordnung wie die Erfahrungswerte für vergleichbare Transport- und Betriebsabläufe im Bereich der Beförderung radioaktiver Stoffe in Deutschland, vgl. /SCH 04/.

Aufgrund der relativ geringen zu erwartenden beförderungsbedingten Strahlenexpositionen des Transportpersonals sind – in Übereinstimmung mit den gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften (vgl. Abschnitt 1.7.2 ADR) – daher aus Strahlenschutzermäßigungen im Regelfall „weder besondere Arbeitsabläufe noch eine detaillierte Überwachung oder Dosis einschätzungsprogramme oder individuelle Buchführung notwendig“, soweit keine aus anderweitigen Tätigkeiten erworbenen Strahlenexpositionen dem entgegen stehen. Demnach wäre das Transportpersonal aufgrund der im Zusammenhang mit Transporten zum Endlager Konrad erworbenen Strahlenexpositionen in der Regel auch nicht als beruflich strahlenexponiertes Personal im Sinne von § 54 StrlSchV zu klassifizieren und somit der Dosisgrenzwert von 1 mSv/a für die Bevölkerung maßgeblich.

Höhere Personendosiswerte ergäben sich lediglich für die mit der Transportabwicklung befassten Fahrzeugführer bzw. Transportbegleiter im hypothetischen Fall einer ausschließlichen Abfallanlieferung auf dem Straßenweg. Aufgrund des relativ großen Fahrerpools, der im Realisierungsfalle für ein solches Anlieferungsszenarium erforderlich wäre und auch zum Einsatz käme, ist die mit diesem Szenarium verbundene potenzielle Personendosiszunahme gleichwohl begrenzt und wurde unter Berücksichtigung der

relevanten Transportmodalitäten sowie üblicher Betriebspraktiken und Einsatzhäufigkeiten der eingesetzten Fahrer auf insgesamt höchstens 1,1 mSv/a abgeschätzt (wobei konservativ nur ein kleiner Personalpool mit 40 Fahrern angesetzt wurde). Erst in diesem hypothetischen Fall wäre nach § 54 StrlSchV auch eine Einstufung der LKW-Fahrer als beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B notwendig, da hier eine geringfügige Überschreitung des Grenzwertes von 1 mSv/a möglich wäre.

7.3 Zusammenfassung und Bewertung

Bevölkerung

Die durchgeführten Untersuchungen über die potenziellen radiologischen Auswirkungen der geplanten Anlieferung und Einlagerung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad zeigen, dass die zu erwartenden beförderungsbedingten Strahlenexpositionen der Bevölkerung (für alle betrachteten Altersgruppen) in der Endlagerregion beim normalen Transport mit Werten im Bereich von maximal wenigen Hundertstel mSv/a bei allen betrachteten Transportszenarien generell gering bis sehr gering sind und damit nur einen Bruchteil der natürlichen Strahlenexposition (in Deutschland im Mittel 2,1 mSv/a) beitragen. Dies gilt – aufgrund des im Regelfalle geringeren Abfalltransportaufkommens – umso mehr für Personen (Bevölkerung) außerhalb der engeren Standortregion, die im Rahmen der bundesweit verteilten Abfalltransportabwicklung in irgendeiner Weise durch die Anlieferung konradgängiger Abfälle zum Endlager Konrad tangiert werden oder tangiert werden könnten.

Dabei ist noch anzumerken, dass die für die Berechnungen getroffenen Annahmen hinsichtlich der Expositionsszenarien (z. B. ganzjähriger Aufenthalt im Freien, Exposition durch sämtliche Abfalltransporte) bereits sehr konservativ sind. Hinzu kommen weitere Konservativitäten insbesondere hinsichtlich der Dosisleistung der Abfallgebinde (maximale ODL-Werte, vgl. Abschnitt 5.3), die zu einer Überschätzung der realistisch zu erwartenden Strahlenexposition führen.

Für Personen, die nur gelegentlich im Nahbereich der von den Abfallgebinden ausgehenden Strahlung ausgesetzt sind (z. B. bei einer zufälligen Passage eines Abfalltransportes während des Halts an einer Bahnschranke) oder für Passanten/Beschäftigte entlang der Transportstrecken, die sich dort nur zeitweilig und in größeren Entfernungen zu den Abfalltransporten aufhalten, ist die mit der Anlieferung

zum Endlager Konrad verbundene Strahlenexposition im Vergleich zu derjenigen aus natürlichen Quellen erst recht vernachlässigbar.

Transportpersonal

Die für das Transportpersonal ermittelten Werte der Strahlenexpositionen von maximal etwa 0,6 mSv/a für das realistische Szenarium liegen im Rahmen vergleichbarer bundesdeutscher Richt- und Erfahrungswerte, die in den meisten Transportsektoren weniger als 1 mSv/a betragen /SCH 04/. Die beförderungsbedingten Strahlenexpositionen des in dieser Studie betrachteten Transportpersonals liegen bei Zugrundelegung des realistischen 80/20-Szenariums unterhalb des für die Bevölkerung maßgeblichen Grenzwertes von 1 mSv/a. Nach den Transportvorschriften ist demnach für das zur Abfallanlieferung eingesetzte Transportpersonal in der Regel keine besondere Strahlenschutzüberwachung notwendig, d. h. insbesondere auch, dass eine Einstufung als beruflich strahlenexponierte Person gemäß Strahlenschutzverordnung in diesem Zusammenhang nicht erforderlich ist. Nur im Fall des hypothetischen Szenariums 100 % Straßenanlieferung kann unter den getroffenen konservativen Annahmen eine Überschreitung des Grenzwertes von 1 mSv/a für den LKW-Fahrer nicht sicher ausgeschlossen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine größere als die in dieser Studie unterstellte Anzahl an Fahrern zum Einsatz kommt. Aus diesem Grund und aufgrund weiterer konservativer Annahmen bei der Berechnung (z. B. hinsichtlich der Expositionszeit und Abstände) ist es wahrscheinlich, dass die Werte der transportbedingten Strahlenexpositionen der LKW-Fahrer unterhalb von 1 mSv/a liegen werden. Allerdings wird in der Praxis insbesondere das für den Straßentransport radioaktiver Stoffe eingesetzte Personal meist als beruflich exponierte Personen der Kategorie B geführt, die damit einer entsprechenden Strahlenschutzüberwachung unterliegen.

Vergleich zur Transportstudie Konrad 1991

Die in dieser Studie berechneten maximalen Strahlenexpositionen von 0,1 bis 0,4 mSv/a für das Transportpersonal im Schienenverkehr bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie die in der Transportstudie Konrad von 1991 angegebenen Werte (0,2 bis 0,7 mSv/a) für das Szenarium 100 % Schienentransport. Die Abweichungen nach unten sind sowohl auf die neueren Erkenntnisse bzgl. der Abfälle und ihrer Eigenschaften als auch auf die durch den fortgeschrittenen Planungsstand möglichen genaueren Analysen, z. B. hinsichtlich der expositionsintensiven Tätigkeiten, zurückzu-

führen. Für den LKW-Fahrer konnten auf Basis des damaligen Planungsstandes keine Aussagen getroffen werden.

Demgegenüber liegen die in dieser Studie berechneten Werte für die Strahlenexpositionen der Bevölkerung insbesondere für das Szenarium 100 % Schienenanlieferung mit maximal 0,025 mSv/a für den Erwachsenen (Anwohner der Hauptanlieferungsstrecke Seelze/Hannover) deutlich unter dem in der Transportstudie von 1991 ausgewiesenen maximalen Wert von 0,2 mSv/a (Rangierbahnhof Braunschweig, Bewohner Alte Salzdahlumer Straße). Der Bahnhof Braunschweig wird nach dem aktuellen Planungsstand durch Abfalltransporte zum Endlager Konrad nicht berührt. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten mit größeren Abständen zum Gleiskörper bei dem statt dessen betrachteten Rangierbahnhof Seelze/Hannover sind hier die Anwohner nur möglichen Strahlenexpositionen im Bereich von etwa 0,02 mSv/a ausgesetzt. Doch auch für andere Personengruppen bzw. Streckenabschnitte machen sich die im Vergleich zur Transportstudie von 1991 realistischeren Annahmen z. B. hinsichtlich des jährlichen Abfallbeförderungsaufkommens, der Standzeiten sowie der Abfallgebindeeigenschaften (Dosisleistung) in einer Reduktion der berechneten Strahlenexpositionen bemerkbar.

Schlussfolgerungen

Insgesamt kann für alle drei betrachteten Transportszenarien festgestellt werden, dass die maßgebenden und international anerkannten Dosisgrenzwerte für die Beförderung radioaktiver Stoffe entsprechend dem derzeitigen Planungs- und Erkenntnisstand zur Abfallanlieferung sicher eingehalten werden können. Die dargestellten Untersuchungsergebnisse stützen die Schlussfolgerung, dass die von den Beteiligten vorgesehenen Schutz- und Vorsorgemaßnahmen beim bestimmungsgemäßen (unfallfreien) Abfalltransport in Verbindung mit den Anforderungen an die Abfallverpackungen und die Abfallanlieferung einen hohen Schutz- und Sicherheitsstandard für die Bevölkerung und das Transportpersonal gewährleisten. Diese für das erste Betriebsjahrzehnt des Bundesendlagers repräsentative Feststellung und Beurteilung hat – gestützt auf die Abfallprognose der längerfristig anfallenden und endzulagernden radioaktiven Abfälle (vgl. Abschnitt 4.4) in Deutschland und eine der heutigen gleichwertige Abfallkonditionierungs- und Verpackungsstrategie vorausgesetzt – grundsätzlich auch Gültigkeit für den über das erste Betriebsjahrzehnt hinausgehenden Anlieferungs- und Einlagerungsbetrieb des Endlagers Konrad.

Tab. 7.1 Beförderungsbedingt zu erwartende maximale Strahlenexpositionen (gerundet) der Bevölkerung (Erwachsene) aufgrund der geplanten Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad auf dem Schienen- und Straßenweg für verschiedene Anlieferungs-szenarien

Personengruppe/Streckenabschnitt bzw. Funktionsbereich	Abstand	Effektive Dosis (ICRP 60) (in mSv/a)		
		100 % Schiene	100 % Straße	80 % Schiene/ 20 % Straße
Schienentransport:				
Anwohner Hauptanlieferungsstrecke (Seelze/Beddingen) Aufenthalt im Freien	5 m	ca. 0,025	---	ca. 0,02
Aufenthalt im Freien	10 m	ca. 0,012	---	ca. 0,01
Anwohner Rbf-Beddingen (nordöstlicher Betriebsbereich) Aufenthalt 25 % im Freien/75 % im Gebäude	> 130 m	ca. 0,005	---	ca. 0,004
Beschäftigte Schlackenverwertung im Nahbereich des Übergabegleises des Endlagers Konrad	> 50 m	< 0,004	---	ca. 0,003
Anwohner Rbf-Seelze/Hannover (westl. Bahnhofsbereich) Aufenthalt 25 % im Freien/75 % im Gebäude	ca. 100 m	ca. 0,017	---	< 0,014
Straßentransport:				
Anwohner der Hauptanlieferungsstrecken (z.B. A 39/ K 39) Aufenthalt im Freien	5 m	---	ca. 0,025	ca. 0,005
Aufenthalt im Freien	10 m	---	ca. 0,009	< 0,002
Zum Vergleich: Relevanter Personendosisgrenzwert	---	----- 1,0 -----		
Natürliche Strahlenexposition	---	----- 2,1 -----		

Tab. 7.2 Beförderungsbedingt zu erwartende maximale Strahlenexpositionen (gerundet) der Bevölkerung (Säugling) aufgrund der geplanten Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad auf dem Schienen- und Straßenweg

Personengruppe/Streckenabschnitt	Abstand	Effektive Dosis (ICRP 60) (in mSv/a)
		80 % Schiene/ 20 % Straße
Schienentransport:		
Anwohner Hauptanlieferungsstrecke (Seelze/Beddingen)		
Aufenthalt im Freien	5 m	ca. 0,024
Aufenthalt im Freien	10 m	ca. 0,012
Anwohner Rbf-Beddingen (nordöstlicher Betriebsbereich)		
Aufenthalt 25 % im Freien/75 % im Gebäude	> 130 m	ca. 0,005
Anwohner Rbf-Seelze/Hannover (westl. Bahnhofsbereich)		
Aufenthalt 25 % im Freien/75 % im Gebäude	ca. 100 m	ca. 0,02
Straßentransport:		
Anwohner der Hauptanlieferungsstrecken (z.B. A 39/ K 39)		
Aufenthalt im Freien	5 m	ca. 0,006
Aufenthalt im Freien	10 m	ca. 0,002
Zum Vergleich: Relevanter Personendosisgrenzwert	---	1,0

Tab. 7.3 Beförderungsbedingt zu erwartende maximale Strahlenexpositionen des Transportpersonals aufgrund der geplanten Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad auf dem Schienen- und Straßenwege für verschiedene Anlieferungsszenarien

Personengruppe/Funktionsbereich	Effektive Dosis (ICRP 60) in mSv/a		
	100 % Schiene	100 % Straße	80 % Schiene/ 20 % Straße
Schienentransport:			
<u>Übergabebahnhof Beddingen:</u>			
- Rangierer (Einfahr-, Richtungs-, Ausfahrgruppe)	ca. 0,2	---	ca. 0,16
- Lokrangierführer (Einfahr-, Richtungs-, Ausfahrgruppe, Ablaufberg)	< 0,4	---	< 0,32
- Triebfahrzeugführer (Übergabefahrt bis Endlager)	ca. 0,06	---	< 0,05
<u>Rangierbahnhof Seelze/Hannover:</u>			
- Rangierer (Einfahr-, Richtungs-, Ausfahrgruppe West und Ost)	ca. 0,1	---	ca. 0,08
- Ablaufüberwachung (Richtungsgruppe West)	ca. 0,2	---	ca. 0,16
Straßentransport:			
LKW-Fahrzeugführer/Begleitpersonal	---	< 1,1	ca. 0,6
Zum Vergleich: Relevanter Personendosisgrenzwert	----- 6 ¹ -----		
¹ Hinweis: Soweit die berufliche Strahlenexposition des Transportpersonals einen Wert von 1 mSv/a übersteigt, sind gemäß der Transportvorschriften ergänzend besondere Strahlenschutz- und Vorsorgemaßnahmen zu beachten; ab 6 mSv/a ist eine individuelle Personendosisüberwachung vorgesehen. Der Wert von 6 mSv/a entspricht auch dem Grenzwert für die Einordnung als beruflich strahlenexponierte Person der Kategorie B gemäß § 54 StrlSchV.			

8 Transportunfallrisiko

8.1 Generelle Vorgehensweise

Die Abfalltransporte können auf ihrem Weg zum Endlager Konrad in Unfälle verwickelt werden, bei denen Abfallgebinde u. U. den dabei auftretenden Unfallbelastungen nicht standhalten, so dass es zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung kommen kann. Je nach dem Aktivitätsinventar der betroffenen Abfallbehälter und dem infolge der Unfallbelastung in die Umgebung freigesetzten Aktivitätsanteil variieren die unfallbedingten radiologischen Auswirkungen wie Strahlenexpositionen von Personen und Kontaminationen von Boden, Bewuchs oder anderen Oberflächen in einem weiten Bereich. Die Häufigkeit, mit der für das betrachtete Transportaufkommen bestimmte Auswirkungen zu erwarten sind, hängt von mehreren Einflussgrößen ab, zu denen insbesondere zählen:

- Die Häufigkeit, mit der Unfallbelastungen unterschiedlicher Art und Ausmaßes auf Abfallgebinde einwirken;
- Verhalten eines Abfallbehälters und der darin befindlichen Abfallprodukte in Bezug auf das Freisetzungsverhalten unter unfallbedingten Lasteinwirkungen;
- Aktivitätsinhalt und Anzahl der betroffenen Abfallgebinde;
- Die Häufigkeit, mit der unterschiedliche atmosphärische Ausbreitungs- und Ablagerungsbedingungen vorliegen, die ihrerseits die luftgetragenen und abgelagerten Schadstoffkonzentrationen und damit die potenziellen radiologischen Auswirkungen beeinflussen.

Um das Risiko durch Transportunfälle für das Abfalltransportaufkommen zum Endlager Konrad zu ermitteln, wird im Folgenden das Spektrum möglicher unfallbedingter Strahlenexpositionen von Personen erfasst und gleichzeitig die Häufigkeit quantifiziert, mit der mit bestimmten radiologischen Auswirkungen zu rechnen ist.

Die Ermittlungen des mit Transportunfällen verbundenen Risikos in der Standortregion beziehen sich auf den Umkreis mit einem Radius von 25 km um das Endlager Konrad, in dem alle Abfalltransporte zum Endlager zusammenlaufen. Die Größe des Bereichs, für den das Unfallrisiko der Abfalltransporte insgesamt ermittelt wird, ist u. a. darin begründet, dass in jedem Fall alle in der Endlagerregion zusammenlaufenden Abfall-

transporte und die für dieses Gebiet repräsentativen Schienen- und Straßentransportstrecken erfasst werden. Auch für den Übergabebahnhof Beddingen, der wenige Kilometer vor dem Endlager Konrad liegt, wird eine Abschätzung des Transportunfallrisikos durchgeführt.

Zur Erfassung und Beurteilung der ganzen Bandbreite der potenziellen radiologischen Auswirkungen möglicher Straßen- und Schienentransportunfälle werden insgesamt drei Anlieferungsszenarien betrachtet: Neben der realitätsnahen Variante mit einer bestimmten Aufteilung der Abfalltransporte auf die Schiene und Straße werden auch zwei eingrenzende, aber hypothetische Anlieferungsszenarien mit einer ausschließlichen Abfallanlieferung auf der Schiene (100 % Schienentransport) und Straße (100 % Straßentransport) zugrunde gelegt.

Grundlage für die Ermittlung von Unfallhäufigkeiten sind Unfallstatistiken für den Güterzugverkehr und Schwerlastverkehr auf den Bundesautobahnen in Deutschland. Die Anwendung dieser umfassenden Statistik auf die Endlagerregion ist möglich, da hier keine ungünstigeren Verkehrsbedingungen verglichen mit dem größeren Gebiet, auf das sich die Unfallstatistik bezieht, anzunehmen sind. Für den Übergabebahnhof Beddingen wird im Sinne einer pessimistischen Abschätzung eine früher aufbereitete Unfallstatistik für den inzwischen stillgelegten Rangierbahnhof Braunschweig herangezogen, der aufgrund seiner speziellen Betriebsweise im Vergleich zu anderen großen Rangierbahnhöfen im Bundesgebiet unfallträchtiger war.

Sowohl für Schienentransporte als auch Straßentransporte wird die innerhalb des 25 km-Umkreises zurückgelegte Fahrstrecke bis zum Erreichen des Endlagers zugrunde gelegt. Hierfür werden die Eintrittshäufigkeiten von Transportunfällen und die damit verbundenen radiologischen Auswirkungen ermittelt. Damit stellen die für das gesamte Gebiet von 25 km Umkreis ermittelten Unfallhäufigkeiten für jeden kleineren Transportabschnitt, der bezüglich möglicher Unfallrisiken in Betracht gezogen wird, abdeckende Werte dar. Mit anderen Worten: Ist für eine Transportstrecke insgesamt mit einer bestimmten Häufigkeit von Transportunfällen zu rechnen, so kann für eine Teilstrecke davon die Unfallhäufigkeit auf keinen Fall größer sein, sondern wird im Allgemeinen entsprechend geringer ausfallen. An keiner Stelle innerhalb des 25 km Umkreises können somit die zu erwartenden Häufigkeiten von Transportunfällen ungünstiger sein als für den gesamten 25 km Umkreis.

Analoges gilt für andere betrachtete Transportstrecken von vergleichbarer Länge ohne überdurchschnittliche Gefahrenbereiche im übrigen Bundesgebiet, da hier bestenfalls ein Bruchteil des gesamten Transportaufkommens radioaktiver Abfälle entlanggeführt wird, verglichen mit dem 25 km Umkreis des Endlagers Konrad.

Für den Untersuchungszweck werden im Folgenden zunächst diejenigen Bestandteile der Transportunfallrisikoanalysen behandelt, die zur Bestimmung der aus Transportbehältern potenziell freigesetzten Abfallaktivität bei verschiedensten Unfallbelastungen beitragen. Dazu werden Unfallbelastungen von Transportfahrzeugen und Transportbehältern so in eine Anzahl von 9 Belastungsklassen (BK) eingeteilt, so dass das Spektrum möglicher Unfalleinwirkungen (Aufprall, Brand etc.) hinreichend erfasst wird. Daran schließt sich aufgrund des sehr unterschiedlichen Freisetzungsverhaltens verschiedener Behältertypen (Beton-, Guss-, Stahlblechbehälter) und ggf. verschiedener Abfallprodukte (z. B. Zement/Beton, hochdruckkompaktierte Abfälle) bei Unfallbelastungen eine Unterteilung der anzuliefernden Abfälle und Abfallgebilde in verschiedene Abfallgebindergruppen (AGG) an. Bei dieser Klassifizierung ist das Freisetzungsverhalten das entscheidende Kriterium.

Schließlich werden dann in Abhängigkeit von den vorab definierten Belastungsklassen und Abfallgebindergruppen freisetzungsrelevante Angaben zusammengestellt, welcher Anteil des Aktivitätsinventars (Freisetzungsanteil) dabei aus Abfallgebindern potenziell freigesetzt werden kann. Dabei werden Aerosolpartikel, die infolge mechanischer Beaufschlagung von Abfallbehälter und Abfallprodukt freigesetzt werden bzgl. ihrer Partikelgröße vier verschiedenen Größenintervallen des aerodynamischen Durchmessers zugeordnet. Bei durch einen Brand verursachten Freisetzungen radioaktiver Stoffe wird wegen des unterschiedlichen Freisetzungsverhaltens zwischen Tritium (H-3), Kohlenstoff (C-14), Halogenen (z. B. Jod) und sonstigen Radionukliden unterschieden. Aus den Freisetzungsanteilen und den im Abfallgebinder befindlichen nuklidspezifischen Aktivitäten bestimmen sich dann die freigesetzten nuklidspezifischen Aktivitätsmengen – der sogenannte Quellterm.

Im Anschluss werden für alle Anlieferungs- bzw. Beförderungsszenarien die entsprechenden Unfallhäufigkeiten berechnet, bevor im letzten Schritt die potenziellen radiologischen Konsequenzen einer Vielzahl von Kombinationen unfallbedingter Freisetzungen und meteorologischer Ausbreitungsverhältnisse simuliert und statistisch ausgewertet werden.

8.2 Behälterversagen und Freisetzungsverhalten

8.2.1 Definition der Belastungsklassen

In Bezug auf mögliche Unfallauswirkungen sind die unfallbedingt auftretenden mechanischen und/oder thermischen Belastungen der Abfallbinde wesentlich. Diese bestimmen in Verbindung mit den Eigenschaften des Abfallbehälters und des darin befindlichen Abfallproduktes (z. B. Zement/Beton, Presslinge etc.) das Ausmaß der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung. Hier ist naturgemäß ein sehr großes Spektrum an Unfallbelastungen möglich. Diese können von geringfügigen bis zu sehr hohen mechanischen und thermischen Beanspruchungen der Abfallbehälter reichen.

Bei Brandereignissen, die allein oder auch in Verbindung mit mechanischen Behälterbelastungen auftreten, kann der für die Aufheizung des Abfallprodukts und damit für die Freisetzung radioaktiver Stoffe maßgebliche thermische Energieeintrag ebenfalls in weiten Grenzen variieren. Dieser thermische Energieeintrag hängt von der Dauer des Brandes, von der Art und Weise, wie das Abfallgebilde dem Brand ausgesetzt ist, und von der Flammentemperatur ab. Bei sogenannten Kombinationsereignissen, bei denen zu einer mechanischen Einwirkung noch ein Brand auftritt, wird die Freisetzung radioaktiver Stoffe zusätzlich durch das Ausmaß der mechanischen Vorschädigung beeinflusst.

Das weite Spektrum möglicher Transportunfallbelastungen macht zur quantitativen Erfassung von Unfallrisiken eine Unterteilung in eine begrenzte Zahl von Belastungsklassen erforderlich, die jeweils einen bestimmten Bereich von möglichen Unfalleinwirkungen auf Abfallbinde abdecken. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden 9 Belastungsklassen mit Merkmalen gemäß Tab. 8.1 gewählt, die bereits in der Transportstudie Konrad /GRS 91/ verwendet wurde. Die wesentlichen Bestimmungsgrößen des Schemas sind die Aufprallgeschwindigkeit und die den thermischen Energieeintrag bestimmende Branddauer und -temperatur.

Die Belastungsklassen BK 1 (Aufprallgeschwindigkeit bis zu 35 km/h), BK 4 (Aufprallgeschwindigkeit zwischen 36 und 80 km/h) und BK 7 (Aufprallgeschwindigkeit > 80 km/h) repräsentieren hierbei die Ereignisabläufe, bei denen die auftretenden Behälterbelastungen ausschließlich mechanischer Art sind. Die übrigen Klassen umfassen dagegen Unfallsituationen, bei denen es zusätzlich zu einem Brandereignis kommt. Um dabei die Zahl der erforderlichen Belastungsklassen möglichst gering zu

halten, werden Unfallereignisse, bei denen ausschließlich ein Brand ohne zusätzliche mechanische Beaufschlagung auftritt, in die kombiniert mechanisch-thermischen Belastungsklassen 2 oder 3 (Aufprallgeschwindigkeit ≤ 35 km/h und nachfolgender Brand) eingeordnet.

Tab. 8.1 Definitionsschema der neun Belastungsklassen

Aufprallgeschwindigkeit	Branddauer und -temperatur		
	ohne Brand	30 min / 800 °C Brand	60 min / 800 °C Brand
≤ 35 km/h	BK 1	BK 2	BK 3
36 – 80 km/h	BK 4	BK 5	BK 6
> 80 km/h	BK 7	BK 8	BK 9

Als Maß für die mechanische Belastung wird die Fahrgeschwindigkeit des Abfalltransports angegeben, bei der sich der Transportunfall ereignet. Zur Bestimmung von Freisetzunganteilen wird unterstellt, dass die betroffenen Abfallgebinde mit der Obergrenze des jeweiligen Geschwindigkeitsintervalls einer Belastungsklasse auf ein hartes, unnachgiebiges Hindernis prallen. Für den Geschwindigkeitsbereich > 80 km/h wird dabei eine Geschwindigkeit von 110 km/h angesetzt.

In seltenen, besonders ungünstig gelagerten Einzelfällen ist es möglich, dass dieses Modell die tatsächlichen Unfallbelastungen unterschätzt. Denkbar wäre zum Beispiel, dass im Verlauf eines Unfalls im Geschwindigkeitsbereich 0 bis 35 km/h schwere Lasten (z. B. das Triebfahrzeug) auf einen Transportbehälter stürzen oder dass bei einem Zusammenstoß ein Zug mit wesentlich höherer Fahrgeschwindigkeit den Transportbehälter ungünstig trifft. In einem solchen Fall würde der Energieeintrag in das Abfallgebinde unter Umständen größer sein als es einem Aufprall auf eine unnachgiebige Fläche mit 35 km/h entspricht. Auch im Bereich der obersten Geschwindigkeitskategorie (unterstellter Aufprall mit 110 km/h) sind solche Überschreitungen nicht auszuschließen. Im Rahmen der Risikoermittlung, bei der ein großes Spektrum von Unfallkonstellationen betrachtet wird, ist die Vorgehensweise jedoch angemessen vorsichtig, da derartige Einzelereignisse durch nachfolgend aufgeführte, im hohen Maße abdeckende Annahmen kompensiert werden:

- Die Wahl der Intervallobergrenze der beiden unteren Geschwindigkeitsklassen und nicht z. B. des Mittelwertes führt bei den Ereignissen zu einer teilweise erheblichen Überschätzung der Unfallgeschwindigkeit.
- Eine Verringerung der Geschwindigkeit des Transportgutes vor dem Aufprall, z. B. beim Rutschen eines Wagens nach Entgleisung, wird nicht berücksichtigt.
- Die unterstellte harte, unnachgiebige Aufprallfläche ist in realen Unfallsituationen nur in Ausnahmefällen annähernd gegeben, z. B. massive Brückenpfeiler, wohingegen im Allgemeinen nachgiebige bzw. zerstörbare Flächen, wie Böschungen und Gebäude, vorhanden sind.
- Die Dämpfung der mechanischen Einwirkung durch den Güterwagen und seine Aufbauten (z. B. umhüllender Container) wird vernachlässigt.

Die thermische Belastung der Abfallgebinde wird durch den Brandzeit-Temperaturverlauf charakterisiert, wobei unterstellt wird, dass das Abfallgebinde dem Schadensfeuer bei einer Temperatur von 800 °C für 30 min (BK 2, BK 5 und BK 8) bzw. 60 min (BK 3, BK 6 und BK 9) allseitig ausgesetzt wird.

Feuer, die einer solchen Konfiguration entsprechen, sind gerade bei großen Transportbehältern, wie sie für den Abfalltransport verwandt werden, selbst in gezielten Experimenten nur mit speziellem Aufwand erreichbar. Insofern deckt schon eine so spezifizierte Brandbelastung von 30 Minuten Dauer einen hohen Prozentsatz real auftretender Brandbelastungen ab und die 60-minütige Brandbeaufschlagung erfasst auch weitgehend extreme Brandsituationen. Ein 30-minütiger Brand bei 800 °C entspricht dem Referenzbrand, den die Prüfvorschriften der internationalen Transportvorschriften /IAEA 05/ im Rahmen der Qualifikation von unfallsicheren Typ B-Transportbehältern fordern.

Länger andauernde Brände bzw. Brände mit höheren Temperaturen werden durch diese Klassifizierung abgedeckt. So ergeben sich z. B. für den 60-minütigen Brand bei 800 °C, dem das Abfallgebinde allseitig unterworfen ist, höhere Temperaturen des Transportgutes als z. B. bei einem mehrstündigen Brand in geringer Entfernung vom Abfallgebinde, wie es z. B. der Fall ist, wenn beim Unfall benachbarte Güterwagen oder Fahrzeuge mit großer Brandlast (Heizöl, Kohle etc.) abbrennen.

Höhere Flammentemperaturen werden bei Bränden im Freien wegen der ungehinder- ten Wärmeabstrahlung nur bei sehr großen Bränden und dann auch nur in Teilberei-

chen des Feuers erreicht. Durch abdeckende Annahmen bei der Wärmeübertragungsrechnung werden rechnerisch insgesamt höhere Abfallprodukttemperaturen (und damit Freisetzungen) berechnet als sie sich bei realen Experimenten ergeben. Als konservative Annahmen bei den Aufheizrechnungen, die den Quelltermermittlungen zugrunde liegen, sind insbesondere zu nennen:

- Wahl konservativer Wärmeübertragungsparameter wie Einstrahlzahlen, Emissionskoeffizienten und Wärmeübergangskoeffizienten,
- Vernachlässigung abschirmender Strukturen,
- Vernachlässigung von Gegenmaßnahmen (Brandbekämpfung und damit verbundene Kühlung).

Die genannten Annahmen in Kombination mit den angenommenen Brandzeit-Temperaturverläufen stellen sicher, dass die mögliche Aufheizung des Abfallgebindes bei Brandereignissen abdeckend ermittelt wird.

Insgesamt ist die angegebene Belastungsklasseneinteilung in Verbindung mit den angegebenen Randbedingungen (z. B. harte, unnachgiebige Aufprallfläche, Brandzeit-Temperaturverlauf bei vollständiger Feuereinschließung) als eine dem Untersuchungszweck angemessene Vorgehensweise anzusehen, die das Spektrum möglicher Unfallbelastungen beim Transport weitestgehend abdeckt.

8.2.2 Freisetzungsanteile

Unfallbedingte Aktivitätsfreisetzungen hängen von Eigenschaften der Transportbehälter und der darin befindlichen Abfallprodukte ab. Daher wurde das Spektrum der anfallenden Abfallgebinde in sogenannte Abfallgebindergruppen unterteilt mit der Zielsetzung, Abfallgebinde mit gleicher Freisetzungscharakteristik in einer Gruppe zusammenzufassen. Im Folgenden werden 8 Abfallgebindergruppen unterschieden:

- | | |
|-------|--|
| AGG 1 | Brennbare unfixierte Abfälle in Stahlblechcontainern, |
| AGG 2 | Unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nichtmetallische Abfälle (einschließlich Verdampferkonzentrate) in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern, |
| AGG 3 | Metallische Abfälle in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern, |

- AGG 4 Kompaktierte Abfälle in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern,
- AGG 5 Zementfixierte Abfälle in Stahlblechcontainern,
- AGG 6 Brennbare, unfixierte Abfälle in Betonbehältern,
- AGG 7 Zementfixierte Abfälle in Betonbehältern und
- AGG 8 Abfälle in Gussbehältern.

Diese Definition entspricht weitgehend der bereits in der Transportstudie Konrad /GRS 91/ gewählten Gruppierung und wurde lediglich verallgemeinert, z. B. durch die Eingliederung von Betonbehältern in die Abfallgebindegruppen 2, 3 und 4. Die Bezeichnung Betonbehälter umfasst bei der Definition der Abfallgebindegruppen sowohl zylindrische Betonbehälter als auch Betoncontainer. Die Einteilung orientiert sich überwiegend an den Definitionen der Abfallproduktgruppen (siehe Kapitel 4) und kombiniert diese mit verschiedenen Behältertypen. Abfälle in Gussbehältern werden abweichend davon unabhängig von der Abfallproduktgruppe in AGG 8 zusammengefasst. Die übrigen Abfälle der APG 02 bis APG 04 werden den AGG 2 bis AGG 4 zugeordnet, während bei APG 01 und APG 05 eine zusätzliche Unterscheidung abhängig von der Verpackung in Stahlcontainer oder Betonbehälter vorgenommen wird (AGG 2 und AGG 6 bzw. AGG 5 und AGG 7). APG 06 wird konservativ wie APG 02 behandelt.

Die Zuordnung der erfassten Referenzabfälle zu Abfallgebindegruppen erfolgte nach obigem Schema, sofern die erforderlichen Informationen zur Verpackung und Fixierung vorliegen. Da für einen Großteil der Abfälle die abschließende Konditionierung noch aussteht, liegen die für die Einordnung in Abfallgebindegruppen notwendigen Parameter für einige Referenzabfälle noch nicht sicher vor. In diesen Fällen wird daher eine Zuordnung vorgenommen, die zu einer konservativen Abschätzung potenzieller Freisetzungen führt. Dabei werden auch Aktivitätsbegrenzungen der internationalen Transportvorschriften /IAEA 05/ und der Endlagerbedingungen Konrad /BFS 95/ berücksichtigt, um unzulässige Kombinationen aus Abfallprodukt, Aktivität und Verpackung auszuschließen.

Die für diese Abfallgebindegruppen ermittelten, von der Unfallbelastung abhängigen Freisetzungsanteile basieren auf experimentellen Untersuchungen und auf theoretischen Modellen. Gegenüber der Transportstudie Konrad /GRS 91/ sind neuere experimentelle Erkenntnisse aus mehrjährigen Versuchsprogrammen zur Freisetzung bei

mechanischen Einwirkungen eingeflossen /LAN 07/. Bei den Versuchsserien wurden pulverförmige und zementierte Abfallsimulate unterschiedlicher Größe und Verpackung einem weiten Spektrum von mechanischen Belastungen ausgesetzt und die generierten Freisetzungen partikelgrößenabhängig gemessen. Hierbei konnten die Einflüsse der physikalischen Form der Proben, ihrer Verpackung, Masse und spezifischen kinetischen Energie auf die partikelgrößenabhängige Freisetzung aerosolförmiger Stoffe quantifiziert und auf reale Abfallgebinde übertragen werden. Insgesamt zeigte sich, dass frühere Abschätzungen zu Freisetzungsanteilen bei mechanischen Einwirkungen, wie sie beispielsweise in der 1991er Transportstudie /GRS 91/ verwendet wurden, tatsächliche Freisetzungsanteile deutlich überschätzten.

Der erfasste Partikelgrößenbereich von Freisetzungen wurde auf einen aerodynamisch äquivalenten Durchmesser (AED¹) bis 100 µm erweitert, um den potenziellen Beitrag großer Partikel besser zu berücksichtigen. Im Fall unfallbedingter thermischer Einwirkungen (Brände) wurden gegenüber /GRS 91/ nur Anpassungen der Beiträge aus gleichzeitigen mechanischen Einwirkungen vorgenommen.

Die dieser Studie zugrundeliegenden Freisetzungsanteile sind in Übersichtsform in Tab. 8.2 und Tab. 8.3 dargestellt. Die Werte in Tab. 8.2 repräsentieren die luftgetragenen, in Form von Aerosolpartikeln freigesetzten Aktivitätsanteile für alle Radionuklide ausgenommen Tritium (H-3), radioaktiven Kohlenstoff (C-14) und Halogene (z. B. Iod), für die aufgrund ihrer höheren Flüchtigkeit andere Werte verwendet werden (Tab. 8.3).

¹ Der aerodynamisch äquivalente Partikeldurchmesser AED entspricht dem Durchmesser eines äquivalenten Schwebstoffteilchens mit der Einheitsdichte 1 g/cm³, das das gleiche Sedimentationsverhalten aufweist wie das reale Teilchen.

Tab. 8.2 Partikelgrößenabhängige Freisetzungsteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe.

Belastungs- klasse	AED	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	0 – 10 µm	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
	10 – 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 2	0 – 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	10 – 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 3	0 – 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	10 – 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 4	0 – 10 µm	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0
	10 – 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 5	0 – 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	10 – 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 6	0 – 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	10 – 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 7	0 – 10 µm	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
	10 – 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 8	0 – 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
	10 – 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 9	0 – 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	10 – 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	0

Tab. 8.3 Freisetzungsteile für H-3, C-14 und Halogene (AED 0 - 10 µm) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe, w. s. N. = wie sonstige Nuklide.

Belastungs- klasse	Radionuklid	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	H-3 C-14 Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	0	0	0
BK 2	H-3 C-14 Halogene	1	1	1	1	6,0·10 ⁻² 2,1·10 ⁻⁴ 5,0·10 ⁻¹	0	0	7,3·10 ⁻⁷ 1,6·10 ⁻⁴ 1,6·10 ⁻⁴
BK 3	H-3 C-14 Halogene	1	1	1	1	5,0·10 ⁻¹ 5,0·10 ⁻⁴ 1	0 1 1	0 1 1	4,0·10 ⁻³ 6,0·10 ⁻³ 4,0·10 ⁻²
BK 4	H-3 C-14 Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	0
BK 5	H-3 C-14 Halogene	1	1	1	1	5,0·10 ⁻¹ 1,1·10 ⁻³ 1	1	1 5,5·10 ⁻⁴ 1	7,3·10 ⁻⁷ 1,6·10 ⁻⁴ 1,6·10 ⁻⁴
BK 6	H-3 C-14 Halogene	1	1	1	1	5,0·10 ⁻¹ 1,1·10 ⁻³ 1	1	1	4,0·10 ⁻³ 6,0·10 ⁻³ 4,0·10 ⁻²
BK 7	H-3 C-14 Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.
BK 8	H-3 C-14 Halogene	1	1	1	1	5,0·10 ⁻¹ 2,8·10 ⁻³ 1	1	1	7,3·10 ⁻⁷ 2,2·10 ⁻⁴ 5,0·10 ⁻¹
BK 9	H-3 C-14 Halogene	1	1	1	1	5,0·10 ⁻¹ 2,8·10 ⁻³ 1	1	1	4,0·10 ⁻³ 1 1

Bei mechanischer Einwirkung auf Abfallgebinde können Aerosolpartikel luftgetragen freigesetzt werden, die einen größeren Bereich aerodynamisch äquivalenter Durchmesser überstreichen. Üblicherweise werden Partikel mit Durchmessern $< 10 \mu\text{m}$ AED als vollständig lungengängig, Partikel mit Durchmessern oberhalb von $10 \mu\text{m}$ AED als nicht lungengängig eingestuft, so dass sie nicht zu einer Inhalationsdosis beitragen, wohl aber zu einer Strahlenexposition über die übrigen Expositionspfade Bodenstrahlung und Nahrungsaufnahme (Ingestionspfad). Partikel oberhalb von $10 \mu\text{m}$ weisen höhere Ablagerungsgeschwindigkeiten auf, so dass sie insbesondere im Nahbereich des Unfallortes zu einer Kontamination von Bewuchs, Boden und anderen Oberflächen führen können.

Die Bestimmung des bei Transportunfällen freigesetzten Aktivitätsanteils erfolgt für die oben definierten 8 Abfallgebindegruppen und 9 Belastungsklassen für Partikel der Größenintervalle: $0 - 10 \mu\text{m}$, $10 - 20 \mu\text{m}$, $20 - 50 \mu\text{m}$ und $50 - 100 \mu\text{m}$. Zur besseren Übersicht sind in Tab. 8.2 die Freisetzungsteile für Partikel kleiner $10 \mu\text{m}$ und zusammengefasst für den Partikelgrößenbereich $10 - 100 \mu\text{m}$ aufgeführt. Die Werte geben den luftgetragenen, in Form von Aerosolpartikeln freigesetzten Aktivitätsanteil an.

Man kann Tab. 8.2 u. a. folgende Informationen entnehmen:

- Bei den rein mechanischen Belastungsklassen 1, 4, und 7 verzeichnet man einen deutlichen Anstieg des freigesetzten Anteils des Aktivitätsinventars um ca. zwei Zehnerpotenzen mit zunehmender Geschwindigkeit.
- Die Auslegungen von Beton- und Gussbehältern führen dazu, dass es in einigen der unteren Belastungsklassen zu keiner Freisetzung des radioaktiven Inhalts kommt.
- Bei kleinen mechanischen Belastungen lässt sich durch Vergleich der rein mechanischen Belastungsklasse 1 mit den kombiniert mechanisch-thermischen Belastungsklassen 2 und 3 erkennen, dass die Freisetzung durch den thermischen Energieeintrag dominiert. Bei den Belastungsklassen mit Aufprallgeschwindigkeiten $> 35 \text{ km/h}$ und zusätzlichem Brand betragen die Freisetzungsteile bis zu 10 % des Aktivitätsinhaltes der Abfallbehälter.
- Bei der Abfallgebindegruppe 1, in der unfixierte brennbare Abfälle in Stahlblechcontainern vorliegen können, ist die durch Brand verursachte Freisetzung wesentlich höher als z. B. bei Fixierung in Zement/Beton (AGG 5).

Bei thermischen Lasteinwirkungen werden für die Radionuklide H-3 (Tritium), C-14 (Kohlenstoff) und die Gruppe der Halogene (z. B. Iod) deutlich höhere Freisetzungsan-

teile angenommen, da diese im Brandfall in eine flüchtige Form übergehen können. Aus Tab. 8.3 ist zu entnehmen, dass für die Belastungsklassen mit Brandeinwirkung (BK 2, 3, 5, 6, 8, und 9) meistens eine vollständige Freisetzung aus dem Abfallbehälter unterstellt wird (Freisetzunganteil = 1).

Es ist zu beachten, dass in Tab. 8.3 nur jeweils der Freisetzunganteil für 0 - 10 µm aufgeführt ist, jedoch bei mechanischer Einwirkung auch Freisetzungen im Partikelgrößenbereich > 10 µm auftreten können, die den Freisetzungen für sonstige Radionuklide gemäß Tab. 8.2 entsprechen. Die Freisetzunganteile durch thermische Einwirkungen für sonstige Radionuklide (Tab. 8.2) orientiert sich konservativ an der Freisetzbarkeit relativ leicht flüchtiger chemischer Verbindungen von Cäsium, wodurch jedoch beispielsweise die Freisetzung von Aktivierungsprodukten wie Co-60 aber auch von Transuranen wie Plutonium und Americium deutlich überschätzt wird.

8.3 Unfallhäufigkeiten und Unfallschwere

Zur Ermittlung der Unfallhäufigkeiten wurden umfangreiche Analysen von Unfalldaten und -statistiken zum Güterzugverkehr einschließlich Rangierbetrieb sowie zum Schwerlastverkehr auf der Straße durchgeführt.

Beim Straßen- und Schienentransport umfassen die Unfallstatistiken sowohl Angaben, mit welcher Häufigkeit pro gefahrenem Fahrzeugkilometer bzw. Güterzugkilometer mit einem Unfall (ohne Bagatellschäden) zu rechnen ist, als auch wie sich Unfallereignisse anteilmäßig auf unterschiedlich schwere Unfalleinwirkungen (Belastungsklassen) aufteilen. Darüber hinaus wird bei Güterzugunfällen noch unterschieden, mit welcher Häufigkeit bei Unfällen wie viele Güterwagen betroffen sind. Erst diese Zusatzinformation lässt eine sinnvolle Anwendung der Unfallstatistik auf ein zu betrachtendes Transportaufkommen zu, da die Unfallhäufigkeit pro Güterzug-km allein noch nichts über die Unfallwahrscheinlichkeit von Güterwagen aussagt. Die Unfallstatistik beim Rangierbetrieb bezieht sich auf die Anzahl der Unfälle pro 1 Million rangierte Güterwagen, die relative Häufigkeit unterschiedlich hoher Unfallbelastungen (Belastungsklassen) und ebenfalls auf die Angabe zur Anzahlverteilung der vom Unfall betroffenen Wagen.

Im Folgenden wird eine zusammenfassende Übersicht zur statistischen Unfalldatenbasis gegeben, die der Analyse des Transportunfall-Risikos bei den Abfalltransporten zum Endlager zugrunde liegt. Die Darstellung erfolgt getrennt für Transportunfälle im Güterzugverkehr, im Rangierbetrieb und beim LKW-Transport.

8.3.1 Unfallabläufe und Unfallhäufigkeiten in Güterzugverkehr

Die Untersuchungen zur Ermittlung von Unfallhäufigkeiten im Schienenverkehr erfolgten zeitlich in verschiedenen Phasen. In einer ersten Auswertung wurde das Unfallgeschehen in einem zehnjährigen Zeitraum von 1979 bis 1988 auf dem Schienennetz der damaligen Deutschen Bundesbahn (DB) betrachtet. Die Unfalldatenauswertung wurde danach noch zweimal aktualisiert. Dabei wurden die Zeiträume 1989 bis 1995 sowie 1996 bis 2001 erfasst. Insgesamt stehen somit empirische Unfalldaten über einen Zeitraum von 23 Jahren zur Verfügung. Der ausgewertete Datenbestand bezieht sich auf Unfallereignisse auf dem Streckennetz der DB bzw. DB AG – einschließlich gemieteter und gepachteter Strecken – sowie auf Strecken, auf denen die DB bzw. DB AG aufgrund vertraglicher Vereinbarungen den Betrieb führt. Ab 1992 umfasst er auch die Un-

fälle auf dem Schienennetz der Deutschen Reichsbahn (DR) in den neuen Bundesländern bzw. der Deutschen Bahn AG (DB AG).

Für die Ableitung statistisch abgesicherter Daten zu Unfallhäufigkeiten würde eine Beschränkung auf das Beförderungsaufkommen radioaktiver Stoffe oder nur radioaktiver Abfälle auf der Schiene nicht ausreichen, weil diese Beförderungsaufkommen zu geringfügig sind. Daher wurde im Rahmen der ersten durchgeführten Auswertung geprüft, wie die statistische Basis sinnvoll erweitert werden kann. Zunächst wurde untersucht, ob der Bereich der Gefahrguttransporte mit der Eisenbahn eine geeignete Datenbasis darstellt. Die Auswertung entsprechender Berichte der vormaligen Deutschen Bundesbahn (DB) über Unfälle und Zwischenfälle im Zusammenhang mit der Beförderung gefährlicher Güter mit Angaben über die Art des betroffenen Gutes, den Schadenumfang und die Ursache für das Ereignis zeigte, dass ein Großteil der Vorkommnisse im Gefahrguttransport für das hier zu betrachtende Transportgut nicht repräsentativ ist. Zum Beispiel sind viele Vorkommnisse durch das undicht werden von Verschlüssen und den dadurch bedingten Austritt von flüssigem Gefahrgut verursacht, was beim Transport radioaktiver Abfälle durch die Art der Verpackung und die Konsistenz des Abfalls ausgeschlossen ist. Außerdem war der verfügbare statistische Datenumfang dieser Art von Transporten immer noch zu gering für eine solide Unfalldatenbasis. Die Untersuchung wurde deshalb auf Unfälle im gesamten Güterzugverkehr ausgedehnt, der Gefahrguttransporte als Untermenge mit einschließt.

Die Deutsche Bahn AG (vorm. Deutsche Bundesbahn sowie Deutsche Reichsbahn) DB AG betreibt eine systematische Erfassung gefährlicher Ereignisse im Bahnbetrieb auf ihrem gesamten Streckennetz. Die Erfassung der Unfälle ist durch entsprechende Erfassungsregeln vereinheitlicht, die im Laufe der Zeit verschiedene Änderungen erfahren haben. Aktuell erfolgt die Erfassung nach der Anweisung A 21 00 00 "Gefährliche Ereignisse im Eisenbahnbetrieb melden, untersuchen und berichten" des Eisenbahn-Bundesamtes, die im Rahmen der Konzernrichtlinie 423.0180 "Notfallmanagement, Brandschutz: Gefährliche Ereignisse untersuchen und berichten" umgesetzt wird.

Meldeblätter und Anleitungen zu deren Ausfüllung stehen den unfallbearbeitenden Dienststellen zur Verfügung. Die auf diese Weise erfassten Daten werden von der DB für die weitere statistische Auswertung nach unterschiedlichen Gesichtspunkten zusammengestellt und protokolliert. Je nach Bedeutung des Unfallereignisses werden

auch umfangreichere Unfallakten mit differenzierteren Angaben über das Ereignis angelegt und aufbewahrt.

Die für die Zwecke dieser Untersuchung von der Deutschen Bahn AG bzw. der vorm. Deutschen Bundesbahn zur Verfügung gestellte Datenbasis enthält unter anderem für jeden Unfall das Datum, weitere Angaben zur eindeutigen Identifizierung des Unfallereignisses, Schlüsselzahlen für die Ereignisart und die Zuggattung, die Geschwindigkeit der Züge vor dem Unfall (außer bei Brand) und den geschätzten monetären Sachschaden an Schienenfahrzeugen (ohne die Ladung).

Folgende übergeordnete Ereignisarten sind für die durchgeführten Auswertungen von Interesse, wobei die Schlüsselzahlen noch eine detailliertere Unterteilung beinhalten (Definitionen z. T. verkürzt wiedergegeben):

- Entgleisung: Abgleiten oder Abheben eines Eisenbahnfahrzeugs von der Fahrbahn,
- Zusammenstoß: Auffahren auf ein anderes Eisenbahnfahrzeug,
- Aufprall: Fahren gegen ein Hindernis im Regellichtraum, nicht aber gegen ein anderes Eisenbahnfahrzeug,
- Zusammenprall: Zusammentreffen von einem Eisenbahnfahrzeug und einem Verkehrsteilnehmer an einem Bahnübergang,
- Brand / Explosion in einem oder durch ein bewegtes Eisenbahnfahrzeug² bzw. außerhalb von Eisenbahnfahrzeugen³.

Ein Unfall wird bei der Erfassung nach der Art des auslösenden Ereignisses klassifiziert. Die ausgewiesenen Unfälle mit Brand- und Explosion stellen folglich Primärereignisse dar. Brand und Explosion als Folge einer vorangehenden mechanischen Unfallwirkung sind alleine anhand der Klassifizierung der Ereignisarten nicht identifizierbar. Hierzu bedarf es ergänzender Informationen über den Unfallablauf in jedem Einzelfall. Die DB hat daher im Juni 1989 speziell für die Zwecke der 1991er Transportstudie /GRS 91/ eine Umfrage bei allen Unfallbereichsbahnhöfen durchgeführt, bei denen Güterzugunfälle mit Sachschäden oberhalb der Relevanzgrenze von

² Klassifizierung: Gefährliches Ereignis, Unregelmäßigkeit an Eisenbahnfahrzeugen

³ Klassifizierung: Gefährliches Ereignis, Sonstiges gefährliches Ereignis

3000 DM an Schienenfahrzeugen im Zeitraum 1983 bis 1987 bearbeitet wurden. Aufgrund dieser zusätzlichen Datenerhebung konnten zu 196 von insgesamt 292 Unfallereignissen in dem genannten Zeitraum von 5 Jahren erweiterte Angaben zur Verfügung gestellt werden, aus denen der Anteil der Brandereignisse, die nicht als Primärereignisse im Datenbestand erfasst sind, ermittelt wurde.

Zur Differenzierung nach der Schwere der unfallbedingten Lasteinwirkungen wurden die Unfälle in die in Abschnitt 8.2.1 definierten Belastungsklassen eingeordnet. Die Zuordnung zu den drei Geschwindigkeitsbereichen (0 - 35 km/h, 36 - 80 km/h, > 80 km/h) erfolgte anhand der unmittelbar vor dem Unfalleintritt aufgezeichneten Fahrgeschwindigkeit eines Zuges.

Um Bagatellereignisse, bei denen eine Beeinträchtigung der Ladung von vornherein ausgeschlossen werden kann, aus der Betrachtung auszunehmen, wurden bei der Auswertung nur solche Ereignisse als relevant berücksichtigt, bei denen der Sachschaden an Schienenfahrzeugen insgesamt den Betrag von 1500 € (früher 3000 DM) überschritten hat. Seit 1997 steht der Sachschaden auch aufgeschlüsselt nach einzelnen Schienenfahrzeugen zur Verfügung, so dass diese Information dazu benutzt werden kann, die Anzahl der relevant beschädigten Wagen zu bestimmen. Dabei wurde für den Schaden am einzelnen Fahrzeug die gleiche Relevanzgrenze angewendet, wie für die Bewertung des gesamten Unfallereignisses. Es ist davon auszugehen, dass bei Anwendung einer Relevanzgrenze in dieser Höhe konservativ noch viele Unfallereignisse erfasst werden, bei denen die Integrität der Abfallbehälter tatsächlich nicht in Frage gestellt ist.

Ohne umfangreiche Analysen im Einzelfall ist es schwierig, die erfassten Güterzugunfälle mit Brand den in Abschnitt 8.2.1 definierten beiden Klassen von Brandbelastungen zuzuordnen. In der Unfallstatistik sind Brandereignisse enthalten, bei denen die Brandentstehung durch ein offenes, leicht entflammbares Transportgut erst ermöglicht oder begünstigt wurde, z. B. Entzündung durch Funkenflug, oder bei denen Selbstentzündung vorlag. Derartige Bedingungen sind bei den Transportbehältern für radioaktive Abfälle nicht gegeben. Dennoch werden auch diese in der Unfallstatistik enthaltenen Brandereignisse ausnahmslos berücksichtigt und für die Zwecke der Unfallrisikoanalyse als Brandbelastung eingestuft, die entweder einem Brandzeit-Temperaturverlauf von 30 Minuten oder 60 Minuten bei 800 °C und allseitiger Brandeinhüllung der Abfallbehälter äquivalent ist. Es ist anzunehmen, dass die realen Gegebenheiten durch die resultierende Einstufung von zwei Drittel der Brandereignisse als äquivalent zum

30 Minuten Referenzbrand und einem Drittel als äquivalent zum 60 Minuten Referenzbrand mit der gleichzeitigen Annahme, dass betroffene Abfallbehälter vom Brand vollständig eingeschlossen werden, erheblich überschätzt werden.

Eine Übersicht über die Unfallhäufigkeit im Güterzugverkehr in Abhängigkeit von der Unfallart für den Zeitraum von 1979 - 2001 vermittelt Abb. 8.1. Dem Diagramm kann entnommen werden, wie sich für die Jahre 1979 bis 2001 die Unfallrate bei Güterzügen entwickelt hat und wie sie sich auf die verschiedenen Unfallarten aufteilt. Eine Tendenz eines Anstiegs oder einer Abnahme der Gesamtunfallrate lässt sich nicht entnehmen, so dass der im Diagramm eingetragene Mittelwert über den Gesamtzeitraum von 0,36 Güterzugunfällen pro eine Million gefahrene Kilometer als Rechengröße für die Risikoabschätzung zu verwenden ist.

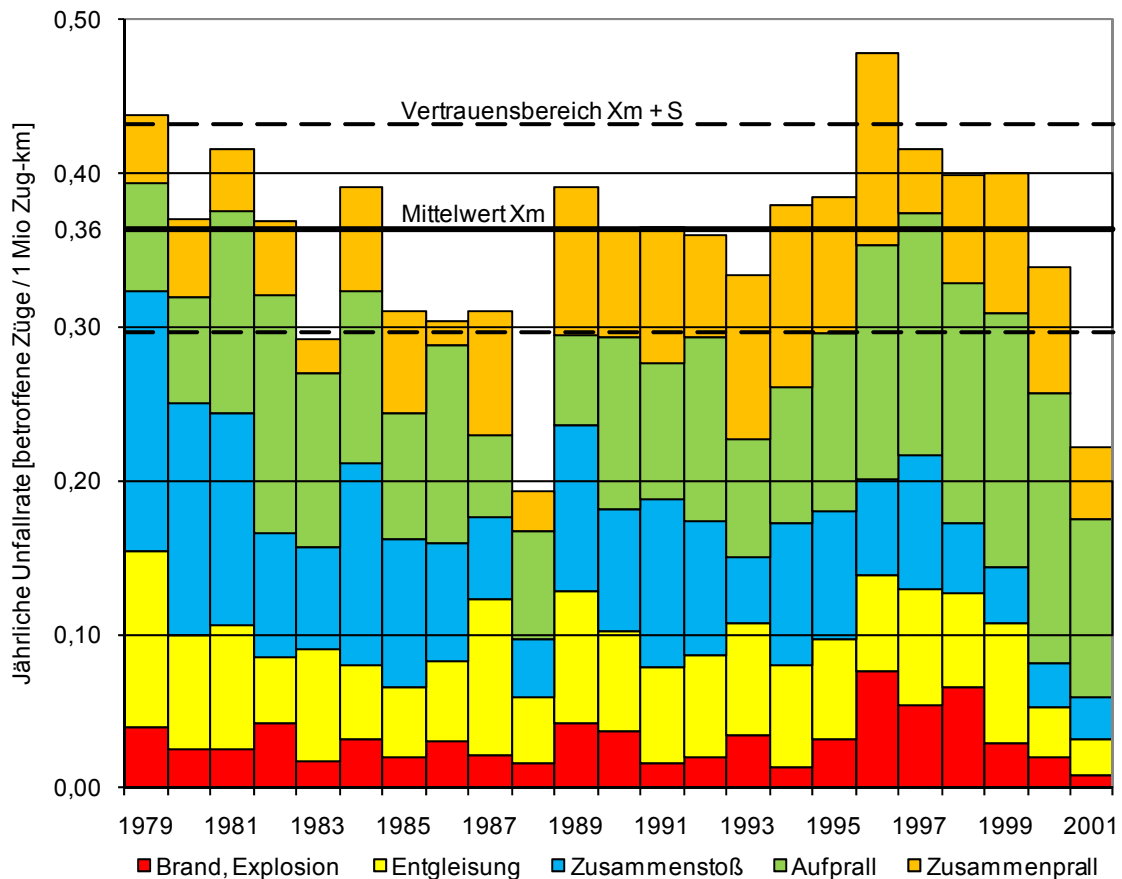


Abb. 8.1 Unfallrate von Güterzügen mit Sachschäden über 1500 € mit den Anteilen der Unfallarten

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in den älteren Datenbeständen Unfälle der früheren Zuggattung "Übergabezüge" nicht enthalten waren, die gemäß der damaligen Netzstruktur im Wagenladungsverkehr zwischen Knotenpunktbahnhöfen und Satellitenbahnhöfen bzw. Güterverkehrsstellen eingesetzt waren. Dem wurde bei früheren Auswertungen durch eine geschätzte Erhöhung der Gesamtunfallrate um ca. 50 % auf 0,5 Güterzugunfälle pro eine Million Zugkilometer Rechnung getragen. Infolge einer Neustrukturierung der Transportkette, die durch eine starke Reduzierung des Einzelwagenverkehrs und Konzentration der Zugbildung auf große Rangierbahnhöfe gekennzeichnet ist, wird die Zuggattungsbezeichnung "Übergabezüge" seit 1997 nicht mehr verwendet. Dieser Teil der Transportkette wird seitdem im Wesentlichen durch die "Bedienungsfahrten im Cargo-Verkehr (CB)⁴" repräsentiert, die jetzt in der Unfallstatistik enthalten sind. Durch diese Änderung der Erfassungs- und Auswertungsbedingungen könnte eine möglicherweise real abnehmende Tendenz der Unfallrate kompensiert sein.

Eine ggf. abnehmende Tendenz der Unfallrate wird auch durch die Anwendung einer konstanten monetären Relevanzgrenze unterdrückt, weil aufgrund der zwischenzeitlichen Teuerung zunehmend Unfälle im Bagatellbereich erfasst werden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die ermittelten besonders niedrigen Unfallraten für die Jahre 1988 und 2001 auf Verzögerungen beim Einpflegen der Unfalldaten in den Datenbestand beruhen, da es sich hier jeweils um die letzten Jahrgänge einer Auswertungsperiode handelt. Hieraus kann nicht auf eine dauerhafte Tendenz geschlossen werden.

Der Anteil der Unfallart Brand und Explosion in Abb. 8.1 beträgt im Mittel 11,7 % aller erfassten Unfälle und bezieht sich auf die registrierten Primärereignisse ohne vorangehende mechanische Einwirkung. Brände als Folge einer vorangehenden mechanischen Einwirkung sind demgegenüber viel seltener. Aussagen können hier nur anhand der erweiterten Untersuchung aus den Jahren 1983 bis 1987 getroffen werden, weil der allgemeine statistische Datenbestand eine Identifizierung solcher Unfälle nicht ermöglicht, wie bereits zuvor erläutert wurde. Bei den von der erweiterten Untersuchung erfassten 196 Ereignissen wurde eine kombinierte mechanisch/thermische Einwirkung nur bei drei Güterzügen (zwei Unfälle, bei denen in einem Fall zwei Züge vom Brand

⁴ Ab Dez. 2005 neue Gattungsbezeichnungen bei Railion DB Logistics: "Zubringerfahrten (FZ, FZT, FZS)"

betroffen waren) festgestellt. Um sicherzustellen, dass diese seltenen, potenziell aber folgenschweren Ereignisse bei der Risikoanalyse konservativ berücksichtigt sind, wird der beobachtete Wert als besonders niedrig im Rahmen der zu erwartenden statistischen Schwankungen interpretiert. Für die Zwecke der Unfallrisikoanalyse wurde stattdessen der statistische Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung verwendet, bei der die beobachtete Unfallanzahl die untere Grenze des 95 %-Vertrauensbereiches darstellt. Im Ergebnis läuft das auf etwa eine Verdopplung der Unfallhäufigkeit von Güterzügen mit einem Brand als Folge vorangehender mechanischer Einwirkung gegenüber der tatsächlich beobachteten Häufigkeit hinaus.

Wie sich aus diesen Unfalldaten und den angeführten weiteren Annahmen Güterzugunfälle anteilmäßig auf die in Abschnitt 8.2.1 eingeführten Belastungsklassen 1 bis 9 aufteilen, kann ebenfalls aus Tab. 8.4 entnommen werden. Um die erkennbare Tendenz einer Verschiebung des Unfallgeschehens zu höheren Unfallgeschwindigkeiten angemessen zu berücksichtigen, wurden zur Ermittlung dieser Verteilung nur die aktuellsten verfügbaren Daten aus dem Zeitraum 1995 bis 2001 herangezogen, welche insgesamt 576 Güterzugunfälle mit Schäden an Schienenfahrzeugen über 1500 € umfassen. Die angegebenen relativen Häufigkeiten der Belastungsklassen addieren sich zu 1, was wegen der Rundung der Dezimalstellen anhand der Tab. 8.4 nur näherungsweise nachvollzogen werden kann. Danach wird in ca. 85 % aller Güterzugunfälle mit rein mechanischen Unfalleinwirkungen (Belastungsklassen 1, 4 und 7) gerechnet. Die restlichen ca. 15 % teilen sich auf die sechs Belastungsklassen mit kombiniert mechanischer und thermischer Einwirkung auf. Brände ohne mechanische Unfalleinwirkungen wurden konservativ dem Geschwindigkeitsbereich bis 35 km/h zugeordnet. Bei der Zuordnung des Gesamtanteils der Unfälle mit kombinierter mechanischer und thermischer Einwirkung zu den Geschwindigkeitsklassen wurde die gleiche Aufteilung unterstellt, wie sie aus den Unfällen mit ausschließlich mechanischer Einwirkung ermittelt wurde. Es ist erkennbar, dass konservativ ein Drittel der Brandereignisse der ungünstigeren Klasse thermischer Einwirkungen zugeordnet wurde, die einem Brandzeit-Temperaturverlauf von 60 Minuten bei 800 °C äquivalent ist.

Tab. 8.4 Relative Häufigkeit der neun Belastungsklassen bei Güterzugunfällen

Aufprall- geschwindigkeit	Relative Häufigkeit		
	ohne thermische Einwirkung	bei 30 Minuten thermischer Ein- wirkung, 800 °C	bei 60 Minuten thermischer Ein- wirkung, 800 °C
0 bis 35 km/h	0,221 (BK 1)	$8,25 \cdot 10^{-2}$ (BK 2)	$4,13 \cdot 10^{-2}$ (BK 3)
36 bis 80 km/h	0,387 (BK 4)	$8,45 \cdot 10^{-3}$ (BK 5)	$4,23 \cdot 10^{-3}$ (BK 6)
über 80 km/h	0,247 (BK 7)	$5,39 \cdot 10^{-3}$ (BK 8)	$2,69 \cdot 10^{-3}$ (BK 9)

Die Kenntnis der Häufigkeiten von Zugunfällen und der relativen Aufteilung auf Belastungsklassen liefert allein noch keine hinreichende Grundlage, um quantitative Aussagen über das Risiko aus Transportunfällen für ein betrachtetes Transportaufkommen machen zu können. Bei vielen Eisenbahnunfällen kommt es, auch wenn die hier zugrunde gelegte Relevanzgrenze für den Schadenumfang überschritten wird, nur zu Schäden am Triebfahrzeug. Besonders beim Zusammenprall an Bahnübergängen hält das bei Güterzügen an der Zugspitze fahrende Triebfahrzeug durch seine große Masse oft Unfallauswirkungen von den Wagen fern. Aber auch Unfallursachen wie Brand durch Fehler am elektrischen Antrieb sind ausschließlich auf Triebfahrzeuge beschränkt. Auch bei schwereren Güterzugunfällen bleiben Einwirkungen, die zu relevanten Schäden an der Ladung führen können, meist auf wenige Wagen beschränkt. Zur Bestimmung der Anzahl betroffener Wagen wurde der Datenbestand der Jahre 1997 bis 2001 herangezogen, bei dem die Zuordnung des Sachschadens zu einzelnen Schienenfahrzeugen dokumentiert ist. Insgesamt wurden hierzu 443 Unfälle ausgewertet. Bei 346 von diesen Unfällen war auch eine Zuordnung der Unfallgeschwindigkeit möglich. Die Relevanzgrenze von 1500 € wurde hierfür pro Fahrzeug angewendet. Dabei wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit früheren Auswertungen die Inkonsistenz in Kauf genommen, dass in einzelnen Fällen, in denen sich ein insgesamt knapp über der Relevanzgrenze liegender Schaden auf mehrere Fahrzeuge verteilt, zwar ein ganzer Zug, aber kein einzelner Wagen als relevant betroffen gilt.

In zwei Diagrammen ist dargestellt, wie sich die Anzahl betroffener Wagen in Abhängigkeit von der Unfallart (Abb. 8.2) bzw. von der Geschwindigkeit bei Unfalleintritt

(Abb. 8.3) verhält. Die Säulenhöhen geben den relativen Anteil der Unfälle an, bei denen die auf der horizontalen Achse angegebene Anzahl von Wagen betroffen war. Bei Ereignissen mit "0" betroffenen Wagen beschränkte sich relevanter Sachschaden auf das Triebfahrzeug (Tfz). Die absolute Zahl der Unfälle ist jeweils an den Säulen der Diagramme angegeben. Es ist zu beachten, dass die Säule für "0" betroffene Wagen in den Diagrammen im Interesse einer besseren Auflösung bei den übrigen Kategorien stark verkürzt dargestellt ist.

Aus Abb. 8.2 ist zu entnehmen, dass bei genau einem Unfallereignis die maximale Anzahl von 15 betroffenen Wagen festgestellt wurde; dabei handelt es sich um eine Entgleisung; für diese Unfallart ist eine eher große Zahl betroffener Wagen charakteristisch. Nur 3 % der betrachteten Unfälle führen jedoch zu mehr als 5 betroffenen Wagen. Bei ca. zwei Dritteln aller Unfälle entsteht an keinem der Wagen relevanter Schaden, so dass eine schädliche Lasteinwirkung auf Transportgut unwahrscheinlich wäre. Besonders bei den Unfallarten Aufprall, Zusammenprall sowie Brand/Explosion (als Primärereignis) kommt häufig kein Wagen in relevantem Umfang zu Schaden. Bei Aufprall und Zusammenprall liegt dies daran, dass das bei Güterzügen stets vorausfahrende Triebfahrzeug aufgrund seiner großen Masse Belastungen von den nachfolgenden Wagen fernhält.

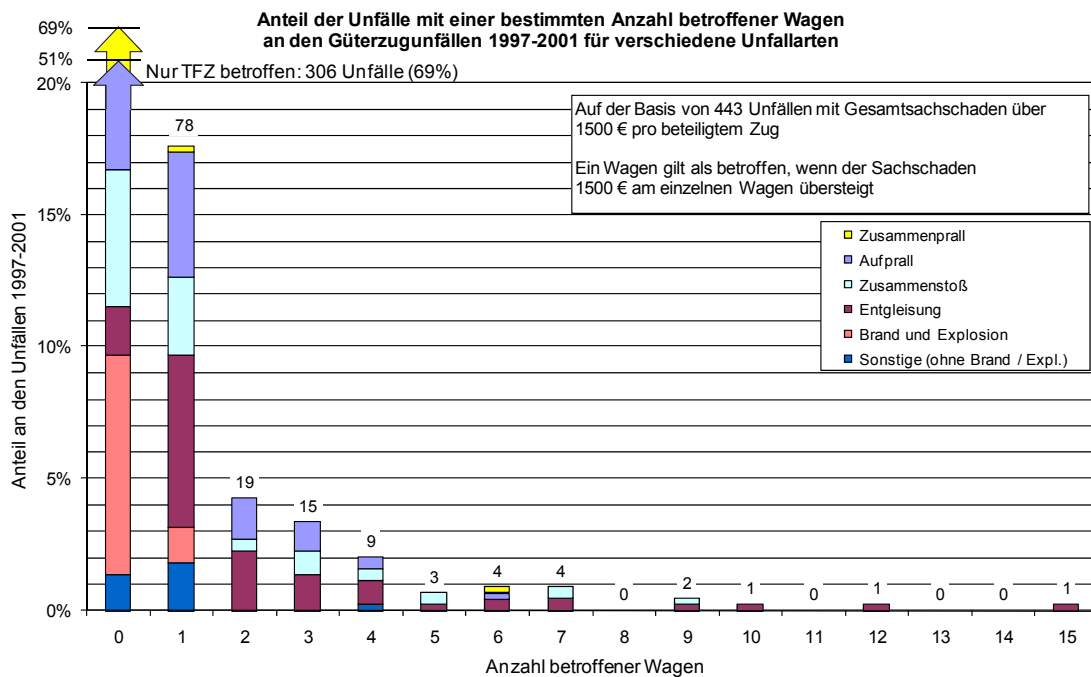


Abb. 8.2 Anzahl betroffener Wagen bei relevanten Güterzugunfällen: Abhängigkeit von der Unfallart (Daten 1997 - 2001)

Bei primären Brandereignissen liegt die Ursache häufig in einem technischen Schaden des Triebfahrzeugs selbst begründet, z. B. durch Fehler in der elektrischen Antriebsanlage bzw. in der Kraftstoffversorgung. Auch bei primären Brandereignissen, die an Wagen entstehen, ist ein Übergreifen auf benachbarte Wagen in keinem Fall dokumentiert.

Die Abhängigkeit der Zahl betroffener Wagen von der Fahrgeschwindigkeit bei Unfallereignis ist aus dem Diagramm in Abb. 8.3 ersichtlich, wobei nach den Geschwindigkeitsklassen der Tab. 8.4 unterschieden wird. Die Darstellung bezieht sich auf eine gegenüber Abb. 8.2 reduzierte Anzahl von 346 Unfällen, weil die Unfallart Brand/Explosion als Primäreignis, bei der die Fahrgeschwindigkeit keine Rolle spielt sowie Unfälle mit unbekannter Fahrgeschwindigkeit nicht enthalten sind. Daher ergeben sich gegenüber der Darstellung in Abb. 8.2 auch leicht abweichende Anteile für die einzelnen Kategorien der Anzahl betroffener Wagen. Insbesondere fehlen die beiden Ereignisse mit der höchsten Zahl betroffener Wagen (12 bzw. 15 Wagen), für die die Unfallgeschwindigkeit nicht bekannt ist.

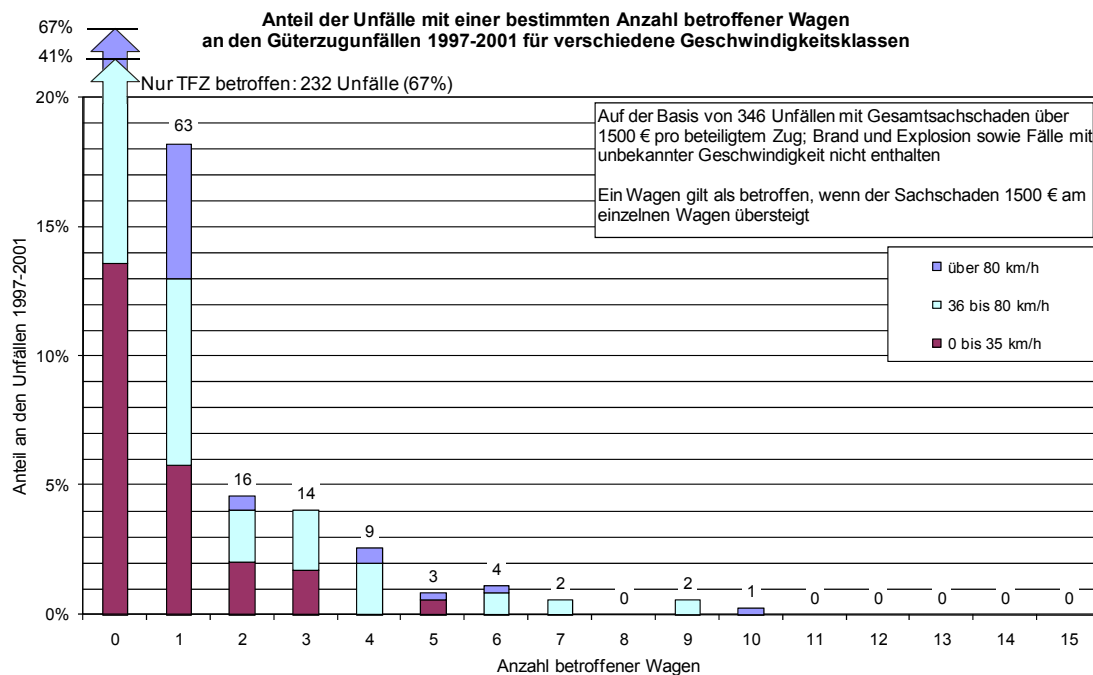


Abb. 8.3 Anzahl betroffener Wagen bei relevanten Güterzugunfällen: Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei Unfalleintritt (Daten 1997 - 2001)

Als Ergebnis lässt sich dennoch feststellen, dass generell keine Korrelation zwischen hoher Fahrgeschwindigkeit und einer großen Anzahl betroffener Wagen besteht. Dies ist konsistent mit der Erkenntnis, dass Unfallarten mit potenziell vielen betroffenen Wagen (Entgleisung, Zusammenstoß) eher im unteren und mittleren Geschwindigkeitsbereich auftreten.

Zur Verwendung bei der Transportrisikoanalyse wurden die in Abb. 8.3 dargestellten empirischen Verteilungen betroffener Wagen über die Geschwindigkeit durch mathematische Verteilungsfunktionen angepasst, die die empirischen Verteilungen gut beschreiben. Dabei wurden die Ereignisse, bei denen kein Wagen (nur Triebfahrzeug) betroffen war, nicht in die Anpassung einbezogen. Aus den ermittelten Verteilungen wurden Schätzwerte der Häufigkeit des Eintretens eines Unfalls mit jeweils einem bis neun, sowie für Unfälle mit mehr als neun Wagen bestimmt.

Für Brandereignisse ohne vorangegangene mechanische Einwirkung wurde im Auswertungszeitraum 1997 bis 2001 unter insgesamt 43 Ereignissen kein Ereignis mit mehr als einem betroffenen Wagen identifiziert. Aus der erweiterten Datenerfassung für den Zeitraum 1983 bis 1987 wurde ein Ereignis mit zwei betroffenen Wagen unter insgesamt 18 primären Brandereignissen ermittelt, für die die Zahl der betroffenen Wagen festgestellt werden konnte. Daher wurde für die Bestimmung der Anzahlverteilung betroffener Wagen konservativ die ältere Auswertung zugrunde gelegt.

Ereignisse, bei denen ein Unfall mit mechanischer Einwirkung einen Brand zur Folge hat, wurden so selten beobachtet (zwei Ereignisse mit drei vom Brand betroffenen Zugeinheiten), dass eine empirische Häufigkeitsverteilung für die Anzahl betroffener Wagen keine Aussagekraft besitzt. Bei dieser Ereignisart können als mögliche Szenarien zum Beispiel Zusammenstöße (zwischen Eisenbahnfahrzeugen) oder Entgleisungen unter Beteiligung von Kesselwagen mit leicht entzündlichen Stoffen angenommen werden. Dabei muss unterstellt werden, dass alle Wagen vom Brand betroffen werden, bei denen es aufgrund mechanischer Einwirkungen zur Freisetzung von feuergefährlichen Stoffen kommt oder die unverpackte, leichtentflammbare Ladung führen. Diese Unfallarten tendieren auch zu einer höheren Anzahl betroffener Wagen, wobei sich die Brandeinwirkung allerdings überwiegend auf die Wagen mit den genannten Eigenschaften beziehen wird. Hier wurde für die Zwecke der Risikoanalyse eine Gleichverteilung der Häufigkeit für Unfälle mit jeweils einem bis zehn betroffenen Wagen unterstellt. Insgesamt erschien hier die Annahme einer Gleichverteilung auf Fälle mit bis zu zehn betroffenen Wagen für jede Geschwindigkeitsklasse ausreichend konservativ.

Mit Hilfe der gewonnenen Anzahlverteilungen betroffener Wagen kann innerhalb der einzelnen Belastungsklassen gemäß Tab. 8.4 nach der Zahl betroffener Wagen differenziert werden, so dass man die in Tab. 8.5 dargestellte Wahrscheinlichkeitsmatrix erhält. Die Elemente der Matrix geben den prozentualen Anteil der Güterzugunfälle an, die mit Belastungen entsprechend der in der ersten Spalte genannten Belastungsklasse verbunden sind und bei denen die in der ersten Zeile genannte Anzahl von Wagen betroffen ist. Die Werte in der Spalte "0 betroffene Wagen" beziehen sich auf das Triebfahrzeug. Die Summe dieser Spalte addiert sich zu 67 %, d. h. insgesamt in 67 % aller Güterzugunfälle ist der Schaden oberhalb der Relevanzgrenze von 1500 € nur auf das Triebfahrzeug beschränkt. Die Spalte " ≥ 10 betroffene Wagen" steht für 10 und mehr betroffene Wagen. Die in der letzten Spalte angegebenen Zeilensummen entsprechen der Gesamtwahrscheinlichkeit der jeweiligen Belastungsklasse, die in Tab. 8.4 angegeben ist. Aus den Zahlenwerten für die kombiniert mechanisch-thermischen Belastungsklassen 5 und 6 sowie 8 und 9 ist ersichtlich, dass mangels ausreichender Datenbasis konservativ eine Gleichverteilung angenommen wurde. An den Summenwerten der einzelnen Spalten betroffener Wagen ist zu erkennen, dass hohe Anzahlen betroffener Wagen bei Unfallereignissen zunehmend unwahrscheinlicher werden: In ca. 16,7 % der Unfälle ist nur 1 Wagen betroffen, in ca. 6,4 % insgesamt 2 und in ca. 0,5 % insgesamt 10 oder mehr.

Soweit der Transport radioaktiver Abfälle in Zügen erfolgt, die ausschließlich Wagen mit radioaktiven Abfällen mitführen, können die bedingten Wahrscheinlichkeiten aus Tab. 8.5 für die Zwecke der Unfallanalyse unmittelbar angewendet werden. Kommt es zu einem Unfall eines solchen Zuges, kann der Tabelle direkt entnommen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit erwartet werden kann, dass der Unfall einer bestimmten Belastungsklasse zuzuordnen ist und dass eine bestimmte Anzahl Wagen betroffen ist.

Beim Transport im Regelgüterverkehr sind die Wagen mit radioaktiven Abfällen vereinzelt oder auch in zusammenhängenden Gruppen Bestandteil einer größeren Zugeinheit. In diesem Fall ist zusätzlich die Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit der bei einem Unfall mit einer bestimmten Anzahl betroffener Wagen auch solche mit Ladungen radioaktiver Abfälle zählen. Mit Hilfe der Kombinatorik lassen sich aus den bedingten Wahrscheinlichkeiten der Tab. 8.5 auch die Wahrscheinlichkeiten ableiten, dass eine bestimmte Anzahl der Wagen betroffen ist, die radioaktive Abfälle geladen haben. Diese sind von der Gesamtzahl der Wagen im Zug sowie von der Anzahl der Wagen mit radioaktiver Ladung im Zug abhängig /FET 91/.

Tab. 8.5 Bedingte Wahrscheinlichkeiten (Eintritt eines Unfalls vorausgesetzt) für Belastungsklassen bei Güterzugunfällen, aufgeteilt nach der Anzahl betroffener Wagen

Belastungsklassen		Anzahl relevant betroffener Güterwagen											Summen pro BK
		0 ¹	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥ 10	
BK1	0...35 km/h kein Brand	1,27·10 ⁻¹	5,38·10 ⁻²	2,27·10 ⁻²	9,92·10 ⁻³	4,39·10 ⁻³	1,96·10 ⁻³	8,79·10 ⁻⁴	3,96·10 ⁻⁴	1,78·10 ⁻⁴	8,07·10 ⁻⁵	3,65·10 ⁻⁵	2,21·10 ⁻¹
BK2	0...35 km/h 800°C 30'	6,73·10 ⁻²	9,73·10 ⁻³	1,77·10 ⁻³	6,28·10 ⁻⁴	4,66·10 ⁻⁴	4,43·10 ⁻⁴	4,39·10 ⁻⁴	4,39·10 ⁻⁴	4,39·10 ⁻⁴	4,39·10 ⁻⁴	4,39·10 ⁻⁴	8,25·10 ⁻²
BK3	0...35 km/h 800°C 60'	3,37·10 ⁻²	4,87·10 ⁻³	8,83·10 ⁻⁴	3,14·10 ⁻⁴	2,33·10 ⁻⁴	2,21·10 ⁻⁴	2,20·10 ⁻⁴	2,19·10 ⁻⁴	2,19·10 ⁻⁴	2,19·10 ⁻⁴	2,19·10 ⁻⁴	4,13·10 ⁻²
BK4	36...80 km/h kein Brand	2,48·10 ⁻¹	6,40·10 ⁻²	2,68·10 ⁻²	1,53·10 ⁻²	1,00·10 ⁻²	7,02·10 ⁻³	5,15·10 ⁻³	3,89·10 ⁻³	3,01·10 ⁻³	2,37·10 ⁻³	1,89·10 ⁻³	3,87·10 ⁻¹
BK5	36...80 km/h 800°C 30'	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻⁴	8,45·10 ⁻³
BK6	36...80 km/h 800°C 60'	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	3,84·10 ⁻⁴	4,23·10 ⁻³
BK7	> 80 km/h kein Brand	1,93·10 ⁻¹	3,24·10 ⁻²	9,67·10 ⁻³	4,57·10 ⁻³	2,61·10 ⁻³	1,65·10 ⁻³	1,12·10 ⁻³	7,90·10 ⁻⁴	5,77·10 ⁻⁴	4,33·10 ⁻⁴	3,31·10 ⁻⁴	2,47·10 ⁻¹
BK8	> 80 km/h 800°C 30'	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	4,90·10 ⁻⁴	5,39·10 ⁻³
BK9	> 80 km/h 800°C 60'	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴	2,69·10 ⁻³
Spaltensummen:		0,6703	0,1667	0,0637	0,0327	0,0196	0,0132	0,0097	0,0076	0,0063	0,0054	0,0048	1,0000

¹ nur das Triebfahrzeug betroffen

8.3.2 Unfallhäufigkeiten beim Rangierbetrieb

Entsprechend dem in Abschnitt 6.2.1 im Einzelnen erläuterten Anlieferungsszenarium erfolgt in der Standortregion eine rangierdienstliche Behandlung der Abfalltransporte im Übergabebahnhof Beddingen, wo die von Seelze zugeführten Güterzüge entsprechend den endgültigen Zielorten aufgeteilt und die Wagen mit radioaktiven Abfällen zur Weiterbeförderung zum Betriebsgelände des Endlagers Konrad zusammengestellt werden. Die hiermit verbundenen Betriebsabläufe und die örtlichen Gegebenheiten sind ebenfalls im Abschnitt 6.2.1 beschrieben.

Unter dem Gesichtspunkt des Unfallrisikos ist von Bedeutung, dass das Gelände abgesehen vom Ablaufberg eben ist. Anders als z. B. beim früheren Rangierbahnhof Braunschweig handelt es sich nicht um einen Bahnhof mit Naturgefälle, bei dem Güterwagen unter Ausnutzung der Schwerkraft über weitere Strecken laufen, so dass zusätzliche Risiken durch Fehleinschätzungen oder technische Mängel beim Abbremsen der Wagen entstehen. Aus betrieblichen Gründen ist außerdem generell die höchstzulässige Fahrgeschwindigkeit auf dem Übergabebahnhof Beddingen und bei anschließenden Rangierstreckenfahrten auf 25 km/h beschränkt.

Zur Abschätzung des Unfallrisikos beim Rangierbetrieb ist für die 1991er Transportstudie Konrad /GRS 91/ eine Unfallauswertung über einen dreijährigen Zeitraum von 1987 bis 1989 im Rangierbahnhof (Rbf) Braunschweig durchgeführt worden, der damals für die rangierdienstliche Behandlung der Abfalltransporte zum geplanten Endlager Konrad vorgesehen war. Zwischenzeitlich ist dieser Rangierbahnhof weitgehend außer Betrieb genommen worden und es ist von dem in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Beförderungsszenarium auszugehen.

Die Zahl der für den seinerzeitigen Rangierbahnhof Braunschweig gemeldeten Rangierunfälle, bezogen auf die Zahl der rangierdienstlich behandelten Wagen, lag zum Zeitpunkt der Auswertung über dem Durchschnitt anderer großer Rangierbahnhöfe, was unter anderem auf die besondere Betriebsweise als sogenannter Gefällebahnhof zurückzuführen ist. Dabei erfolgte nicht nur die Vereinzelung der Wagen am Ablaufberg unter Ausnutzung des natürlichen Gefälles, sondern auch auf den nachfolgenden Schienenwegen (Richtungsgruppe, Ordnungsgruppe) wurden größere Wagengruppen als sogenannte Nachlässe unter Einsatz von Bremswagen unter Ausnutzung der Schwerkraft bewegt. Unter Berücksichtigung dieser ungünstigen Voraussetzungen

können die ermittelten Unfalldaten als abdeckend für den Betrieb auf dem Übergabebahnhof Beddingen angesehen werden.

Die Untersuchung des Unfallgeschehens im Rangierbahnhof Braunschweig hat gezeigt, dass dort als typische Unfallursachen zum Beispiel unzureichende Abstimmung der Beteiligten untereinander, fehlerhafte Hemmschuhe oder Mängel beim Hemmschuhsetzen, hartes Auflaufen, unzureichende Bremskapazität beim Nachlassen, ungesichertes Abstellen, Verletzung der Geschwindigkeitsvorgaben oder ungünstige Massenverteilung in Wagengruppen bei hohen Druckkräften im Wagenverband festzustellen waren. Viele dieser Unfallursachen liegen in menschlichen Fehlhandlungen oder Fehleinschätzungen begründet, so dass man erwarten kann, dass heute insbesondere in den großen Rangierbahnhöfen aufgrund eines höheren Automatisierungsgrades und des Einsatzes moderner technischer Mittel wie Gleisbremsen, Schleppvorrichtungen, Geschwindigkeitsüberwachung deutlich niedrigere Unfallhäufigkeiten erreicht werden.

Es ist allerdings auch festzustellen, dass viele der genannten Unfallursachen im Allgemeinen nur zu geringen Schäden führen. Im Hinblick auf die Zuordnung zu den definierten Belastungsklassen ist zu beachten, dass die Fahr- und Ablaufgeschwindigkeiten beim Rangierbetrieb so begrenzt sind, dass die Obergrenze der niedrigsten mechanischen Belastungsklasse von 35 km/h normalerweise nicht erreicht werden kann.

Bei der Auswertung der Rangierunfälle im Rangierbahnhof Braunschweig in den Jahren 1987 bis 1989 wurde die gleiche Relevanzgrenze von 3000 DM Sachschaden an Schienenfahrzeugen angewendet, wie für Güterzugunfälle. Dabei ergaben sich in den drei Jahren 17 relevante Rangierunfälle. Bezogen auf 2,28 Millionen über den Ablaufberg rangierter Wagen entspricht dies 7,5 Unfallereignissen pro 1 Million rangierter Wagen. Diese Zahl enthält im Gegensatz zur Auswertung der Güterzugunfälle keine Vorkommnisse, bei denen nur das Triebfahrzeug betroffen war.

Hinsichtlich der Unfallarten ergab sich dabei ein überwiegender Anteil von Unfällen durch Zusammenstöße und hartes Auflaufen (13 Fälle). Entgleisung und andere Ursachen waren bei den relevanten Unfällen deutlich geringer vertreten (4 Fälle). Relevante Brandschäden wurden in den betrachteten drei Jahren nicht verzeichnet. Ein Unfall, bei dem es nach einer mechanischen Einwirkung zu einem Folgebrand gekommen war,

war nach Auskunft des Personals im Rangierbahnhof Braunschweig auch über den Untersuchungszeitraum hinaus nicht bekannt.

Bei der Zuordnung zu den in Abschnitt 8.2.1 definierten Belastungsklassen wurden alle dokumentierten Unfälle der Belastungsklasse mit einer mechanischen Einwirkung im Geschwindigkeitsbereich bis 35 km/h zugeordnet. Zwar sind nicht für alle Unfälle exakte Geschwindigkeitsangaben verfügbar, weil nur bei Triebfahrzeugen eine Fahrtschreiberaufzeichnung vorliegt. Die detaillierten Unfallbeschreibungen lassen jedoch darauf schließen, dass die Obergrenze dieses Intervalls mit großer Wahrscheinlichkeit nicht oder höchstens unwesentlich überschritten worden ist. Im Rahmen der Risikoanalyse werden für die meisten dieser Unfälle die Auswirkungen dadurch ganz erheblich überschätzt werden, dass ein Aufprall auf ein unnachgiebiges Hindernis mit einer Geschwindigkeit entsprechend der Obergrenze des Geschwindigkeitsintervalls angenommen wird. Eine eventuelle geringe Unterschätzung im Einzelfall wird durch diesen insgesamt konservativen Ansatz mehr als kompensiert.

Unfälle mit Brand sind auch im Rangierbetrieb nicht grundsätzlich auszuschließen, auch wenn sie im ausgewerteten Datenbestand nicht enthalten waren. Es ist davon auszugehen, dass die Häufigkeit von Bränden wesentlich dadurch bestimmt wird, welcher Anteil der transportierten Ladung entflammbar oder feuergefährlich ist. Weil die Ladung im Rangierbetrieb in gleicher Weise verteilt ist wie im Güterzugverkehr, wurde für die Zwecke der Risikoanalyse angenommen, dass Unfälle mit Brand im Rangierbetrieb den gleichen Anteil an der Gesamtheit der Unfälle haben wie im Güterzugverkehr. Diese Annahme ist konservativ, weil im Rangierbetrieb einige Brandursachen entfallen oder sich nicht auswirken, die im Güterzugverkehr eine Rolle spielen. Hierzu gehören zum Beispiel heißgelaufene Achslager oder Bremsen oder Zusammenprall an Bahnübergängen mit (Straßen-)Fahrzeugen, die feuergefährliche Stoffe als Treibstoff oder Ladung mitführen. Die getroffene Annahme bedeutet, dass etwa ein Brandunfall auf 1,7 Millionen rangierte Wagen unterstellt wird. Entsprechend wurde auch die Zuordnung zu den Referenzbränden von halb- beziehungsweise einstündiger Dauer wie bei Güterzugunfällen im Verhältnis zwei (halbstündig) zu eins (einstündig) vorgenommen.

Im Hinblick auf Unfälle mit mechanischer Einwirkung, die einen Brand zur Folge haben, war ebenfalls der Gesichtspunkt zu berücksichtigen, dass im Rangierverkehr insgesamt nur geringe Geschwindigkeiten auftreten. Deshalb wurde auch hier angenommen, dass alle Unfälle mit kombinierten mechanischen und thermischen Einwirkungen den Belastungsklassen 2 und 3 (vgl. Abb. 8.1) zuzuordnen sind.

Für die Zahl der bei Unfällen betroffenen Wagen gilt, wie bei Güterzugunfällen, dass am häufigsten nur ein Wagen betroffen ist. Die Häufigkeit, mit der mehrere Wagen betroffen sind, nimmt aber beim Rangierbetrieb noch stärker ab als beim Güterzugverkehr. Unfälle mit mehr als fünf betroffenen Wagen wurden nicht beobachtet. Damit sind im Mittel weniger Wagen bei einem Unfall betroffen, als bei Güterzugunfällen im gleichen Geschwindigkeitsintervall (0 - 35 km/h). Dies ist wohl hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass im Rangierbetrieb häufiger kleinere Wagengruppen oder Einzelfahrzeuge in den Unfall verwickelt sind und dass bei Entgleisung aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten weniger Wagen betroffen sind, als bei höheren Geschwindigkeiten. Die empirische Verteilung der relativen Häufigkeit einer bestimmten Zahl betroffener Wagen ist in Bild Abb. 8.4 graphisch dargestellt. An den Diagrammsäulen ist auch die absolute Zahl der Unfälle angegeben.

Für Brandunfälle und mechanische Unfälle mit Folgebrand wurde auch bezüglich der Zahl betroffener Wagen die für Güterzugunfälle verwendete Verteilung übertragen. Insbesondere wurde auch hier konservativ eine Gleichverteilung der Anzahl betroffener Wagen für Unfälle mit kombinierter mechanischer und thermischer Einwirkung angenommen. Allerdings geht diese Verteilung nur bis zu fünf betroffenen Wagen, um die bei den Rangierunfällen im Mittel geringere Anzahl betroffener Wagen zu berücksichtigen.

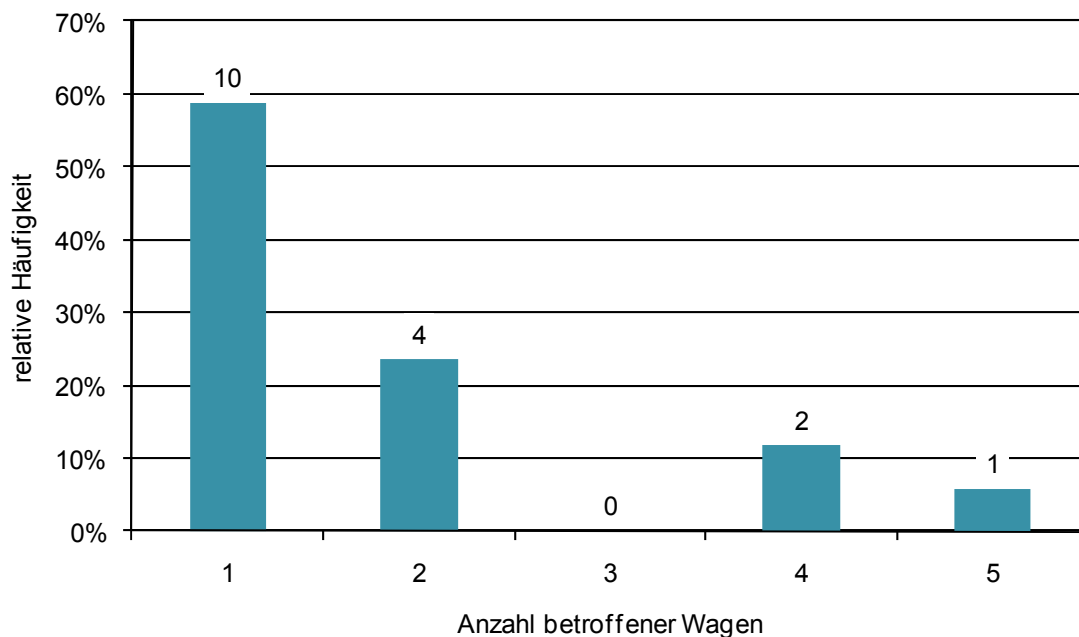


Abb. 8.4 Relative Häufigkeit der Anzahl betroffener Wagen bei Rangierunfällen: Empirische Verteilung Rbf. Braunschweig 1987 - 1989

Entsprechend der Vorgehensweise bei Güterzugunfällen wurden auch für die Rangierunfälle die Ergebnisse in einer Matrix der Eintrittswahrscheinlichkeiten zusammengefasst, die in Tab. 8.6 wiedergegeben ist. Für Unfälle der Belastungsklasse 1 wurde unmittelbar die empirische Verteilung verwendet, ohne die Daten durch eine statistische Verteilungsfunktion anzupassen. Daher bleibt in dieser Belastungsklasse das Feld für drei betroffene Wagen leer und die Häufigkeit für mehr als 5 betroffene Wagen ist Null. Aus den vorstehend erläuterten Gründen bleiben ferner die Geschwindigkeitsklassen 36 bis 80 km/h und mehr als 80 km/h unbesetzt.

Für die Risikoanalyse ist auch bei den Rangierunfällen der Gesichtspunkt zu berücksichtigen, dass bei Unfällen mit mehreren betroffenen Wagen nicht alle radioaktiven Abfall transportieren. Die entsprechenden kombinatorischen Wahrscheinlichkeiten könnten auch für diesen Fall in Anlehnung an die Vorgehensweise beim Güterzugverkehr ermittelt werden. Zu rangierende Güterzüge bestehen im Mittel aus 40 Güterwagen, davon nur wenige Abfallwagen. Entsprechend zeigt eine kombinatorische Analyse erwartungsgemäß, dass bei Zugrundelegung der in Abb. 8.4 für den früheren Rangierbahnhof Braunschweig wiedergegebenen empirischen Verteilung bei Rangierunfällen betroffener Wagen (unabhängig von ihrer Ladung), Unfälle mit gleichzeitig zwei oder mehr betroffenen Wagen mit dem Merkmal radioaktiver Abfall als Ladung sehr unwahrscheinlich sind. Für eine adäquate Erfassung des mit dem Rangieren von Abfallwagen verbundenen radiologischen Risikos unter Verwendung der besonders ungünstigen Unfallhäufigkeit des früheren Rangierbahnhofes Braunschweig ist daher die Vereinfachung gerechtfertigt und ausreichend, das mögliche Spektrum von Rangierunfällen mit einem betroffenen Abfallwagen zu analysieren.

Somit können für Rangierunfälle das Spektrum möglicher unfallverursachter Freisetzungen aus Abfallgebinden und deren bedingte Wahrscheinlichkeiten dadurch erfasst werden, dass vom Unfallsimulationsprogramm – wie für das Szenario 100% Schienentransport – die Vielzahl möglicher Beladekonstellationen eines Abfallwagens mit Transporteinheiten analysiert wird. Dabei werden die relativen Häufigkeiten der Belastungsklassen gemäß Tab. 8.6 (letzte Spalte) berücksichtigt.

8.3.3 Unfallhäufigkeiten beim Straßentransport

Bei der Bestimmung der Unfallhäufigkeiten für den Straßentransport aus empirischen statistischen Daten sind Bedingungen zugrunde zu legen, die mit den Bedingungen vergleichbar sind, unter denen die Transporte tatsächlich durchgeführt werden. Dies betrifft die für eine potenzielle Unfallumgebung relevanten Merkmale der verwendeten Transportfahrzeuge sowie der Transportstrecken. Als Transportfahrzeuge kommen aufgrund des Gewichts der vorgesehenen Transporteinheiten im Allgemeinen nur schwere LKW und Sattelkraftfahrzeuge in Frage. Von der Streckenführung her ist ein Transport auf Autobahnen und – im näheren Bereich des Endlagers – auf autobahnähnlich ausgebauten Streckenabschnitten möglich und wahrscheinlich. Die Bestimmung der zu erwartenden Unfallhäufigkeiten erfolgte daher unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen.

Zur Ermittlung der Gesamtunfallrate konnten neuere Daten aus den Jahren 2000 und 2005 herangezogen werden, welche die Bundesanstalt für Straßenwesen im Rahmen einer Sonderauswertung für die Zwecke des vorliegenden Berichts zur Verfügung gestellt hat. Die Daten basieren auf der amtlichen Unfallstatistik sowie auf den Ergebnissen der Verkehrszählungen 2000 und 2005. Die Auswertung wurde nicht auf das Verkehrsgeschehen in der Standortregion beschränkt, sondern umfasst das gesamte Bundesgebiet, um eine ausreichende Fallzahl für eine statistisch gesicherte Aussage zu gewährleisten. Bei der Ermittlung der Unfallrate (Unfälle pro gefahrenen Kilometer) werden vollständige und kompatible Angaben zur Anzahl von Unfällen sowie zur zugehörigen Fahrleistung, die in dem betrachteten Segment des Güterverkehrs erbracht wurde, benötigt. Neben der zuvor genannten Beschränkung auf bestimmte Fahrzeugkategorien des Schwerlastverkehrs war die Verfügbarkeit kompatibler Daten ein Kriterium für die Auswahl des Güterverkehrssegments, das zur Bestimmung der Unfallrate herangezogen wurde.

Bezüglich der betrachteten Straßenkategorie waren die erforderlichen Daten entsprechend der angenommenen Charakteristik der Abfalltransporte für den Verkehr auf Bundesautobahnen verfügbar. Bezüglich der Fahrzeugkategorie konnte ein kompatibler Datenbestand allerdings nur bei Ausweitung des betrachteten Verkehrsaufkommens auf "LKW mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Anhänger sowie Sattelfahrzeuge" bereitgestellt werden, weil für die Untermenge der Sattelfahrzeuge die zugehörige Verkehrsleistung nicht separat bekannt ist. Insofern wird die ermittelte Unfallrate auch durch leichtere Fahrzeuge als für den Abfalltransport vorgesehen beein-

flusst, jedoch nicht durch die für besonders hohe Unfallraten bekannten Kleintransporter.

Bei der Unfallauswertung für den Schienenverkehr sowie bei früheren Auswertungen für den Straßengüterverkehr wurde eine monetäre Relevanzgrenze für den Sachschaden an Fahrzeugen verwendet, um Unfälle auszuschließen, bei denen im Fall einer Beförderung radioaktiver Abfälle ein Schaden an Abfallbinden mit der Folge einer Freisetzung nicht anzunehmen ist. In der amtlichen Statistik wurde jedoch die Klassifizierung der Straßenverkehrsunfälle nach der Höhe des Sachschadens nach mehrfachen Anpassungen der Schadengrenze mit der Einführung des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes vom 21. Dezember 1994 schließlich aufgegeben. Für diese Auswertung wurden daher die "Unfälle mit Personenschaden" sowie "Schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden" herangezogen. Die letzteren umfassen alle Unfälle, bei denen als Unfallursache eine Ordnungswidrigkeit oder eine Straftat anzunehmen ist und mindestens ein Kraftfahrzeug aufgrund des Unfallschadens von der Unfallstelle abgeschleppt werden muss. Ein schwerwiegender Unfall mit Sachschaden liegt auch vor, wenn ohne Rücksicht auf die Art des Sachschadens ein Unfallbeteiligter unter Alkoholeinwirkung gestanden hat. Bei dieser Art der Abgrenzung ist anzunehmen, dass auch viele Unfälle erfasst werden, bei denen tatsächlich kein die Relevanzgrenze überschreitender Schadensumfang an der Ladung des beteiligten Güterfahrzeugs drohte.

Die Ermittlung der zugehörigen Fahrleistung beruht auf Daten von ca. 2440 automatischen Zählstellen, die das Netz der Bundesautobahnen praktisch vollständig abdecken. Hierdurch ist – in Übereinstimmung mit der erfassten Unfallzahl – auch die Fahrleistung ausländischer Fahrzeuge berücksichtigt.

Unter den genannten Voraussetzungen wurde für die Verwendung bei der Risikoanalyse eine Gesamtunfallrate von $2,9 \cdot 10^{-7}$ pro Kilometer ermittelt.

Die Zuordnung von Unfalleinwirkungen zu Belastungsklassen setzt sehr eingehende Analysen von Unfallabläufen voraus. Diesbezüglich konnten eigene Auswertungen von Primärdaten aufgrund des damit verbundenen Aufwands nur begrenzt durchgeführt werden. Daher wurde hinsichtlich der relativen Häufigkeit bestimmter Unfalleinwirkungen im Wesentlichen auf Ergebnissen von /PSE 85a, PSE 85b/ aufgebaut, die durch eigene Auswertungen und andere Literaturergebnisse ergänzt wurden. Diese Ergänzungen betreffen vor allem Annahmen zur Aufteilung der Brandereignisse auf die beiden Referenzbrände (800 °C/ 30 min bzw. 800 °C / 60 min) und die Aufteilung in Al-

leinunfälle und Unfälle mit mehreren Beteiligten. Letztere wirkt sich in Verbindung mit der Häufigkeit entflammbarer Ladung beim Unfallpartner auf die Häufigkeit der Belastungsklassen mit thermischer Einwirkung (Brand) aus.

Die ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Belastungsklassen sind in Tab. 8.7 zusammengefasst. Die angegebenen relativen Wahrscheinlichkeiten addieren sich zu 1 (d. h. es tritt irgendeine der Belastungsklassen ein, wenn ein Unfall geschieht). Mit rein mechanischen Unfalleinwirkungen ist in fast 98 % aller Unfälle zu rechnen (Summe der Belastungsklassen 1, 4 und 7), wobei die Hälfte aller Unfälle in den Geschwindigkeitsbereich bis 35 km/h fällt. Bedingt durch die geltenden Geschwindigkeitsvorgaben für LKW liegen nur in knapp 5 % der Unfälle Geschwindigkeiten von über 80 km/h vor.

Tab. 8.7 Relative Häufigkeit der neun Belastungsklassen bei Straßentransportunfällen

Aufprallgeschwindigkeit	Relative Häufigkeit		
	ohne thermische Einwirkung	bei 30 Minuten thermischer Einwirkung, 800 °C	bei 60 Minuten thermischer Einwirkung, 800 °C
0 bis 35 km/h	0,4990 (BK 1)	$1,05 \cdot 10^{-2}$ (BK 2)	$8,40 \cdot 10^{-4}$ (BK 3)
36 bis 80 km/h	0,4307 (BK 4)	$9,45 \cdot 10^{-3}$ (BK 5)	$7,56 \cdot 10^{-4}$ (BK 6)
über 80 km/h	0,0476 (BK 7)	$1,05 \cdot 10^{-3}$ (BK 8)	$8,40 \cdot 10^{-5}$ (BK 9)

In 2,3 % der Unfälle kommt es zu einem Brand. Dabei sind etwa 7,4 % der Brandunfälle durch den Referenzbrand mit 60 Minuten Branddauer zu beschreiben, während die übrigen durch den 30-Minuten-Brand abgedeckt sind. Im Vergleich zum Schienenverkehr ist dies ein Hinweis, dass dort aufgrund einer sehr kleinen Datenbasis die Aufteilung sehr konservativ abgeschätzt wurde, indem ein Drittel der Unfälle dem Referenzbrand von 60 Minuten Dauer und zwei Drittel dem Referenzbrand von 30 Minuten Dauer zugeordnet wurden. Die Verteilung der Brandunfälle auf die Geschwindigkeitsbereiche weicht beim Straßentransport wenig von der Verteilung bei den Unfällen mit

nur mechanischer Einwirkung ab. Dies weist darauf hin, dass Unfälle, bei denen es zu einem Brand gekommen ist, ohne dass eine mechanische Unfalleinwirkungen vorgelegen hätte, im Gegensatz zum Schienenverkehr selten sind. Solche Unfälle würden nämlich zu einer stärkeren Besetzung des Geschwindigkeitsbereichs 0 bis 35 km/h bei den Brandunfällen führen.

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten gemäß Tab. 8.7 sind direkt für die Risikoanalyse anwendbar, da eine weitere Aufspaltung nach der Anzahl betroffener Wagen hier im Gegensatz zum Schienenverkehr nicht in Frage kommt.

8.3.4 Übertragbarkeit der Unfalldaten auf den Standortbereich

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie gut die bundesweit erhobenen Daten zur Unfallhäufigkeit auf die Standortregion, insbesondere den betrachteten Umkreis im Radius von 25 km um das Endlager übertragbar sind. Das betrachtete Gebiet ist zu klein, um signifikante Abweichungen aus einer regionalen Unfallstatistik ableiten zu können. Dies gilt besonders für den Schienenverkehr. Daher ist man im Wesentlichen auf eine qualitative Beurteilung regionaler Besonderheiten angewiesen, welche Abweichungen der Unfallhäufigkeiten in günstiger oder ungünstiger Weise erwarten lassen.

Abfalltransporte auf der Schiene werden nach gegenwärtigem Stand in Regelgüterzügen mitgeführt, welche vom Rangierbahnhof Seelze kommend die Strecke von Hannover in Richtung Braunschweig befahren, bevor sie bei Groß Gleidingen den Abzweig zum Übergabebahnhof Beddingen nehmen. Die im Umkreis vom Radius 25 km um das Endlager zurückgelegte Fahrstrecke eines Schienentransportes beträgt rund 35 km.

Weder die vorliegenden Unfalldaten, soweit sie sich auf die Region beziehen, noch die verfügbaren Informationen über sicherheitsrelevante Merkmale der Streckenführung bzw. des Streckenausbaus geben einen Hinweis, dass die Unfallgefährdung auf diesen Strecken größer sein könnte, als im Durchschnitt des Bundesgebietes. So ist z. B. die Häufigkeit höhengleicher Bahnübergänge im 25 km Umkreis mit 0,57 vergleichbar mit dem Durchschnitt von 0,56 Übergängen pro km Betriebslänge im Bundesgebiet. Durch die topographischen Gegebenheiten der im Wesentlichen ebenen Landschaft werden potenziell unfallbegünstigende Streckenmerkmale (z. B. Gefällestrecken) oder Merkmale, die Unfallfolgen verschärfen können (z. B. große Absturzhöhen) weitgehend vermieden.

Für die Transporte vom Übergabebahnhof Beddingen zum Endlager kann bezüglich der sicherheitstechnischen Ausstattung der Betriebsmittel sowie hinsichtlich der Betriebsführung des privaten Betreibers ein äquivalenter Sicherheitsstandard wie bei der Deutschen Bahn unterstellt werden. Die Begrenzung der Zuggeschwindigkeit auf 25 km/h im gesamten Netz des privaten Betreibers führt bei den meisten denkbaren Unfallsituationen zu einer erheblichen Reduzierung der möglichen Unfallauswirkungen. Daher wird das Risiko für diese Transportstrecke durch Verwendung der Daten aus dem Güterzugverkehr der Deutschen Bahn sicher überschätzt.

Im Hinblick auf den Rangierbetrieb im Übergabebahnhof Beddingen, wo schließlich die Zusammenstellung der Wagengruppen zur Anlieferung am Endlager erfolgt, können für eine konservative Risikoabschätzung die Unfalldaten für den ehemaligen Rangierbahnhof Braunschweig zugrunde gelegt werden, für den die Unfallhäufigkeit unter anderem aufgrund des Naturgefälles im Bereich des Rangierbahnhofs über dem Durchschnitt anderer großer Rangierbahnhöfe lag.

Die Rangiervorgänge finden in Beddingen am Ablaufberg statt. Es ist jedoch nicht die unfallbegünstigende Situation eines Gefälles im weiteren Bereich des Rangierbahnhofs gegeben. Für Fahrten im Bereich des Rangierbahnhofs gilt eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 25 km/h. Das Gleissystem im Rangierbereich ist relativ klein und übersichtlich. Die Kontrolle des insgesamt geringen Rangieraufkommens durch wenige Personen reduziert die Möglichkeiten von Unfällen durch mangelnde Abstimmung innerhalb des Rangierpersonals beträchtlich, einer an anderen Standorten häufigen Unfallursache. Abstimmungsprobleme werden auch durch die Durchführung der Rangierfahrt im Fernsteuerbetrieb vermieden, bei dem der Triebfahrzeugführer unmittelbar die Kontrolle über die übrigen Betriebsvorgänge wahrnehmen kann. Auch von der technischen Ausrüstung und der Betriebsführung her sind die sicherheitsrelevanten Merkmale im Bereich des privaten regionalen Schienenverkehrsnetzes denen bei der Deutschen Bahn äquivalent.

Beim Straßentransport erlaubt die Lage des Endlagerstandortes den Antransport der Abfälle nahezu ausschließlich auf Bundesautobahnen mit Ausnahme eines kurzen, autobahnähnlich ausgebauten Streckenabschnitts in unmittelbarer Nähe der Anlage. Daher wurde zur Ermittlung des Transportrisikos die Unfallhäufigkeit der in Frage kommenden Transportfahrzeuge auf Autobahnen zugrunde gelegt. Der Ausbauzustand dieser Verkehrswege entspricht dem Standard, so dass fahrwegbedingt keine ungünstigeren Bedingungen als im Durchschnitt des Bundesgebiets zu erwarten sind. Die to-

pographische Situation in der Region führt im Gegenteil dazu, dass bestimmte risikobehaftete Streckenabschnitte wie starke Steigungen und kurvenreiche Strecken nicht vorkommen. Gleiches gilt wie beim Schienenverkehr für Abschnitte, die Unfallfolgen verschärfen können, z. B. durch große Absturzhöhen. Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht als Ergebnis streckenbezogener Unfallanalysen eine Übersicht über signifikante Unfallhäufigkeiten auf Bundesautobahnen /BAST 06/. Mit nur zwei kurzen Streckenabschnitten mit Häufungen von mittlerem Signifikanzniveau ist die Standortregion auch diesbezüglich unauffällig im Vergleich zur bundesweiten Verteilung solcher Häufungsstellen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass es keine Hinweise gibt, die eine Übertragbarkeit der zugrunde gelegten Unfalldaten auf die Endlagerregion in Frage stellen würden. In einigen Punkten kann davon ausgegangen werden, dass mit der Übertragung der Unfalldaten auf die Endlagerregion eine Überschätzung des Transportunfallrisikos verbunden ist.

8.4 Transportunfallsimulation - Quelltermbestimmung

Um das Spektrum möglicher Unfallabläufe bis hin zu den dabei möglichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe unter Berücksichtigung der zu erwartenden Häufigkeit der Ereignisse zu erfassen, wurde wie in /GRS 91/ ein Unfallsimulationsprogramm eingesetzt. Dieses Programm berücksichtigt das betrachtete Transportaufkommen (153 Referenzabfälle und deren relative Häufigkeit), unterschiedliche Transportkonfigurationen wie die Anzahl der Abfallwagen im Güterzug und deren Beladung sowie die möglichen Unfallbelastungen (9 Belastungsklassen) und erzeugt darauf basierend eine Vielzahl von Quelltermen, die für mögliche unfallbedingte Freisetzungen von Radionukliden repräsentativ sind. Gleichzeitig wird die Häufigkeit, mit der das Auftreten solcher Freisetzungsereignisse zu erwarten ist, erfasst. Alle in den vorangehenden Abschnitten aufgeführten abdeckenden Annahmen bei Festlegungen von Werten, die die Freisetzung aus Abfallbehältern und die Häufigkeiten von Unfallbelastungen bestimmen, sind Bestandteil des Simulationsprogramms.

Wie die einzelnen Anlieferungsszenarien für den Transport radioaktiver Abfälle auf Schiene und Straße im Simulationsprogramm realisiert werden und wie Transportunfälle simuliert und dafür eine repräsentative Anzahl von Quelltermen ermittelt werden, so dass das Transportaufkommen und das Unfallspektrum repräsentativ erfasst werden, wird im Folgenden erläutert. Dazu werden für den Güterzugverkehr und für Straßentransporte

- die Beladung von Transportfahrzeugen,
- die Simulation von Transportunfällen und
- die Bestimmung der freigesetzten Aktivität

behandelt. Dabei werden jeweils zunächst die Vorgehensweisen und Rechenergebnisse für die hypothetischen Szenarien 100 % Schienentransport und 100 % Straßentransport beschrieben, bevor anschließend das daraus abgeleitete kombinierte 80/20-Szenarium behandelt wird.

8.4.1 Abfalltransport im Güterzugverkehr

Beladung von Abfallwagen

Für den Transport auf der Schiene werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Jeweils zwei Transporteinheiten befinden sich auf einem Güterwagen. Seltene Abweichungen von dieser Standardkonfiguration können vernachlässigt werden.
- Die Abfälle werden im Regelgüterzugverkehr befördert. Die mittlere Zuglänge der Regelgüterzüge auf der betrachteten Strecke beträgt 40 Wagen. Es fahren an 4 Werktagen je Arbeitswoche 5 Regelgüterzüge täglich vom Rangierbahnhof Seelze zum Übergabebahnhof Beddingen, die Güterwagen mit Abfällen mitführen können.
- Am Rangierbahnhof Seelze kommen Abfallwagen einzeln und zufällig über den Tag verteilt an und werden jeweils direkt in den nächsten Regelgüterzug nach Beddingen eingliedert (siehe zugehörige Diskussion der Konservativität weiter unten).

Mit den nach aktueller Planung wöchentlich eingelagerten 50 Transporteinheiten und der zu erwartenden Annahme von Abfallwagen am Endlagerstandort an nur 4 Werktagen pro Woche (vgl. Abschnitt 6.2.1) ergibt sich bei 100 % Schienenbeförderung aus den obigen Annahmen eine Verteilung der wöchentlichen Abfallwagenzahl von 25 auf 20 Regelgüterzüge.

Mit der Annahme einer zufälligen Eingliederung von einzelnen Abfallwagen in Seelze und der Obergrenze von 7 gleichzeitig am Endlager annehmbaren Abfallwagen resultiert die in Abb. 8.5 dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Anzahl von Abfallwagen pro Regelgüterzug. Diese Verteilung wurde aus Monte-Carlo-Simulationen gewonnen, bei denen die Eingangsparameter unter Berücksichtigung ihrer Wahrscheinlichkeit und einschränkender Randbedingungen in einer großen Anzahl von Einzelsimulationen zufällig ausgewählt werden, um ein statistisch auswertbares Ergebnis zu erzielen. Es ist erkennbar, dass bei den angenommenen Randbedingungen die Maximalzahl 7 gleichzeitig in Beddingen bzw. am Anlagengelände angelieferter Wagen mit Abfällen bei diesen Annahmen sehr selten auftritt.

Vergleichsrechnungen mit anderen Anlieferungs-Varianten haben ergeben, dass die Annahme einer zufälligen Eingliederung von einzelnen Abfallwagen in die Regelgüter-

züge von Seelze nach Beddingen in Bezug auf das resultierende Gesamtrisiko konservativ ist, das Gesamtrisiko allerdings nur wenig beeinflusst. Für das hypothetische Anlieferungsszenarium einer alleinigen Schienenbeförderung wird diese leicht konservativere Variante von einzeln in Seelze ankommenden Abfallwagen unterstellt, während im Rahmen des realistischeren Szenariums eines gemischten Transports per Schiene und Straße zusätzlich berücksichtigt wird, dass bei einzelnen Abfallablieferern bereits auf Grund des täglichen Aufkommens ein gruppenweiser Start von Abfallwagen anzunehmen ist (siehe Abschnitt 8.5.3).

Die in Abb. 8.5 für das hypothetische Beförderungsszenarium 100 % Schienentransport dargestellte Häufigkeitsverteilung der Abfallwagenanzahl pro Regelgüterzug bezieht sich nur auf die Regelgüterzüge, in denen Abfallwagen enthalten sind. Bereits ausgenommen sind etwa 27,7 % der Regelgüterzüge, die ohne Abfallwagen nach Beddingen befördert werden. So würde sich bei 100 % Schienenbeförderung und der jährlichen Einlagerungsmenge von 2300 Transporteinheiten, verteilt auf 46 Arbeitswochen, ein jährliches Aufkommen von 920 Regelgüterzügen ergeben, von denen etwa 665 Regelgüterzüge mindestens einen Abfallwagen enthalten. Auf diese 665 Regelgüterzüge würden sich 1150 Abfallwagen verteilen, so dass sich im Mittel etwa 1,73 Abfallwagen in einem Regelgüterzug mit Abfällen befinden.

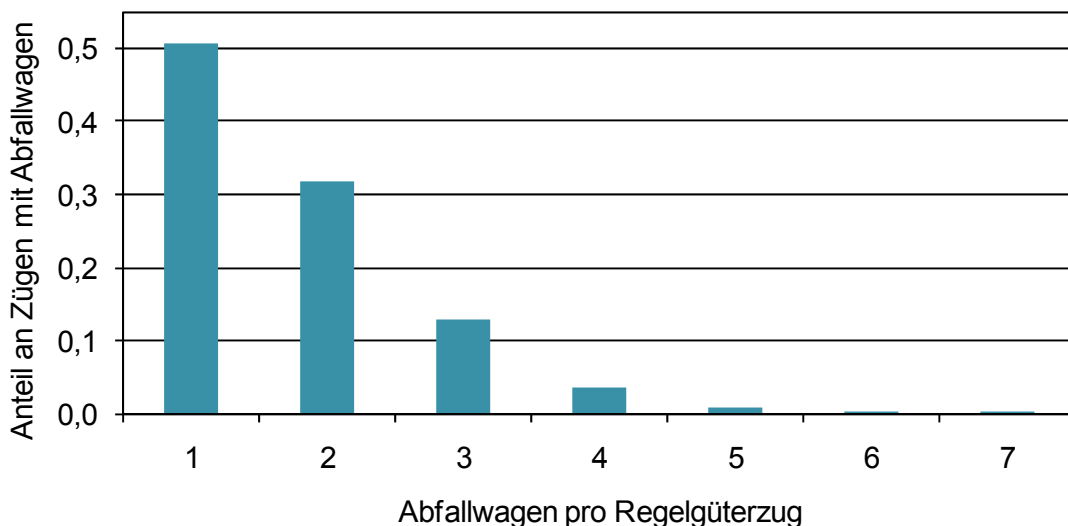


Abb. 8.5 Hypothetische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abfallwagenanzahl in Regelgüterzügen mit mindestens einem Abfallwagen bei 100 % Schienentransport (Annahme: Ankunft in Seelze als Einzelwagen)

Die in Tab. 8.5 zusammengestellten statistischen Daten zur relativen Häufigkeit verschiedener Unfallbelastungen und Anzahl betroffener Wagen erfassen auch Ereignisse, bei denen bis zu 10 Wagen mit beliebiger Beladung von einem Unfall betroffen sind. Die obigen Randbedingungen zur Beladung von Abfallwagen in Regelgüterzügen führen dazu, dass vom Simulationsprogramm Unfälle simuliert werden, bei denen 1, 2, ... bis maximal 7 Wagen mit radioaktiven Abfallgebinden betroffen sind, wobei insgesamt jeweils 40 Güterwagen in einem Regelgüterzug enthalten sind. Die Wahrscheinlichkeit einer Beteiligung von Abfallwagen in einem Unfall ist daher niedriger als in Tab. 8.5 für Güterwagen mit beliebiger Beladung ausgewiesen. Dies wird durch ergänzende kombinatorische Berechnungen berücksichtigt /GRS 07/.

Die Belegung der Züge mit radioaktiven Abfallgebinden erfolgt ebenfalls mittels Monte-Carlo-Simulation. Dabei werden die Parameter, die die Beladung von Abfallwagen und deren Verteilung auf die Regelgüterzüge bestimmen, unter Berücksichtigung der zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zufällig ausgewählt. Die hierbei variierten Parameter sind

- Anzahl Abfallwagen im Zug gemäß Verteilung in Abb. 8.5
- Ablieferungspflichtiger gemäß Anteil am Abfallaufkommen (Basis: Transporteinheiten)
- Referenzabfall gemäß Anteil am Abfallaufkommen (Basis: Transporteinheiten)
- Abweichung von der mittleren Aktivität eines Referenzabfalls.

Der letztgenannte Parameter berücksichtigt die bereits in Abschnitt 5.2 beschriebene Häufigkeitsverteilung des Aktivitätsinventars. Auch innerhalb eines jeden Referenzabfalls gibt es Abweichungen vom mittleren Aktivitätsinventar. Um die Streuung dieses Parameters näherungsweise zu berücksichtigen, wird bei der Unfallanalyse statt einer mittleren Aktivität pro Referenzabfall eine Stufenfunktion verwendet, die die typische Aktivitätsverteilung approximiert. Danach wird die Aktivität bei 10 % der Abfallgebinde um einen Faktor 5 gegenüber dem Mittelwert angehoben und in den restlichen 90 % entsprechend auf 5/9 abgesenkt. Die Gesamtaktivität pro Referenzabfall bleibt dadurch unverändert.

Die jeweiligen Anteile der Ablieferungspflichtigen bzw. der Referenzabfälle am Abfallaufkommen variieren je nach angenommener Aufteilung der Transporte auf den Schienen- und Straßenverkehr.

Obwohl das BfS im Rahmen der Abrufstrategie eine kampagnenweise Einlagerung von gleichen Behältertypen anstrebt, sind im Gegensatz zu den Annahmen in /GRS 91/ beliebige Kombinationen von Referenzabfällen in einem Regelgüterzug möglich. Auf Grund des breiten Spektrums von Aktivitätsinventaren innerhalb von und zwischen Referenzabfällen des gleichen Behältertyps ist die Vernachlässigung einer denkbaren Einschränkung der Kombination von Behältertypen innerhalb eines Regelgüterzuges für das Gesamtergebnis unerheblich. Einschränkend wird lediglich angenommen, dass eine Transporteinheit mit zylindrischen Abfallbehältern nur mit einem Referenzabfall beladen ist und Wagen jeweils nur von einem Abfallablieferungspflichtigen beladen werden.

Durch eine geeignet große Anzahl solcher zufälliger Parametersätze lässt sich ein statistisch repräsentatives Abbild des zu erwartenden Spektrums von Abfalltransporten im Güterzugverkehr zwischen dem Rangierbahnhof Seelze und dem Endlagerstandort erzeugen, das in der angekoppelten Simulation der Transportunfälle verwendet werden kann. Da die Länge der Anlieferstrecke vom Übergabebahnhof Beddingen zum Endlagergelände Konrad nur einen kleinen Anteil der insgesamt berücksichtigten Transportstrecke in der Endlagerregion ausmacht, werden die auf diesem Streckenabschnitt vom Regelgüterzugverkehr abweichenden Beförderungsbedingungen vernachlässigt. Der Rangierbetrieb am Übergabebahnhof Beddingen wird hingegen separat behandelt (Abschnitt 8.4.3).

Simulation von Transportunfällen

Für alle nach obigem Muster erzeugten Regelgüterzüge mit mindestens einem Abfallwagen werden Parametersätze erzeugt, die die Unfallschwere und damit auch die mögliche Freisetzung radioaktiver Stoffe bestimmen. Die hierbei systematisch variierten Parameter sind:

- Belastungsklasse (siehe Tab. 8.1) und
- Anzahl der vom Unfall betroffenen Abfallwagen.

Für eine Parameterkombination aus einem Güterzug mit Abfallwagen, der Anzahl betroffener Abfallwagen und der Belastungsklasse lässt sich mit den Freisetzunganteilen aus Abschnitt 8.2.2 für jeden simulierten Unfall ein Quellterm ableiten. Dabei werden auch die Unfallereignisse registriert, bei denen die Abfallbehälter den Belastungen

standhalten (vgl. Tab. 8.2 und Tab. 8.3) und es zu keiner Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt.

Mit dem Quellterm werden jeweils die bedingten Wahrscheinlichkeiten für das kombinierte Auftreten der Belastungsklasse und der Anzahl vom Unfall betroffener Abfallwagen (Tab. 8.5) für Güterwagen und zusätzliche Kombinatorik für die im Zug enthaltenen Abfallwagen abgespeichert. Ebenfalls abgespeichert wird jeweils die Belastungsklasse, da bei den später zu berechnenden potenziellen Strahlenexpositionen für die atmosphärische Ausbreitung zu unterscheiden ist, ob die Freisetzung ohne oder mit Brand erfolgt ist. Insgesamt werden so ca. 30 000 Quellterme generiert, die das Spektrum möglicher Freisetzungen bei Güterzugunfällen repräsentieren.

8.4.2 Abfalltransport mit LKW

Beim Transport von radioaktiven Abfällen auf der Straße wird abhängig von der Größe und dem Gewicht der Transporteinheiten angenommen, dass entweder eine oder zwei Transporteinheiten auf einem Sattelzug befördert werden.

Bei einigen zylindrischen Abfallgebinden kann es bei entsprechend hoher Ausschöpfung der Aktivitätsgrenzwerte gemäß Endlagerungsbedingungen Konrad /BFS 95/ zur Beladung von Tauschpaletten mit nur einem Gebinde kommen, so dass es zu Abweichungen von der obigen Zuordnung kommen kann. Sensitivitätsstudien zur Beladekonfiguration haben jedoch gezeigt, dass solche Abweichungen nur geringe Auswirkungen auf das Transportunfallrisiko insgesamt haben, so dass die gemäß Tab. 8.8 gewählten Annahmen ausreichend sind.

Zur Simulation von Beladungen von LKW, von Unfallbelastungen und daraus resultierenden Quelltermen ist das Verfahren analog zum Verfahren beim Güterzugverkehr, mit der Vereinfachung, dass jeweils nur ein beladenes Fahrzeug vom Unfall betroffen ist. Auch hier werden ca. 30 000 Quellterme generiert, die das Spektrum möglicher Freisetzungen bei LKW-Unfällen überdecken.

Tab. 8.8 Anzahl von Transporteinheiten pro LKW in Abhängigkeit vom Behältertyp

Nr.	Bezeichnung	TE pro LKW
1	Betonbehälter Typ I	2
2	Betonbehälter Typ II	2
3	Gussbehälter Typ I	1
4	Gussbehälter Typ II	1
5	Gussbehälter Typ III	1
6	Container Typ I	2
7	Container Typ II	2
8	Container Typ III	2
9	Container Typ IV	1
10	Container Typ V	1
11	Container Typ VI	2

8.4.3 Übergabebahnhof Beddingen

Eine statistische Simulation möglicher Beladekonfigurationen eines bei einem Rangierunfall betroffenen Abfallwagens mit jeweils 2 Transporteinheiten und dabei auftretender Unfallbelastungen erfolgt hier analog zum Szenarium 100 % Schienentransport. Dabei werden die bedingten Wahrscheinlichkeiten für Unfallbelastungen (hier nur BK 1, BK 2, BK 3) bei Rangierunfällen gemäß Tab. 8.6 herangezogen. Auf Grund der beim Rangierbetrieb gegenüber dem normalen Güterzugverkehr geringeren Wahrscheinlichkeit von mehr als einem betroffenen Abfallwagen pro Unfall (siehe Abschnitt 8.3.2) erfolgt die Unfallsimulation nur für einzelne Abfallwagen. Diese Vereinfachung beeinflusst die resultierende Häufigkeitsverteilung der Aktivitätsstatistik nur unwesentlich, da Unfälle mit hohen Freisetzungsmengen vor allem von Einzelbinden mit hoher Aktivität hervorgerufen werden und weniger von einer Überlagerung mehrerer betroffener Abfallwagen. Insgesamt werden so ca. 10 000 Quellterme vom Unfallsimulationsprogramm generiert, die das Spektrum möglicher Freisetzungen bei Rangierunfällen erfassen.

8.4.4 Bildung von Quelltermgruppen

Ein vom Unfallsimulationsprogramm erzeugter Quellterm gibt die bei der simulierten Unfallkonfiguration freigesetzten Aktivitäten einzelner Radionuklide an. Diese radionu-

klidspezifischen Aktivitäten bestimmen sich aus dem Aktivitätsinhalt der vom Unfall betroffenen Abfallgebinde und dem Anteil, der davon gemäß Tab. 8.2 und Tab. 8.3 bei der jeweiligen Unfallbelastung (Belastungsklasse) und Abfallgebindegruppe als luftgetragen freigesetzt angenommen wird. Dabei werden entsprechend Abschnitt 8.2.2 vier Partikelgrößenbereiche des aerodynamisch äquivalenten Partikeldurchmessers unterschieden (0 - 10 µm, 10 - 20 µm, 20 - 50 µm, 50 - 100 µm), auf die sich die freigesetzten Aktivitäten einzelner Radionuklide aufteilen, so dass ein Quellterm aus vier Anteilen besteht. Für die anschließenden Analysen möglicher radiologischer Unfallfolgen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sind den Quelltermen als zusätzliche Angaben zugeordnet:

- die Belastungsklasse (BK = 1, 2, ..., 9),
- die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit (Unfall vorausgesetzt) und
- eine aus dem Quellterm berechnete radiologische Bewertungszahl, die eine näherungsweise relative Einstufung verschiedener Quellterme bezüglich der Höhe potentieller Strahlenexpositionen ermöglicht.

Die radiologische Bewertungszahl eines Quellterms berechnet sich als Summe der mit nuklidspezifischen Wichtungsfaktoren multiplizierten Aktivitäten der verschiedenen Radionuklide. Die verwendeten Wichtungsfaktoren basieren auf den Störfallanalysen für das Endlager Konrad, die auch in die Aktivitätsgrenzwerte der Endlagerbedingungen eingeflossen sind /BFS 95/. Sie berücksichtigen die für Störfälle berechnete effektive Gesamtdosis aus den Expositionspfaden Ingestion, Inhalation, Bodenstrahlung und Submersion und sind damit ein hinreichend gutes Maß für die relative radiologische Bedeutung der einzelnen Radionuklide in Hinblick auf die auch in dieser Studie betrachtete effektive Dosis. Die nicht spezifizierten α -Strahler bzw. β/γ -Strahler werden an dieser Stelle wie auch bei der Berechnung der radiologischen Konsequenzen in Abschnitt 8.6 konservativ durch die Radionuklide Pu-239 bzw. Cs-137 abgebildet.

Die große Zahl simulierter Quellterme macht für die weiterführenden Rechnungen eine Zusammenfassung in eine begrenzte Zahl repräsentativer Quellterme erforderlich, die hier als Freisetzungsklassen bezeichnet werden. Diese Zusammenfassung von Quelltermen zu repräsentativen Freisetzungsklassen erfolgt jeweils getrennt für jedes untersuchte Beförderungsszenarium (100 % Schiene, 100 % Straße, 80 % Schiene / 20 % Straße).

Dazu werden – getrennt nach rein mechanischen und kombiniert mechanisch-thermischen Belastungsklassen – die Quellterme zunächst nach aufsteigender radiologischer Bewertungszahl sortiert. Anschließend werden für beide Typen von Belastungsklassen Quelltermgruppen gebildet, indem Quellterme von annähernd gleicher radiologischer Bedeutung zusammengefasst werden. Unter Berücksichtigung der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Quellterme einer Quelltermgruppe wird dann ein gemittelter repräsentativer Quellterm gebildet – eine sog. Freisetzungsklasse. Unfälle ohne Freisetzung werden separat zusammen mit ihrer bedingten Wahrscheinlichkeit erfasst und nicht in die Bildung von Freisetzungsklassen einbezogen.

Für die Zusammenfassung von Quelltermen zu Quelltermgruppen werden zunächst die Wahrscheinlichkeiten vorgegeben, die die einzelnen Quelltermgruppen an der Summenwahrscheinlichkeit aller Unfälle mit Freisetzung haben sollen. Dabei werden die Werte der Gruppenwahrscheinlichkeit gemäß nachfolgender Tab. 8.9 so abgestuft, dass gerade bei der Zusammenfassung von Quelltermen mit hohen radiologischen Bewertungszahlen die innerhalb einer Quelltermgruppe zusammengefassten Quellterme keine große Bandbreite der radiologischen Bewertungszahl aufweisen. Dadurch soll bei der weiteren Erfassung einer Quelltermgruppe durch einen stellvertretenden repräsentativen Quellterm (Freisetzungsklasse) erreicht werden, dass diese Repräsentativität insbesondere bei Quelltermen, mit denen höhere Strahlenexpositionen verbunden sind, sichergestellt ist.

Tab. 8.9 Vorgegebene Wahrscheinlichkeitsintervalle für die Bildung von Quelltermgruppen

Quelltermgruppe	Gruppenwahrscheinlichkeit P_{FK}	
	Intervall	kumulativ
1	0,50000	0,50000
2	0,30000	0,80000
3	0,10000	0,90000
4	0,05000	0,95000
5	0,03000	0,98000
6	0,01000	0,99000
7	0,00900	0,99900
8	0,00090	0,99990
9	0,00009	0,99999
10	0,00001	1,00000

Die Berechnung des Repräsentanten (der Freisetzungsklasse) einer Quelltermgruppe erfolgt durch gewichtete Summierung der enthaltenen Quellterme entsprechend der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit eines jeden Quellterms. Damit erhalten sowohl Quellterme mit hohem Aktivitätsinventar als auch solche mit hoher bedingter Eintrittswahrscheinlichkeit einen entsprechend hohen Anteil an der Radionuklidzusammensetzung und -aktivität der so gebildeten Freisetzungsklasse.

8.4.5 Freisetzungsklassen

Die Simulationen möglicher Transportunfälle bei den Abfalltransporten zum Endlager Konrad führen nach geeigneter Zusammenfassung einer Vielzahl von Quelltermen zu Freisetzungsklassen, die bezüglich der Radionuklidzusammensetzung und der freigesetzten Aktivitäten einzelner Radionuklide für die Berechnung radiologischer Auswirkungen repräsentativ sind. Für Unfälle beim alleinigen Transport mit Güterzügen bzw. nur mit LKW sind jeweils 20 solcher Freisetzungsklassen vom Unfallsimulationsprogramm erzeugt worden. Dabei resultieren jeweils die Freisetzungsklassen 1 bis 10 aus Unfällen mit rein mechanischer Einwirkung auf Transporteinheiten, die Freisetzungsklassen 11 bis 20 aus Unfällen mit mechanischer Einwirkung und nachfolgendem Brand. Diese Freisetzungsklassen dienen zur Definition der Freisetzungen für die Berechnung der radiologischen Konsequenzen (siehe Abschnitt 8.6).

Beim 80/20-Szenarium wurden separate Berechnungen für jeden Verkehrsträger durchgeführt und erst die resultierenden radiologischen Konsequenzen kombiniert (Abschnitt 8.6.4). Ergänzend sind mit der Annahme 100 % Abfallbeförderung auf der Schiene für die Rangiervorgänge auf dem Übergabebahnhof Beddingen zu Orientierung auch abschätzende Simulationen möglicher Unfallereignisse durchgeführt worden.

100 % Schienentransport:

Abb. 8.6 zeigt für die 20 Freisetzungsklassen (FK 1 bis FK 20) die freigesetzte Aktivität der Radionuklide Co-60, Sr-90, Cs-137, Pu-238 und Am-241, die für Güterzugunfälle repräsentativ sind, sofern man hypothetisch eine vollständige Beförderung auf der Schiene unterstellt. Die Auswahl der in Abb. 8.6 aufgeführten Radionuklide berücksichtigt in erster Linie, dass diese Radionuklide wegen ihres Aktivitätsinhaltes in den Abfällen und ihrer radiologischen Bedeutung die potenzielle Strahlenexposition in Folge ei-

nes Unfalls wesentlich bestimmen (siehe Abschnitt 8.6). Pu-238 wurde ergänzend aufgenommen, um eine weitgehende Vergleichbarkeit mit den Freisetzungsklassen der Transportstudie von 1991 /GRS 91/ zu gewährleisten. Die Angaben zur freigesetzten Aktivität beziehen sich dabei auf die insgesamt im Partikelgrößenbereich von 0 - 100 µm AED freigesetzte Aktivität der aufgeführten Radionuklide.

Man erkennt, dass sowohl bei den auf rein mechanische Unfallbelastungen (FK 1 bis FK 10) als auch bei den auf mechanisch-thermische Unfallbelastungen zurückgehenden Freisetzungsklassen (FK 11 bis FK 20) die freigesetzte Aktivität mit steigender Nummerierung überwiegend stark ansteigt (logarithmischer Maßstab). In den oberen Freisetzungsklassen ist dieser Anstieg bei einigen Nukliden nicht mehr erkennbar, was darauf hinweist, dass diese in Verbindung mit ihrer freigesetzten Aktivität in den oberen Freisetzungsklassen z. B. im Vergleich zu Co-60 eine geringere radiologische Relevanz haben und dementsprechend weniger Einfluss auf die Sortierung der Quellterme haben.

Neben den Freisetzungsklassen sind die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Freisetzungsklassen aufgeführt. Diese geben an, mit welcher relativen Häufigkeit die einzelnen Freisetzungsklassen auftreten – ein Güterzugunfall mit Freisetzung radioaktiver Stoffe vorausgesetzt. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten der 20 Freisetzungsklassen addieren sich folglich zu 1. Die niedrigste Freisetzungsklasse 1 (ohne Brand) mit lediglich $2,9 \cdot 10^4$ Bq Aktivitätsfreisetzung für Co-60 tritt beispielsweise mit etwa 39 % bedingter Wahrscheinlichkeit auf, während die maximale Co-60-Aktivitätsfreisetzung von $7,1 \cdot 10^{11}$ Bq in FK 19 bei einem Unfallereignis mit Freisetzung lediglich eine bedingte Wahrscheinlichkeit von $2,0 \cdot 10^{-5}$ hat. Gerade bei dem Aktivierungsprodukt Co-60 ist jedoch nochmals auf den hohen Grad der in diesen Freisetzungsklassen enthaltenen Konservativität hinzuweisen (vgl. Abschnitt 8.2.2).

Summiert über alle Radionuklide betragen die Aktivitätsfreisetzungen der mechanisch bedingten Freisetzungsklassen 1 - 10 zwischen $6,3 \cdot 10^5$ Bq und $1,3 \cdot 10^9$ Bq und bei den Freisetzungsklassen 11 - 20 mit Brand zwischen $6,4 \cdot 10^9$ Bq und $3,2 \cdot 10^{12}$ Bq. Die vor allem bei den Freisetzungsklassen mit Brand erkennbare Differenz der genannten Gesamtaktivitäten zu den in Abb. 8.6 dargestellten Aktivitätsbeiträgen ausgewählter Radionuklide ist in erster Linie auf Freisetzungen des leichter flüchtigen Radionuklids H-3 zurückzuführen, das jedoch gegenüber den in Abb. 8.6 aufgeführten Radionukliden trotz der höheren Aktivitätsmengen eine untergeordnete Rolle für die radiologischen Konsequenzen spielt.

Die absoluten Eintrittshäufigkeiten dieser Freisetzungsklassen berechnen sich aus der Häufigkeit eines Unfalls mit Freisetzung radioaktiver Stoffe multipliziert mit der bedingten Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Freisetzungsklasse. Die resultierenden absoluten Häufigkeiten für die einzelnen Freisetzungsklassen werden in Abschnitt 8.5.5 im Anschluss an die folgende Berechnung der Unfallhäufigkeiten bestimmt.

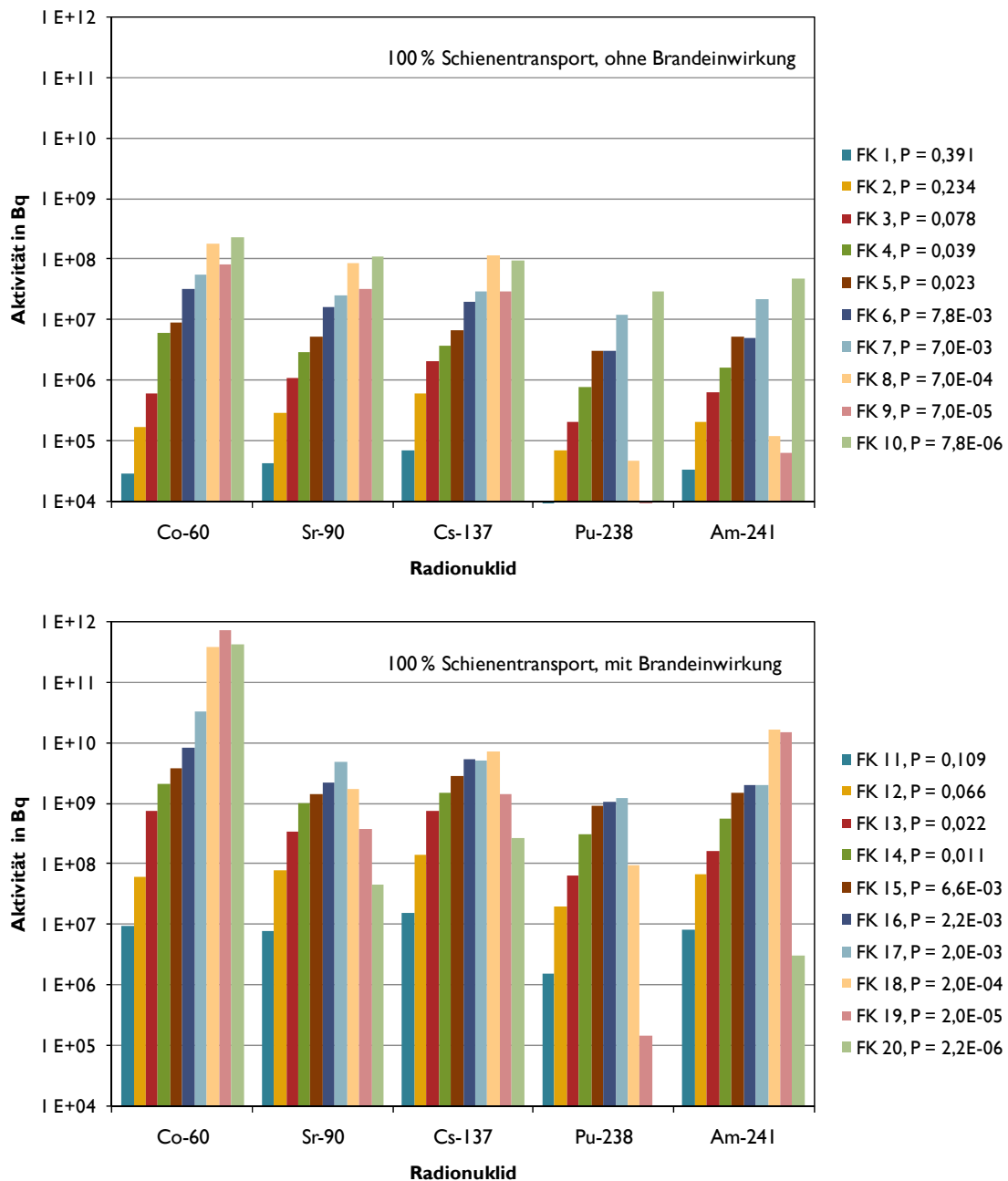


Abb. 8.6 Freisetzungsklassen für ausgewählte Radionuklide bei 100 % Schienentransport mit zugehörigen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten

100 % Straßentransport:

Abb. 8.7 zeigt für die 20 Freisetzungsklassen (FK 1 bis FK 20) die freigesetzte Aktivität der ausgewählten Radionuklide Co-60, Sr-90, Cs-137, Pu-238 und Am-241, die für Straßentransportunfälle repräsentativ ist, wenn man hypothetisch eine vollständige Abfallbeförderung auf der Straße unterstellt. Man erkennt im Vergleich zu den Freisetzungsklassen bei Schienentransport, dass die freigesetzten Aktivitäten insgesamt niedriger sind. Dies ist unter anderem auf die meist niedrigere Anzahl betroffener Abfallgebinde beim LKW-Transport zurückzuführen. Allerdings wirkt sich dieser Effekt nur begrenzt aus, da die Aktivitätsfreisetzung bei Unfällen mit mehreren beteiligten Abfallgebänden auf Grund des breiten Spektrums von Gebindeaktivitäten (vgl. Abschnitt 5.2) meist von einem oder wenigen Gebinden dominiert wird. Daneben ist zu erkennen, dass die bedingte Wahrscheinlichkeit von Freisetzungen in Folge von Brandeinwirkung niedriger ist als beim Schienentransport.

Summiert über alle Radionuklide betragen die Aktivitätsfreisetzungen der mechanisch bedingten Freisetzungsklassen 1 - 10 zwischen $8,8 \cdot 10^4$ Bq und $1,1 \cdot 10^9$ Bq und bei den Freisetzungsklassen 11 - 20 mit Brand zwischen $1,2 \cdot 10^9$ Bq und $8,4 \cdot 10^{12}$ Bq. Hierbei ist zu bedenken, dass die bedingte Freisetzungswahrscheinlichkeit der niedrigsten Freisetzungsklasse bei knapp 50 % liegt, während die Freisetzungsklasse 20 zwar eine um Größenordnungen höhere Aktivitätsfreisetzung enthält, jedoch im Fall eines Unfalls mit Freisetzung mit einer bedingten Wahrscheinlichkeit von $2,2 \cdot 10^{-6}$ sehr unwahrscheinlich ist. Wie unwahrscheinlich dieser Fall absolut ist, wird nach der Berechnung der Unfallhäufigkeiten in Tab. 8.11 ausgewiesen.

Die deutliche Differenz der genannten Gesamtaktivitäten zu den in Abb. 8.6 aufgeführten Aktivitäten ist wie beim Szenarium für 100 % Schienentransport in erster Linie auf Freisetzungen des leichter flüchtigen aber radiologisch weniger relevanten Radionuklids H-3 zurückzuführen.

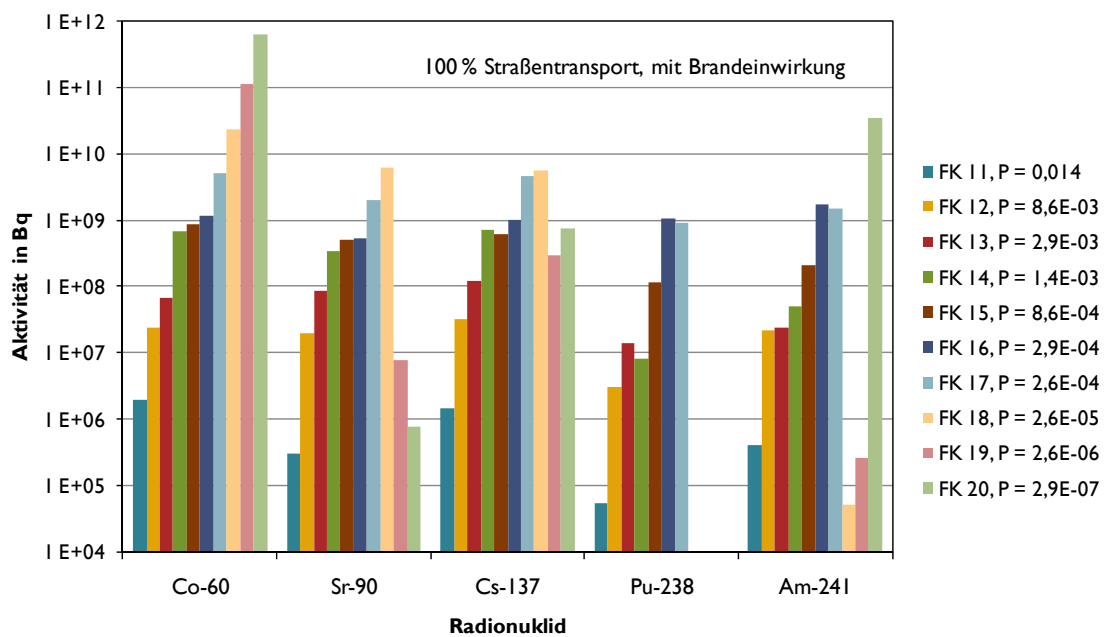
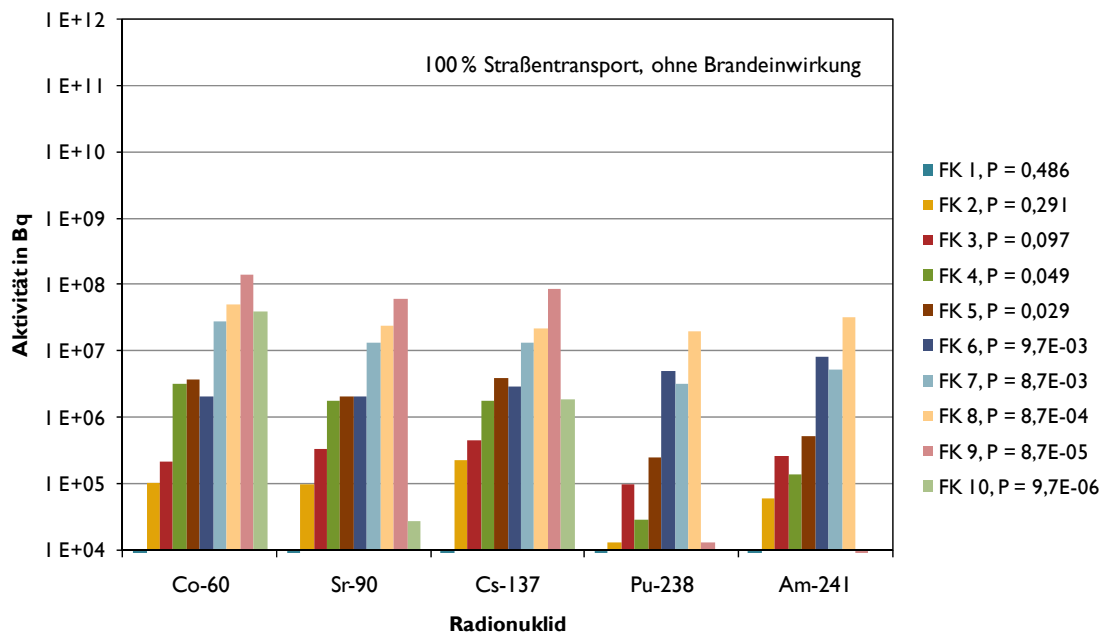


Abb. 8.7 Freisetzungsklassen für ausgewählte Radionuklide bei 100 % Straßentransport mit zugehörigen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten

80 % Schienentransport und 20 % Straßentransport:

Die Freisetzungsklassen für dieses gemischte, als realistisch angesehene Beförderungsszenarium werden analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise separat für beide Verkehrsträger bestimmt. Auf Grund der für jeden Referenzabfall individuell durchgeführten Zuordnung zu einem Verkehrsträger (siehe Abschnitt 8.5.3) ergeben sich hierbei kleinere Verschiebungen gegenüber den in Abb. 8.6 und Abb. 8.7 dargestellten Freisetzungsklassen, in denen jeweils immer alle Referenzabfälle enthalten sind. Für beide Sätze von Freisetzungsklassen werden zunächst eigene radiologische Konsequenzanalysen durchgeführt, die anschließend mit den jeweiligen Anteilen am Unfallgeschehen des Gesamtszenariums gewichtet werden (Abschnitt 8.6).

Übergabebahnhof Beddingen:

Um auch mögliche Freisetzungen bei Rangierunfällen im Übergabebahnhof Beddingen im Hinblick auf ihren Anteil am Transportunfallrisiko abschätzen zu können, wurden die durch das Unfallsimulationsprogramm erzeugten ca. 10 000 Quellterme in der beschriebenen Weise durch 20 Freisetzungsklassen und deren bedingte Wahrscheinlichkeiten repräsentativ erfasst. Abb. 8.8 zeigt zur Illustration die freigesetzten Aktivitäten der ausgewählten, radiologisch wichtigen Radionuklide. Ebenfalls aufgeführt sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Freisetzungsklassen – ein Unfall mit Freisetzung vorausgesetzt.

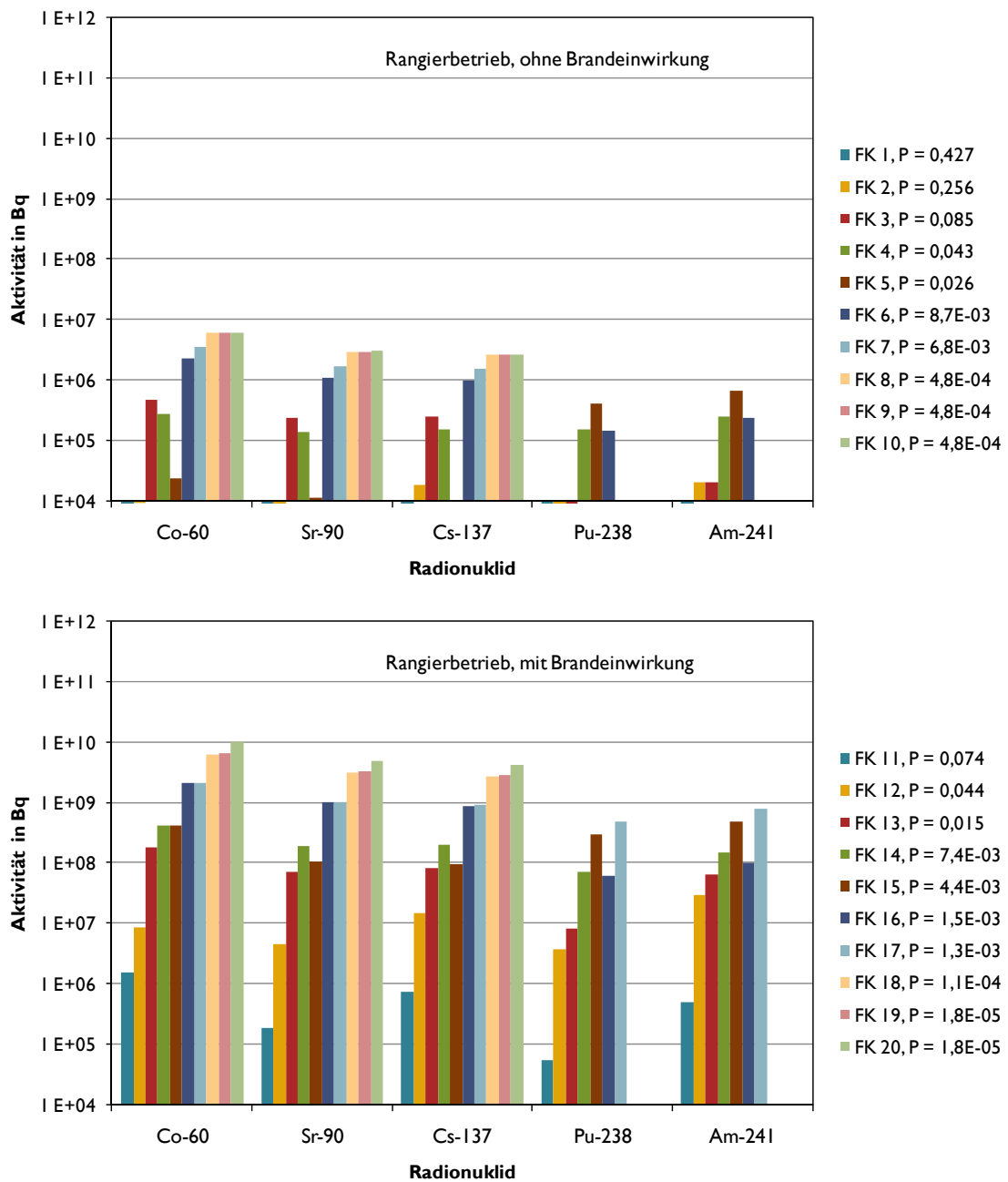


Abb. 8.8 Freisetzungsklassen für ausgewählte Radionuklide bei Rangierbetrieb (100 % Schienentransport) mit zugehörigen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten

Erwartungsgemäß zeigt ein Vergleich der freigesetzten Aktivitäten bei Rangierunfällen, wie in Abb. 8.8 dargestellt, mit den entsprechenden Abbildungen für die hypothetischen Szenarien 100 % Schienentransport (Abb. 8.6) und 100 % Straßentransport (Abb. 8.7), dass freigesetzte Aktivitäten bei Rangierunfällen niedriger liegen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die höheren Belastungsklassen, denen Aufprallgeschwindigkeiten im Bereich 35 bis 80 km/h bzw. 80 km/h bis 110 km/h zugeordnet werden, bei Rangierunfällen nicht auftreten. Dieser Unterschied in den freigesetzten Aktivitätsmengen und damit in der radiologischen Bedeutung der Freisetzungsklassen wird besonders augenfällig, wenn man beispielsweise die höheren Freisetzungsklassen bei Rangierunfällen mit den höheren Freisetzungsklassen für das hypothetische Szenario 100 % Straßentransport vergleicht. Diese mit sehr viel geringerer bedingter Wahrscheinlichkeit auftretenden Freisetzungsklassen werden überwiegend durch Unfallereignisse bestimmt, bei denen höhere Freisetzungsteile der hohen Belastungsklassen und betroffene Abfallbehälter mit hohen Aktivitätsinventaren zusammen kommen.

8.5 Unfallhäufigkeiten mit Freisetzung

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Simulation von Fahrzeugbelastungen mit Transporteinheiten und von möglichen Unfallbelastungen mit resultierenden Quelltermen bzw. geeignet zusammengefassten Freisetzungsklassen setzt immer voraus, dass es zu einem Unfall mit mindestens einem betroffenen LKW bzw. Abfallwagen kommt. Um aus den zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeiten der Freisetzungsklassen absolute Häufigkeiten ableiten zu können und in Verbindung mit berechneten potenziellen Konsequenzen ein Risiko bestimmen zu können, müssen zusätzlich die zugehörigen Unfallhäufigkeiten berechnet werden. Dieser Schritt erfolgt in den folgenden Abschnitten separat für jedes betrachtete Beförderungsszenarium. Am Ende erfolgt eine tabellarische Zusammenfassung für alle drei betrachteten Szenarien.

8.5.1 100 % Schienentransport

Es ist die Häufigkeit zu bestimmen, mit der in der Endlagerregion bei Beförderung des jährlichen Aufkommens von 2300 Transporteinheiten mit Güterzügen (hypothetisches Szenarium 100 % Schienentransport) mit Unfällen zu rechnen ist, bei denen es zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Abfallbehältern kommt. Diese Häufigkeit ist für einen Umkreis von 25 km um das geplante Endlager Konrad anzugeben. Der in Abb. 8.9 markierte Streckenabschnitt für Schienentransport innerhalb des betrachteten Umkreises beträgt etwa 35 km.

Wie in Abschnitt 8.4.1 behandelt, wäre unter den getroffenen Annahmen zur Abwicklung der Transporte bei 100 % Schienenbeförderung mit folgendem jährlichen Transportaufkommen in der Endlagerregion zu rechnen:

- 665 Regelgüterzüge mit im Mittel 40 Wagen,
- davon im Mittel 1,73 Abfallwagen im Zug (vgl. Abschnitt 8.4.1).

Gemäß Abschnitt 8.3.1 ist im Güterzugverkehr mit einer Gesamtunfallhäufigkeit von 0,36 Zugunfällen pro eine Million Kilometer zu rechnen. Damit ist die Häufigkeit pro Jahr, mit der für 665 Güterzüge, die Abfallwagen mit sich führen, innerhalb des 25 km-Umkreises mit Zugunfällen zu rechnen ist:

$$665 \frac{\text{Züge}}{\text{a}} \cdot 35 \text{ km} \cdot 3,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Unfälle}}{\text{Zug km}} = 8,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Zugunfälle}}{\text{a}}$$

Unterstellt man also einen kontinuierlichen Betrieb des Endlagers, so wäre im Mittel einmal in ca. 120 Jahren damit zu rechnen, dass ein Güterzug, der Wagen mit radioaktiven Abfallgebinden mit sich führt, in einen Unfall verwickelt wird.

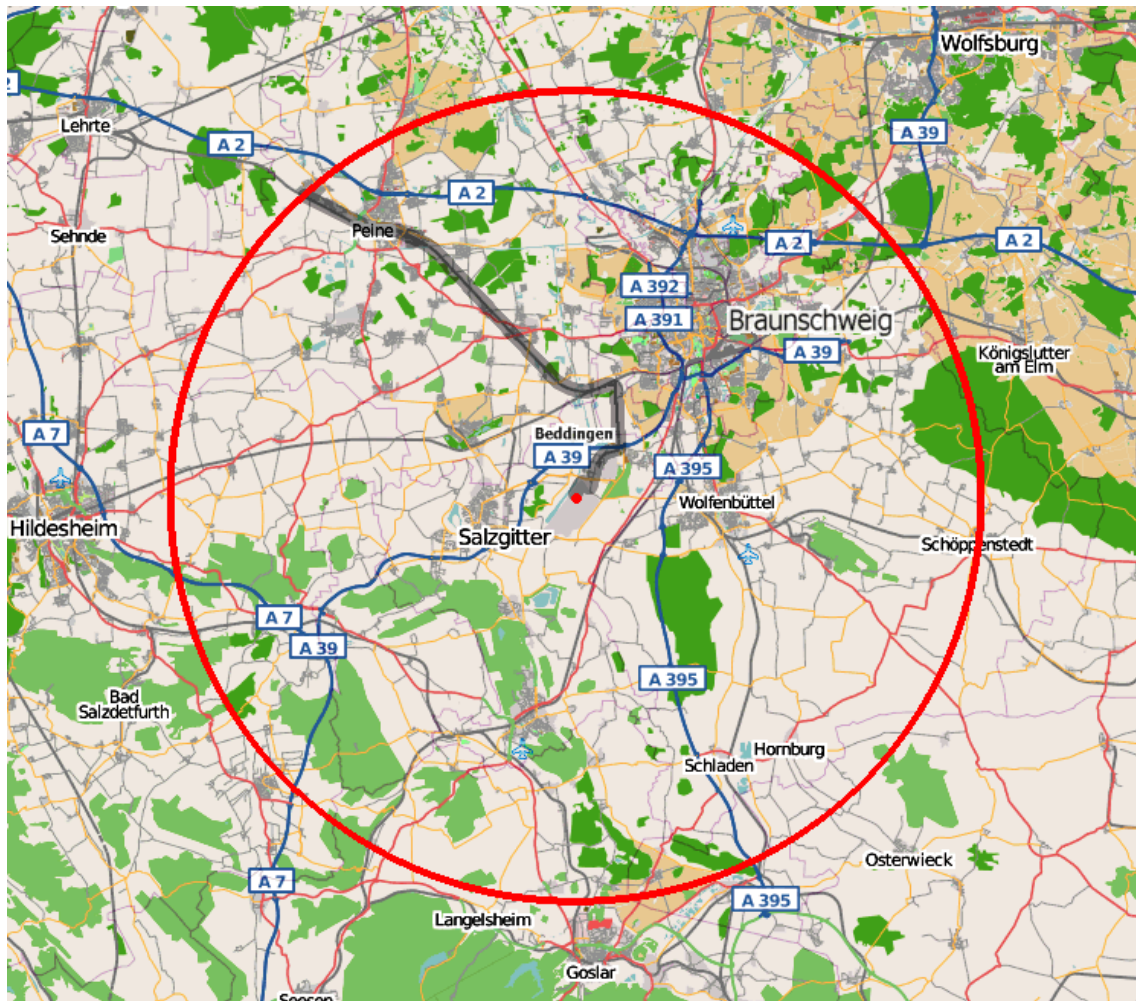


Abb. 8.9 Standortregion des Endlagers Konrad mit 25 km-Umkreis um den Standort (roter Punkt) und Streckenführung für Schienentransport (grau hervorgehoben, Quelle: OpenStreetMap)

Wie in Abschnitt 8.3.1 ausführlich behandelt, bedeutet ein Zugunfall nicht unbedingt, dass dabei auch Wagen eines bestimmten Merkmals – hier Abfallwagen – betroffen sind. Nur in einem Bruchteil von Zugunfällen werden auch ein oder mehrere der mitgeführten Abfallwagen betroffen sein. Mit den Unfalldaten von Tab. 8.5, der in Abb. 8.5 dargestellten Häufigkeitsverteilung für 1 bis 7 mitgeführte Abfallwagen und mit kombi-

natorischen Berechnungen zur Berücksichtigung dieses Abfallwagenanteils an den insgesamt 40 in einem Regelgüterzug enthaltenen Güterwagen /GRS 07/, errechnet sich, dass nur in 3,3 % aller Unfälle solcher Güterzüge ein oder auch mehrere Abfallwagen betroffen sind.

In Verbindung mit der obigen Unfallhäufigkeit für Regelgüterzüge mit mindestens einem Abfallwagen ergibt sich insgesamt eine entsprechende Unfallhäufigkeit mit mindestens einem vom Unfall betroffenen Abfallwagen von $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$. Die mittlere Zeitspanne für den Eintritt eines solchen Ereignisses (Eintrittsperiode) bei unterstelltem kontinuierlichem Betrieb beträgt demnach ca. 3600 Jahre.

Ist ein Abfallwagen von einem Unfall betroffen, so dass Abfallgebilde einer Unfallbelastung entsprechend einer der 9 Belastungsklassen unterworfen sind, so kommt es nicht in jedem Fall zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe. Anhand der in Tab. 8.2 und Tab. 8.3 zusammengestellten Daten zu den Freisetzungsteilen bei Unfallbelastungen ist ersichtlich, dass Beton- und Gussbehälter bei einigen der unteren Belastungsklassen den Unfalleinwirkungen standhalten, so dass keine Freisetzung radioaktiver Stoffe unterstellt wird. Das Unfallsimulationsprogramm errechnet für die angenommene Zusammensetzung des Abfallaufkommens, dass es in etwa 83 % aller Zugunfälle, bei denen mindestens ein Abfallwagen betroffen ist, zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt. Zusammen mit den obigen Zahlenangaben bedeutet dies, dass bei dem Szenarium mit 100 % Schienentransport mit einer Häufigkeit von $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1} \cdot 0,83 = 2,3 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr mit Zugunfällen zu rechnen ist, die mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe verbunden sind. Bei einem hypothetischen kontinuierlichen Betrieb des Endlagers wäre im Mittel alle ca. 4300 Jahre ein Zugunfall zu erwarten, bei dem es zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Abfallgebilden kommt. Dabei ist noch zu beachten, dass sowohl die freigesetzten Aktivitätsmengen als auch deren radiologische Bedeutung in weiten Grenzen variieren können.

8.5.2 100 % Straßentransport

Unterstellt man, dass die jährliche Menge von 2300 Transporteinheiten mit LKW befördert wird (hypothetisches Szenarium 100 % Straßentransport), so wäre mit einer jährlichen Anlieferung mit 1932 LKW zu rechnen. In dieser Zahl ist berücksichtigt, dass das erfasste Abfallgebindespektrum auf Grund von Gewichtsbeschränkungen in 68 % eine Beförderung nur einer einzelnen Transporteinheit pro LKW erwarten lässt, während 32 % zu zweit befördert werden können. Die längste anzunehmende Straßenrou-

te im betrachteten Untersuchungsgebiet bis zum Standort beträgt etwa 45 km (siehe Abb. 8.10). Hierbei wird angenommen, dass ein LKW in jedem Fall über eine Autobahn in den 25 km-Umkreis gelangt.

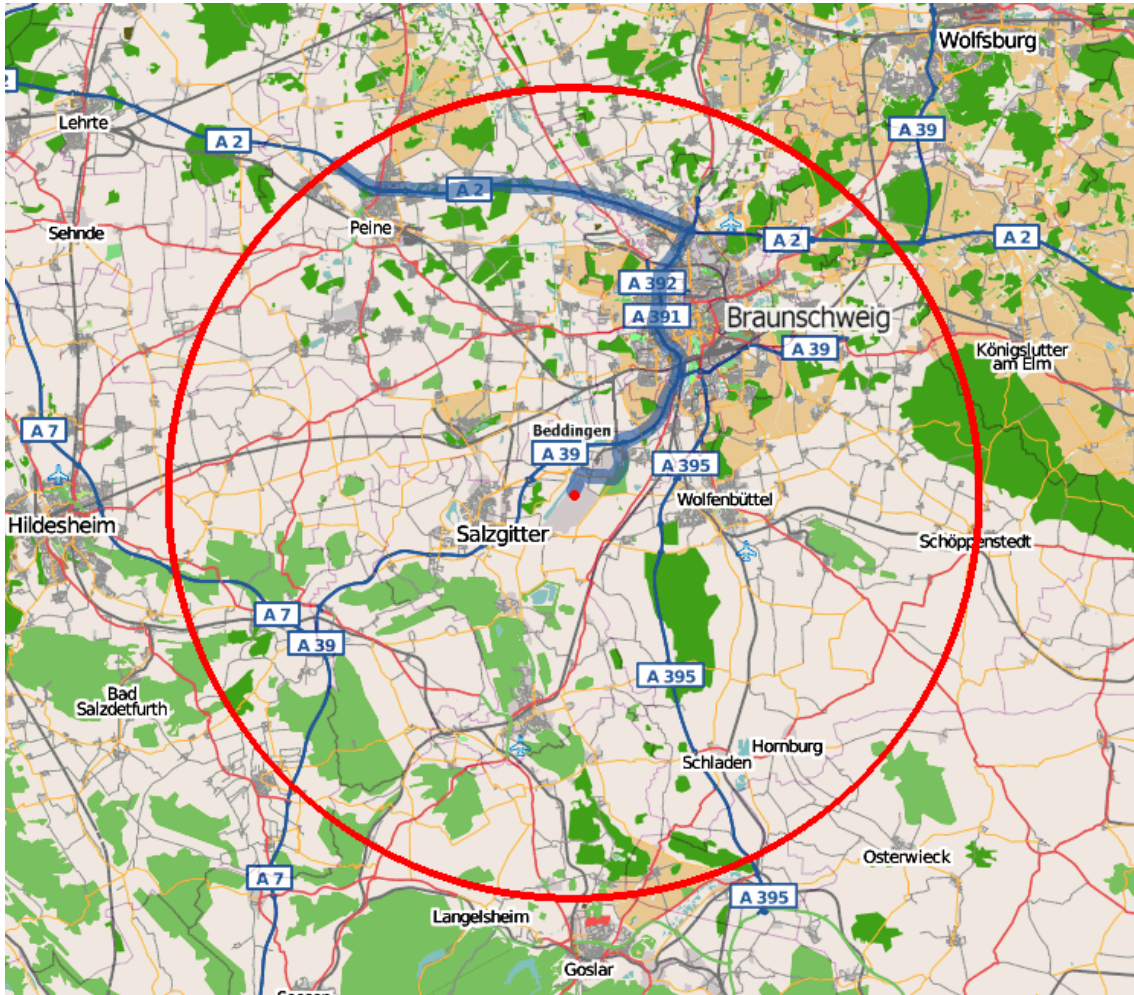


Abb. 8.10 Standortregion des Endlagers Konrad mit 25 km-Umkreis um den Standort (roter Punkt) und längster Streckenführung für Straßentransporte (blau hervorgehoben, Quelle: OpenStreetMap)

Gemäß Abschnitt 8.3.3 ist im Straßengüterverkehr mit einer Gesamtunfallhäufigkeit von 0,29 LKW-Unfällen pro eine Million Kilometer zu rechnen. Damit ist die Häufigkeit pro Jahr, mit der für 1932 mit Abfall beladene LKW innerhalb des 25 km-Umkreises mit Unfällen zu rechnen ist:

$$1932 \frac{\text{LKW}}{\text{a}} \cdot 45 \text{ km} \cdot 2,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Unfälle}}{\text{LKW km}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{LKW - Unfälle}}{\text{a}}$$

Bei einem unterstellten kontinuierlichen Betrieb des Endlagers würde demnach im Mittel alle 40 Jahre mit einem Unfall eines mit Abfall beladenen LKW im Untersuchungsgebiet zu rechnen sein. Berücksichtigt man zusätzlich, dass nach Auswertung des Unfallsimulationsprogramms auf Grund des Rückhaltevermögens einzelner Gebindetypen nur in 66 % der Unfälle mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe zu rechnen ist, so reduziert sich die Freisetzungshäufigkeit auf $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ a}^{-1} \cdot 0,66 = 1,7 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr. Die mittlere Zeitspanne für den Eintritt eines solchen Ereignisses erhöht sich entsprechend auf etwa 60 Jahre.

8.5.3 80 % Schienentransport / 20 % Straßentransport

Wie bereits in Abschnitt 6.1 erläutert, stellt eine Aufteilung der Abfallbeförderung in Bezug auf die Anzahl von Transporteinheiten auf etwa 80 % Schienentransport und 20 % Straßentransport das wahrscheinlichste Beförderungsszenarium dar. Für die Zuordnung der Referenzabfälle auf die beiden Verkehrsträger werden die vorläufigen Planungsdaten der einzelnen Ablieferer zum Anteil eines Schienentransportes bzw. Straßentransportes berücksichtigt. Dadurch weicht die Zusammensetzung des transportierten Gebindespektrums für jeden einzelnen Verkehrsträger etwas von den Szenarien 100 % Schiene bzw. 100 % Straße ab, während das Gebindespektrum des Szenariums insgesamt unverändert bleibt.

Analog zur Annahme für 100 % Schienenbeförderung (siehe Abschnitt 8.5.1) würde die anteilige jährliche Beförderungsmenge auf der Schiene von 1840 Transporteinheiten auf 46 Arbeitswochen verteilt zu 40 Transporteinheiten pro Woche und demnach 20 Abfallwagen pro Woche führen. Für den Transport von Seelze nach Beddingen stehen pro Woche 20 Regelgüterzüge an 4 Werktagen zur Verfügung. Zusätzlich zur in Abschnitt 8.4.1 angenommenen zufälligen Eingliederung von einzeln in Seelze ankommenden Abfallwagen in Regelgüterzüge wird im Sinne einer möglichst realistischen Betrachtung berücksichtigt, dass einzelne Abfallablieferungspflichtige mehrere Wagen gleichzeitig pro Tag in Richtung Seelze befördern lassen werden, wodurch eine vom Ablieferer abhängige zusätzliche Vorgruppierung von in Seelze ankommenden Wagen in die Berechnung einzubeziehen ist.

Die mit diesen Randbedingungen aus Monte-Carlo-Simulationen gewonnene Häufigkeitsverteilung der Abfallwagen ist in Abb. 8.11 dargestellt. Im Gegensatz zum Szenarium 100 % Schienentransport (Abb. 8.5) ergibt sich hierbei eine breitere Verteilung der

Anzahl von Abfallwagen pro Zug, so dass auch die Maximalzahl 7 gleichzeitig in Beddingen bzw. am Anlagengelände angelieferter Wagen mehrfach auftritt (2 - 3 Züge pro Jahr).

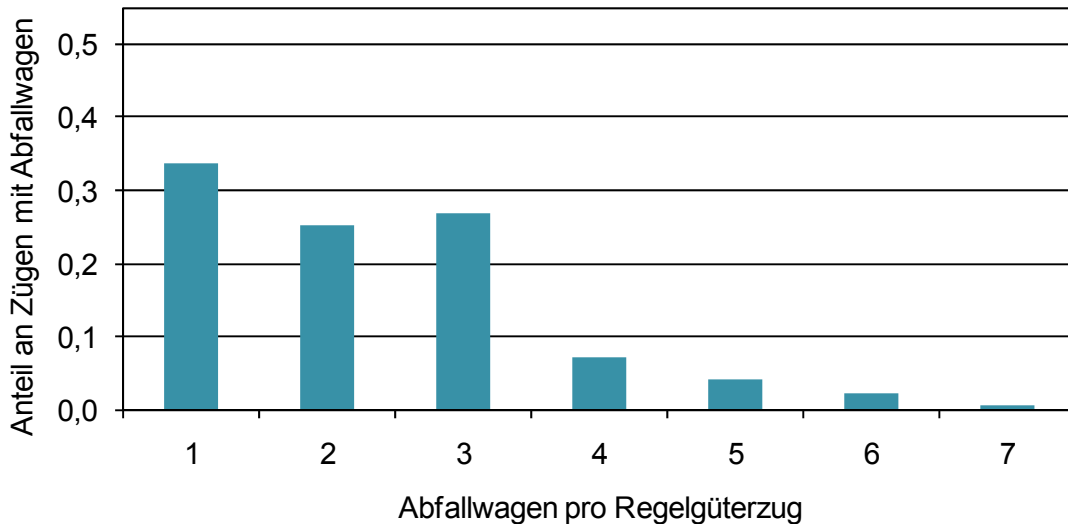


Abb. 8.11 Realistische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abfallwagenzahl in Regelgüterzügen mit mindestens einem Abfallwagen bei 80 % Schienentransport (Annahme: gruppenweise Ankunft in Seelze)

Aus der simulierten Häufigkeitsverteilung ergibt sich insgesamt ein jährliches Aufkommen von etwa 396 Regelgüterzügen mit mindestens einem und im Mittel 2,32 Abfallwagen. Die übrigen an den betrachteten Werktagen beförderten 524 Regelgüterzüge von Seelze nach Beddingen enthalten keine Wagen mit Abfällen.

Die resultierende Häufigkeit pro Jahr von Unfällen von Güterzügen, die Abfallwagen mit sich führen, innerhalb des 25 km-Umkreises ist demnach:

$$396 \frac{\text{Züge}}{\text{a}} \cdot 35 \text{ km} \cdot 3,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Unfälle}}{\text{Zug km}} = 5,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Zugunfälle}}{\text{a}}$$

Die mittlere Zeitspanne für den Eintritt eines solchen Ereignisses bei unterstelltem kontinuierlichem Betrieb beträgt entsprechend 200 Jahre.

Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Unfall ein Abfallwagen betroffen ist, beträgt 4,3 % und die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Unfall zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus mindestens einem Abfallbinde führen

kann, wird vom Unfallsimulationsmodell zu 82 % berechnet. Daraus ergibt sich eine Häufigkeit von Zugunfällen mit betroffenen Abfallwagen von $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1} \cdot 0,043 = 2,2 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr bzw. von Zugunfällen mit Freisetzungen radioaktiver Stoffe von $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1} \cdot 0,82 = 1,8 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr. Die zugehörigen Eintrittsperioden liegen entsprechend bei etwa 4500 Jahren bzw. 5500 Jahren.

Die übrigen 460 Transporteinheiten pro Jahr (20 % des Aufkommens) verteilen sich bei diesem Szenarium auf LKW-Transporte. Auf Grund der etwas vom Szenarium 100 % Straßentransport abweichenden Zusammensetzung des auf der Straße beförderten Gebindespektrums ergeben sich Anteile von 69 % einzeln und 31 % zu zweit auf einem LKW beförderter Transporteinheiten. Aus den damit resultierenden 389 LKW-Transporten pro Jahr ergibt sich folgende Unfallhäufigkeit für das Untersuchungsgebiet:

$$389 \frac{\text{LKW}}{\text{a}} \cdot 45 \text{ km} \cdot 2,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Unfälle}}{\text{LKW km}} = 5,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{LKW} - \text{Unfälle}}{\text{a}}$$

Bei einem unterstellten kontinuierlichen Betrieb des Endlagers würde demnach im Mittel etwa alle 200 Jahre mit einem Unfall eines mit Abfall beladenen LKW im Untersuchungsgebiet zu rechnen sein. Berücksichtigt man zusätzlich, dass nach Auswertung des Unfallsimulationsprogramms nur in 73 % der Unfälle mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe zu rechnen ist, so reduziert sich die Freisetzungshäufigkeit auf $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1} \cdot 0,73 = 3,7 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr. Die mittlere Zeitspanne für den Eintritt eines solchen Ereignisses erhöht sich entsprechend auf etwa 270 Jahre.

Kombiniert man beide Anteile dieses Beförderungsszenariums, so ergibt sich eine Unfallhäufigkeit für Züge oder LKW von $1,0 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr und eine Unfallhäufigkeit mit Freisetzung für Züge oder LKW von $3,9 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr. Dies bedeutet bei wiederum unterstelltem kontinuierlichem Betrieb des Endlagers eine mittlere Zeitspanne von 100 Jahren für das Eintreten eines Unfallereignisses und von etwa 260 Jahren für den Eintritt eines Unfallereignisses mit einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen innerhalb des 25 km Umkreises um den Standort.

8.5.4 Übergabebahnhof Beddingen

Eine obere Abschätzung für Unfälle beim Rangieren von Abfallwagen auf dem Übergabebahnhof Beddingen lässt sich mit folgenden ungünstigen Annahmen treffen:

- Alle Abfälle werden auf dem Schienenweg befördert. Dies entspricht dem hypothetischen Anlieferungsszenarium 100 % Schienentransport und bedeutet 1150 rangierte Abfallwagen pro Jahr.
- Es wird die sicher ungünstigere Unfallstatistik des früheren Rangierbahnhofes Braunschweig verwandt, der als einer der letzten größeren Rangierbahnhöfe in Deutschland als Gefällebahnhof betrieben wurde und allein schon dadurch unfallträchtiger war.
- Die Unfallhäufigkeit pro rangierten Güterwagen beträgt demnach $7,5 \cdot 10^{-6}$, d. h. auf 1 Million rangierter Güterwagen kommen 7,5 Unfälle mit Sachschaden oberhalb der Bagatellgrenze und mit einer Aufteilung gemäß Abschnitt 8.3.2 auf die definierten Belastungsklassen.

Damit berechnet sich die Unfallhäufigkeit zu:

$$1150 \frac{\text{Abfallwagen}}{a} \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Unfälle}}{\text{rangierte Wagen}} = 8,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Abfallwagen - Unfälle}}{a}$$

Gemäß der Unfallanalyse mit dem Simulationsprogramm kommt es in 55 % dieser Ereignisse zu einer Freisetzung aus betroffenen Abfallbehältern entsprechend einer Gesamthäufigkeit von

$$8,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Abfallwagen - Unfälle}}{a} \cdot 0,55 = 4,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Unfälle mit Freisetzung}}{a}$$

Das entspräche dem Erwartungswert von ca. 1 solchen Unfallereignis in einem Zeitraum von 200 Jahren, wenn man die hier aufgeführten ungünstigen Annahmen zugrunde legt und einen kontinuierlichen Betrieb des Endlagers unterstellt.

Ein Unterschied zu den in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Unfallhäufigkeiten für das wahrscheinliche 80/20-Szenarium und die beiden hypothetischen extremen Anlieferungsszenarien 100 % Schiene oder 100 % Straße besteht hierbei darin, dass sich die dort aufgeführten Unfallhäufigkeiten auf Transportwege innerhalb der 25 km Standortregion beziehen ohne dass eine weitere Lokalisierung möglich ist. Beim Rangierbahnhof ist demgegenüber der Ort eines Unfalls innerhalb der Standortregion durch die äußeren Abmessungen des betrachteten Rangierbahnhofes eingegrenzt.

8.5.5 Szenarienübersicht

Um die Ergebnisse der einzelnen Beförderungsszenarien besser vergleichen zu können, werden in der folgenden Tab. 8.10 die berechneten Häufigkeiten und die wesentlichen Szenarienparameter für alle betrachteten Szenarien zusammengefasst. Das im Gegensatz dazu nur abschätzend betrachtete Szenarium Rangierbetrieb wird hier wegen seiner nur lokalen Bedeutung nicht in die Zusammenstellung einbezogen. Ein entsprechender Vergleich findet jedoch im Hinblick auf die potenziellen Konsequenzen in Abschnitt 8.6.5 statt.

Tab. 8.10 Übersicht zu den Parametern und zugehörigen Unfall- und Freisetzungshäufigkeiten der drei untersuchten Beförderungsszenarien

hypothetisches Szenarium	100 % Schienen-transport	100 % Straßen-transport
Transporteinheiten pro Jahr	2300	2300
Transporte pro Jahr	665 Züge	1932 LKW
Transportstrecke	35 km	45 km
Unfallrate (Zug oder LKW)	$3,6 \cdot 10^{-7} \text{ km}^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-7} \text{ km}^{-1}$
Unfallhäufigkeit (Zug oder LKW)	$8,4 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2} \text{ a}^{-1}$
Unfallanteil mit betroffenem Abfall	3,3 %	100 %
Unfallhäufigkeit mit Abfall	$2,8 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2} \text{ a}^{-1}$
bedingte Wahrscheinlichkeit Freisetzung	83 %	66 %
Unfallhäufigkeit mit Freisetzung	$2,3 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-2} \text{ a}^{-1}$

realistisches Szenarium	80 % Schienen- und 20 % Straßentransport		
	80 % Schiene	20 % Straße	Kombination
Transporteinheiten pro Jahr	1840	460	2300
Transporte pro Jahr	396 Züge	389 LKW	785
Transportstrecke	35 km	45 km	-
Unfallrate (Zug oder LKW)	$3,6 \cdot 10^{-7} \text{ km}^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-7} \text{ km}^{-1}$	-
Unfallhäufigkeit (Zug oder LKW)	$5,0 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ a}^{-1}$
Unfallanteil mit betroffenem Abfall	4,3 %	100 %	-
Unfallhäufigkeit mit Abfall	$2,2 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$
bedingte Wahrsch. Freisetzung	82 %	73 %	-
Unfallhäufigkeit mit Freisetzung	$1,8 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$

Die erwartete Wahrscheinlichkeit einer unfallbedingten Freisetzung ist nach Tab. 8.10 bei Straßentransport deutlich höher als beim Schienentransport. Dies führt dazu, dass

beim als realistisch angesehenen gemischten Beförderungsszenarium (80 % Schiene und 20 % Straße) die Freisetzungshäufigkeit bei LKW-Unfällen trotz der geringeren Anzahl beförderter Transporteinheiten höher ist als die Freisetzungshäufigkeit beim Schienentransport.

Welche Eintrittshäufigkeiten der einzelnen Freisetzungsklassen aus den in Abschnitt 8.4.5 berechneten Freisetzungshäufigkeiten der Szenarien resultieren, kann aus Tab. 8.11 abgelesen werden. Es ist erkennbar, dass die radiologisch ungünstigsten Freisetzungsklassen durch ihre geringen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten in Kombination mit den zugehörigen Unfallhäufigkeiten eine verschwindend geringe Eintrittshäufigkeit haben. So hat beispielsweise die ungünstigste Freisetzungsklasse 20 beim Szenarium 100 % Straßentransport nur eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $4,5 \cdot 10^{-9}$ pro Jahr, was einer Eintrittsfrequenz von etwa 200 Millionen Jahren entspricht. Dies führt dazu, dass diese Freisetzungsklasse im Vergleich zu den um mehrere Größenordnungen häufigeren Freisetzungsklassen trotz der möglichen rechnerischen radiologischen Relevanz in Verbindung mit der zugehörigen Eintrittshäufigkeit nur einen sehr geringen Anteil zum Gesamtrisiko beiträgt.

Bei der Bewertung der in den Unfallsimulationen gewonnenen Freisetzungsklassen und zugehörigen Häufigkeiten ist zu beachten, dass mehrere Bestandteile der Analyse zum Unfallrisiko auf konservativen Annahmen beruhen, die nur durch noch aufwändigere Untersuchungen ausgeräumt werden könnten. Einzelne Bestandteile der Gesamtanalyse wie die Bestimmung der Freisetzungsteile bei mechanischen Einwirkungen (siehe Abschnitt 8.2.2) konnten in der vorliegenden Untersuchung gegenüber der 1991er Transportstudie /GRS 91/ bereits deutlich realistischer umgesetzt werden. Es ist dennoch davon auszugehen, dass die in Tab. 8.10 ausgewiesene bedingte Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe bei einem Unfall im Bereich von 66 % bis 83 % reale Verhältnisse weiterhin überschätzt. Dies ist in den überwiegend konservativen Annahmen der Auswertungsmethodik der Unfallstatistik (Abschnitt 8.3) und in der Berechnung der Freisetzungsteile begründet (v. a. durch thermische Einwirkung, Abschnitt 8.2.2)

Tab. 8.11 Erwartete Eintrittshäufigkeiten der Freisetzungsklassen im 25 km-Umkreis des Endlagers Konrad aufgrund von Transportunfällen

Freisetzungsklasse		100 % Schienen-transport [1/a]	100 % Straßen-transport [1/a]	Kombination	
				80 % Schiene [1/a]	20 % Straße [1/a]
mechanische Beaufschlagung	FK 1	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
	FK 2	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
	FK 3	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
	FK 4	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	FK 5	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
	FK 6	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
	FK 7	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
	FK 8	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
	FK 9	$8,1 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$
	FK 10	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$
mechanische Beaufschlagung mit Brand	FK 11	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
	FK 12	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
	FK 13	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
	FK 14	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
	FK 15	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$
	FK 16	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
	FK 17	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$
	FK 18	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
	FK 19	$7,4 \cdot 10^{-9}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$
	FK 20	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Summe		$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$

8.6 Radiologische Unfallfolgen

8.6.1 Berechnungsmethodik

Unfallbedingt in die Umgebung freigesetzte Stoffe können in der Atmosphäre in Richtung des vorherrschenden Windes transportiert und dabei durch die turbulente Luftbewegung weiter verteilt werden. Damit können in Ausbreitungsrichtung während des Durchzuges der Schadstofffahne erhöhte bodennahe Schadstoffkonzentrationen einhergehen. Außerdem kann es durch trockene oder nasse Deposition (Regen) zu einer Ablagerung auf Bewuchs und anderen Flächen kommen. Hält sich eine Person in Bereichen auf, in denen während des atmosphärischen Transports der Schadstofffahne erhöhte bodennahe Konzentrationen auftreten, kommt es zu einer Schadstoffaufnahme mit der Atemluft. Je nach Schadstoff können weitere Belastungen im Verlauf der Zeit aus der abgelagerten Schadstoffkonzentration auf Bewuchs und anderen Flächen resultieren. Die während der Freisetzung vorherrschenden atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen wie Diffusionskategorie, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Niederschlagsintensität beeinflussen in erheblichem Maße die luftgetragenen und abgelagerten Schadstoffkonzentrationen.

Die Berechnung potenzieller radiologischer Unfallfolgen wie Kontamination auf Bewuchs oder Boden und Strahlenexpositionen von Personen erfolgte mit einer modifizierten Version des Unfallfolgenanalyseprogramms COSYMA, Version 95/1 NL (/EUR 90/, /HAS 95/), das im Wesentlichen auf dem im damaligen Kernforschungszentrum Karlsruhe (heute Forschungszentrum Karlsruhe, FZK) entwickelten Unfallfolgenprogramm UFOMOD /EHR 88/ aufbaut. Bei COSYMA handelt es sich um ein umfassendes Programmsystem zur probabilistischen Unfallfolgenanalyse, mit dem – ausgehend von einem Quellterm freigesetzter luftgetragener Radionuklide – der Transport der Radionuklidwolke sowie ihre Vermischung durch turbulente Diffusion und damit die Verdünnung beschrieben wird. Der atmosphärische Transport und die Ablagerung der Radionuklide wird in der COSYMA-Version 95/1 mit dem Gauß-artigen Ausbreitungsmodell MUSEMET (Volumenquellenmodell, /VOG 81/, /PSE 85a/) berechnet. Auf der Grundlage der resultierenden räumlichen Verteilungen der bodennahen Radionuklidkonzentration sowie der abgelagerten Radionuklide wird die Strahlenexposition ortsabhängig bestimmt. In COSYMA werden für einen vorgegebenen Quellterm Ausbreitungsrechnungen für maximal insgesamt 144 Wettersequenzen durchgeführt. Diese Wettersequenzen wurden per Monte-Carlo-Verfahren jeweils aus 144 Klassen ausge-

wählt, die nach Windrichtung, Transportzeit der Wolke und Niederschlagsrate eingeteilt wurden. Jeder Klasse ist eine Häufigkeit zugeordnet, die charakteristisch für die am Standort Konrad vorherrschenden meteorologischen Bedingungen ist. Auf dieser Grundlage berechnet COSYMA in einem Polarkoordinatensystem für ausgewählte Aufpunkte in der Umgebung des Freisetzungsortes Häufigkeitsverteilungen für die resultierenden Strahlenexpositionen mit einem deterministischen Dosismodell.

Mit dem Ausbreitungsmodell MUSEMET in COSYMA kann die atmosphärische Ausbreitung in ebenem Gelände berechnet werden. Instationäre meteorologische Bedingungen, d. h. Änderungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, des Turbulenzzustandes der Atmosphäre sowie der Niederschlagsrate mit der Zeit werden berücksichtigt.

Die für MUSEMET in COSYMA zur Verfügung stehenden Ausbreitungsparametersätze sind allerdings für die im Rahmen der Transportrisikostudie zu unterstellenden Randbedingungen (u. a. niedrige Freisetzungshöhe bei moderaten Rauigkeitsverhältnissen sowie kurze Freisetzungsdauer) nur bedingt geeignet. Darüber hinaus können mit dem Gauß-Ansatz in MUSEMET das gravitative Absinken und die Deposition von Aerosolen für Partikeldurchmesser bis zu 100 µm nur sehr eingeschränkt berücksichtigt werden.

Aus diesem Grunde wurde das Ausbreitungsmodul von COSYMA um die Möglichkeit erweitert, statt MUSEMET ein modernes Lagrange-Partikelsimulationsmodell (GRS-Version des Modells LASAT[®] /JAN 98a/, /JAN 98b/, /JAN 00/), zu verwenden.

Bei der Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung mit einem Lagrange-Partikelmodell werden unter Berücksichtigung der statistischen Natur der turbulenten Diffusion die einzelnen Trajektorien einer Vielzahl von Simulationspartikeln während des Ausbreitungsvorganges verfolgt. Die zur Berechnung der Partikeltrajektorien erforderlichen Turbulenzgrößen müssen aus den für den Standort Konrad zur Verfügung stehenden meteorologischen Daten Windgeschwindigkeit und Diffusionskategorie sowie der für den Standort spezifischen Rauigkeitslänge abgeleitet werden. Die Rauigkeitslänge ist ein Maß für die Unebenheit der Erdoberfläche und beträgt in der Umgebung des Standortes Konrad im Mittel etwa 0,5 m. Die Diffusionskategorie kennzeichnet den Turbulenzzustand und damit die Verdünnungsfähigkeit der Atmosphäre. In Anlehnung an Pasquill wird der Turbulenzzustand in die sechs Klassen A bis F eingeteilt. Dabei beschreibt die Diffusionskategorie A sehr labile, hochoberflächige Bedin-

gungen in der Atmosphäre, während die Kategorie F sehr stabilen, turbulenzschwachen Verhältnissen entspricht.

Viele der mit der Schadstoffausbreitung verbundenen Phänomene können mit dem Partikelmodell auf einfache Weise physikalisch nachgebildet werden (z. B. variable Quellstärke, unterschiedliche Quellgeometrieformen, Fahnenaufstieg bei Freisetzungen mit Brand, bodennahe Freisetzungen, gravitatives Absinken von Aerosolpartikeln in der Fahne, trockene und nasse Ablagerung (Regen), radioaktiver Zerfall).

Für den Betrieb von LASAT[®] ist eine geeignete Parametrisierung der meteorologischen Felder in der bodennahen Atmosphäre vorzugeben. Damit ist die mathematische Beschreibung der für den Transport einer radioaktiven Wolke verantwortlichen mittleren Windgeschwindigkeit und der für die diffusive Ausdehnung der Wolke verantwortlichen Turbulenzfelder gemeint. Bei den mit COSYMA durchgeführten LASAT[®]-Ausbreitungsrechnungen wurde die in der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 8 /VDI 02/ dargestellte Parametrisierung der meteorologischen Felder verwendet. Die in dieser Richtlinie enthaltenen Formeln repräsentieren den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik einer Turbulenzparametrisierung der bodennahen Atmosphäre, in der die luftgetragene Ausbreitung von Radionukliden erfolgt. Diese Turbulenzparameter sind für Freisetzungszeiträume ausgelegt, die eine halbe Stunde oder länger andauern. Bei kürzer andauernden Freisetzungen muss eine entsprechende Anpassung der Turbulenzparameter vorgenommen werden.

Mit LASAT[®] kann grundsätzlich die Ausbreitung in der Atmosphäre unter Berücksichtigung topographischer Einflüsse berechnet werden. Bei den im Rahmen von COSYMA durchgeführten LASAT[®]-Rechnungen werden horizontal homogene Bedingungen angenommen, das heißt, es wird ebenes Gelände unterstellt und die meteorologischen Felder (Windgeschwindigkeit und Turbulenzfeld) variieren nur mit der Höhe. Diese Annahme ist am Standort Konrad näherungsweise gegeben. Allerdings stellen die in der Umgebung eines potenziellen Transportunfalls bestehenden Inhomogenitäten bezüglich der Geländeform und Landnutzung ebenso wie Gebäudestrukturen Elemente dar, die bei den hier betrachteten Aufpunktentfernungen ≥ 150 m die atmosphärische Turbulenz erhöhen, damit zu einer verstärkten Verdünnung luftgetragener radioaktiver Stoffe führen (/HAN 80/ und /HAN 82/) und folglich mit geringeren Strahlenexpositionen verbunden sind als bei Annahme horizontal homogener Bedingungen.

Mit dem in COSYMA implementierten Partikelmodell LASAT[®] ist es weiterhin möglich, in einem einzigen COSYMA-Lauf einen durch vier Partikelgrößenklassen charakterisierten Quellterm ($AED \leq 10 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m} < AED \leq 20 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m} < AED \leq 50 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m} < AED \leq 100 \mu\text{m}$) unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausbreitungs- und Depositionseigenschaften zu berechnen und aus den resultierenden räumlichen Verteilungen von Konzentration und Ablagerung die Strahlenexposition zu bestimmen.

Bei der Berechnung von Strahlenexpositionen werden folgende Expositionspfade berücksichtigt:

- γ -Submersion (Wolkenstrahlung),
- Bodenstrahlung,
- Inhalation (Aktivitätsaufnahme mit der Atemluft),
- Ingestion (Aktivitätsaufnahme mit der Nahrung),
- Resuspension (Wiederaufwirbelung von am Boden abgelagerten Radionukliden) mit nachfolgender Inhalation.

Die Submersion und Resuspension sind jedoch bei Transportunfällen mit Abfallgebinden im Allgemeinen von untergeordneter Bedeutung.

Bei den Berechnungen wurde die relative Häufigkeit der atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen des hier interessierenden Untersuchungsgebietes berücksichtigt. Dazu stehen Messdaten der meteorologischen Station am einziehenden Schacht (Schacht 1) des geplanten Endlagers Konrad für die Jahre 2002 bis 2006 zur Verfügung.

Die Messdaten wurden im Hinblick auf Vollständigkeit, Kontinuität und Plausibilität geprüft und ergänzt. Im Anschluss daran wurde aus den vorliegenden 10-Minutenmittelwerten eine fünfjährige Zeitreihe aus Stundenmittelwerten der folgenden meteorologischen Daten bestimmt: Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 20 m Höhe über Grund, Diffusionskategorie, Niederschlag und Mächtigkeit der bodennahen Grenzschicht, innerhalb der die atmosphärische Ausbreitung luftgetragener Radionuklide geschieht.

Abb. 8.12 zeigt die resultierende Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen in der Höhe 20 m über Grund, sowie von Diffusionskategorie und Niederschlag.

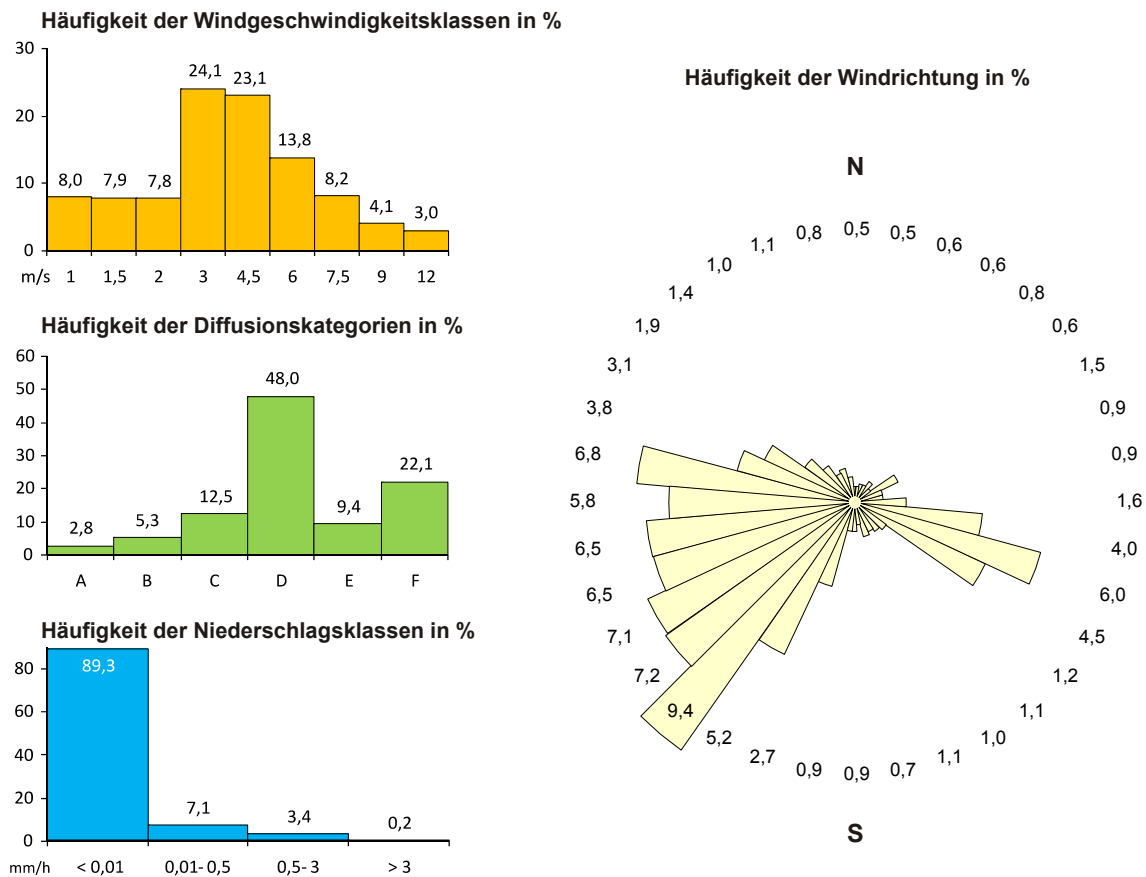


Abb. 8.12 Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Messhöhe 20 m über Grund) sowie der Diffusionskategorien und Regenintensität am Standort Konrad, Schacht 1, aus den Jahren 2002 bis 2006

Die Windgeschwindigkeitsklassen mit den repräsentativen Windgeschwindigkeiten 3 m/s und 4,5 m/s treten in mehr als 47 % aller Fälle am häufigsten auf. Die neutrale Diffusionskategorie D ist mit 48,0 % die häufigste Kategorie und die stark stabile Diffusionskategorie F tritt mit 22,1 % am zweithäufigsten auf. Neben der Hauptwindrichtung aus West bis Westsüdwest kommen auch Windrichtungen aus ost-südöstlichen Richtungen gehäuft vor. Diese durch häufige Westwindlagen geprägte Wetterstatistik ist typisch für Standorte in Norddeutschland.

Mit dem für jede Freisetzungsklasse bestimmten Quellterm sind mit dem Programmsystem COSYMA mögliche Strahlenexpositionen von Personen und die Kontamination von Bewuchs und Boden bis zu einer Entfernung von 25 km vom Freisetzungsort berechnet worden. Dabei sind jeweils folgende Festlegungen getroffen worden:

- Für die Freisetzungsklassen FK 1 bis FK 10, die jeweils für Transportunfälle mit rein mechanischer Belastung von Abfallgebinden repräsentativ sind, ist mit bodennaher Freisetzung gerechnet worden. Dabei wird angenommen, dass die im Rahmen des Transportunfalls freigesetzten luftgetragenen radioaktiven Stoffe beim Aufprall auf Grund der unfallbedingten Bewegungsvorgänge betroffener Abfallbehälter und der induzierten Luftverwirbelung kurzzeitig in einem Volumen von $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3 = 125 \text{ m}^3$ verteilt werden. Es wird angenommen, dass dieser Verwirbelungsvorgang innerhalb weniger Sekunden abgeschlossen ist. Bei einer derart kurzfristig freigesetzten Radionuklidwolke resultieren im Vergleich zu der für längere Freisetzungszeiträume (> 30 Minuten) gültigen Turbulenzparametrisierung nach /VDI 02/ geringere Fahnenbreiten mit höheren Maximalkonzentrationen und damit höheren Strahlenexpositionen. Deshalb wurde für Freisetzungen bei Transportunfällen mit rein mechanischer Belastung eine entsprechend verringerte Fahnenbreite verwendet.
- Für die Freisetzungsklassen FK 11 bis FK 20, denen mechanische Gebindebelastungen mit Brand zugrunde liegen, ist für die Berechnung der Schadstoffausbreitung mit einer durch den Auftrieb der heißen Brandgase verursachten effektiven Freisetzungshöhe von 50 m sowie einem würfelförmigen Anfangsvolumen von $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$ gerechnet worden. Dabei wurde unterstellt, dass sich der Freisetzungsvorgang über einen längeren Zeitraum im Bereich einer halben Stunde und länger erstreckt. Damit kann bei dieser Art von Transportunfällen die Turbulenzparametrisierung nach /VDI 02/ ohne Einschränkung verwendet werden.
Brandereignisse sind im Rahmen der Transportunfallrisikoanalyse durchgehend als schwere Brände mit besonders ungünstiger Einwirkung auf die Abfallgebinde behandelt worden, indem für die Ermittlung der Freisetzung vollständige Feuerumschließung großer Abfallbehälter bei ungünstiger Kombination von Brandtemperatur (800 °C) und -dauer (0,5 h bis 1 h) angenommen wird. Solche Ereignisse entsprechen Brandleistungen von etwa 20 MW und mehr, die zu einem starken thermischen Auftrieb der Brandgase führen. Die den Ausbreitungsrechnungen zugrunde gelegte effektive Freisetzungshöhe von 50 m ist damit konservativ deutlich niedriger angesetzt worden als mit einschlägigen Rechenverfahren, z. B. in /GRS 07/, berechnete Aufstiegshöhen der Brandgase.

- Es sind für jede Freisetzungsklasse COSYMA-Rechnungen für die in Tab. 8.12 angegebenen vier Partikelgrößenklassen durchgeführt und anschließend überlagert worden. Dadurch kann zum einen berücksichtigt werden, dass nur Partikel $< 10 \mu\text{m}$ lungengängig sind und zu einer Inhalationsdosis beitragen, zum anderen wird für Partikel im Größenbereich $\leq 100 \mu\text{m}$ bei den Ausbreitungsrechnungen der erhöhten trockenen und nassen Ablagerung (bei Regen) größerer Aerosolpartikel Rechnung getragen. Bei den vier Partikelgrößenklassen wurde die Ablagerungsgeschwindigkeit v_g mit einem Ansatz dargestellt, der die Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} der freigesetzten Aerosolpartikel explizit berücksichtigt. Der Washout-Koeffizient Λ wird dementsprechend ebenfalls abhängig von der Partikelgröße spezifiziert. Tab. 8.12 enthält für die spezifizierten Partikelgrößenklassen die jeweils verwendeten Sedimentationsgeschwindigkeiten v_{sed} und Washout-Koeffizienten Λ_0 . Λ_0 ist der partikelgrößenabhängige Washout-Koeffizient für die Niederschlagsintensität $I_0 = 1 \text{ mm/h}$.

Tab. 8.12 Repräsentative Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} und des Washout-Koeffizienten Λ_0 für verschiedenen Bereiche des aerodynamischen Partikeldurchmessers /GRS 07/

AED (μm)	0 ... 10	10 ... 20	20 ... 50	50 ... 100
repräs. Durchmesser (μm)	10	15,0	35,0	75,0
v_{sed} (m/s)	$0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-2}$
Λ_0 (1/s)	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$

Die COSYMA-Rechnungen liefern für jede Freisetzungsklasse u. a. folgende Ergebnisse:

- Für eine auf einem Polarnetz angeordnete Anzahl von Aufpunkten, die für verschiedene Entfernungen vom Unfallort (150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m) repräsentativ sind und alle Ausbreitungsrichtungen gleichmäßig abdecken (72 Punkte pro Radius), wird für jede betrachtete Entfernung vom Unfallort eine statistische Verteilung der Maximalwerte von luftgetragenen und abgelagerten Radionuklidkonzentrationen infolge der unfallbedingten Aktivitätsfreisetzung berechnet. Diese statistischen Verteilungen resultieren aus den meteorologischen Häufigkeitsverteilungen von jeweils vorherrschender Diffusionskategorie, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag. Aus einer solchen für eine vorgegebene Entfernung ermittelten Häufigkeitsverteilung der Maximalkonzentration kann abgelesen

werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte luftgetragene bzw. abgelagerte Radionuklidkonzentration – jeweils in Ausbreitungsrichtung – überschritten wird, vorausgesetzt es hat ein Unfallereignis mit Aktivitätsfreisetzung stattgefunden. Dabei können die für jede betrachtete Entfernung bestimmten ungünstigsten Aufpunkte bei unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen auftreten.

- Ausgehend von den statistischen Häufigkeitsverteilungen der Aktivitätskonzentrationen werden für jede Entfernung Verteilungen der resultierenden potenziellen Strahlenexposition ermittelt. Die Strahlenexpositionen liegen als effektive Dosis sowohl für einzelne Expositionspfade als auch summiert über alle Expositionspfade vor.
- Zur Berechnung der Strahlenexpositionen, der effektiven Dosis einer erwachsenen Person, wurden – wie in der Transportstudie Konrad /GRS 91/ – vorgefertigte COSYMA-Datensätze mit Dosisfaktoren herangezogen, die weitgehend den im Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28. August 2001 /BAZ 01/ veröffentlichten Dosisfaktoren entsprechen. Für die Inhalation, die Bodenstrahlung und die Ingestion wurde eine Integrationszeit von 50 Jahren betrachtet. Die Betrachtung des Erwachsenen als Referenzperson entspricht dem internationalen Standard bei der Bewertung der Transportsicherheit und liegt auch den internationalen Transportsicherheitsempfehlungen der IAEO zugrunde /IAEA 05/. Es wurden jedoch ergänzende Sensitivitätsstudien durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Berechnungen auf andere Altersgruppen beurteilen zu können (siehe Abschnitt 8.6.4).
- Es wird konservativ unterstellt, dass sich der betrachtete Erwachsene ortsfest an dem jeweiligen Aufpunkt über die Dauer des Vorbeizugs der radioaktiven Wolke im Freien aufhält (Inhalationspfad, Submersion), während der nächsten 50 Jahre in diesem Bereich bleibt (Bodenstrahlung) und von dort seine Nahrungsmittel bezieht (Ingestionspfad).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der probabilistischen Risikoanalyse von Transportunfällen in der Endlagerregion für das realistische Anlieferungsszenarium dargestellt (Abschnitt 8.6.4). Demnach erfolgt die Abfallanlieferung im Endlager Konrad vorrangig auf dem Schienenwege. Der auf die Schienenbeförderung entfallende Anteil beläuft sich auf etwa 80 %, der Straßenbeförderungsanteil beträgt etwa 20 % (80/20-Szenarium).

Zum besseren Verständnis der methodischen Vorgehensweise und der erzielten Ergebnisse bei diesem kombinierten Szenarium werden zuvor die beiden hypothetischen Anlieferungsszenarien mit einer unterstellten ausschließlichen Schienen- bzw. Straßenanlieferung der radioaktiven Abfälle eingehender analysiert (Abschnitte 8.6.2 und 8.6.3).

Die Ergebnisdarstellung erfolgt dabei in Form kumulativ komplementärer Häufigkeitsverteilungen (CCFD). Diese erhält man jeweils durch Überlagerung der Rechenergebnisse für die 10 Freisetzungsklassen FK 1 bis FK 10 bei rein mechanischer Beaufschlagung sowie der Ergebnisse für die 10 Freisetzungsklassen FK 11 bis FK 20, bei denen mechanische Gebindebelastungen mit Brand auftreten. Bei der Überlagerung zu einer zusammenfassenden Häufigkeitsverteilung werden jeweils die erwarteten Eintrittshäufigkeiten der Freisetzungsklassen aufgrund von Transportunfällen innerhalb des 25 km-Umkreises berücksichtigt. Diese sind in Tab. 8.11 angegeben.

Die erwarteten Eintrittshäufigkeiten der Freisetzungsklassen ergeben sich aus den in Abschnitt 8.5 aufgeführten Häufigkeiten von Transportunfällen mit Freisetzung in der Endlagerregion, multipliziert mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Freisetzungsklassen (vgl. Abb. 8.6 und Abb. 8.7).

8.6.2 Szenarium: 100 % Schienentransport

Die Ergebnisse zum Risiko von Transportunfällen bei ausschließlicher Beförderung mit Güterzügen sind in Abb. 8.13 zusammengefasst. Die dargestellten Kurvenverläufe geben die Häufigkeiten an, mit denen aufgrund von Transportunfällen bestimmte potenzielle Strahlenexpositionen in unterschiedlichen Entfernungen vom Unfallort auftreten können.

Auf der vertikalen Achse ist die erwartete Häufigkeit pro Jahr ablesbar, mit der auf der horizontalen Achse als effektive Dosen aufgeführte Strahlenexpositionen auftreten können, und zwar für den als ortsfest betrachteten Erwachsenen. Beide Achsen sind wegen der großen Wertebereiche der erwarteten Eintrittshäufigkeiten und der berechneten potenziellen Strahlenexposition im logarithmischen Maßstab unterteilt.

Erwartete Häufigkeiten sind in den komplementären Häufigkeitsverteilungen bis herab zu 10^{-7} pro Jahr dargestellt. Die Angabe noch kleinerer Ereignishäufigkeiten ist nicht sinnvoll, da dann schon andere Ereignisse, die in den ausgewerteten Unfallstatistiken

gar nicht enthalten sind, zum Risiko beitragen. Eine ausführlichere Darstellung hierzu erfolgt bei der Bewertung des Transportunfallrisikos in Abschnitt 8.7.

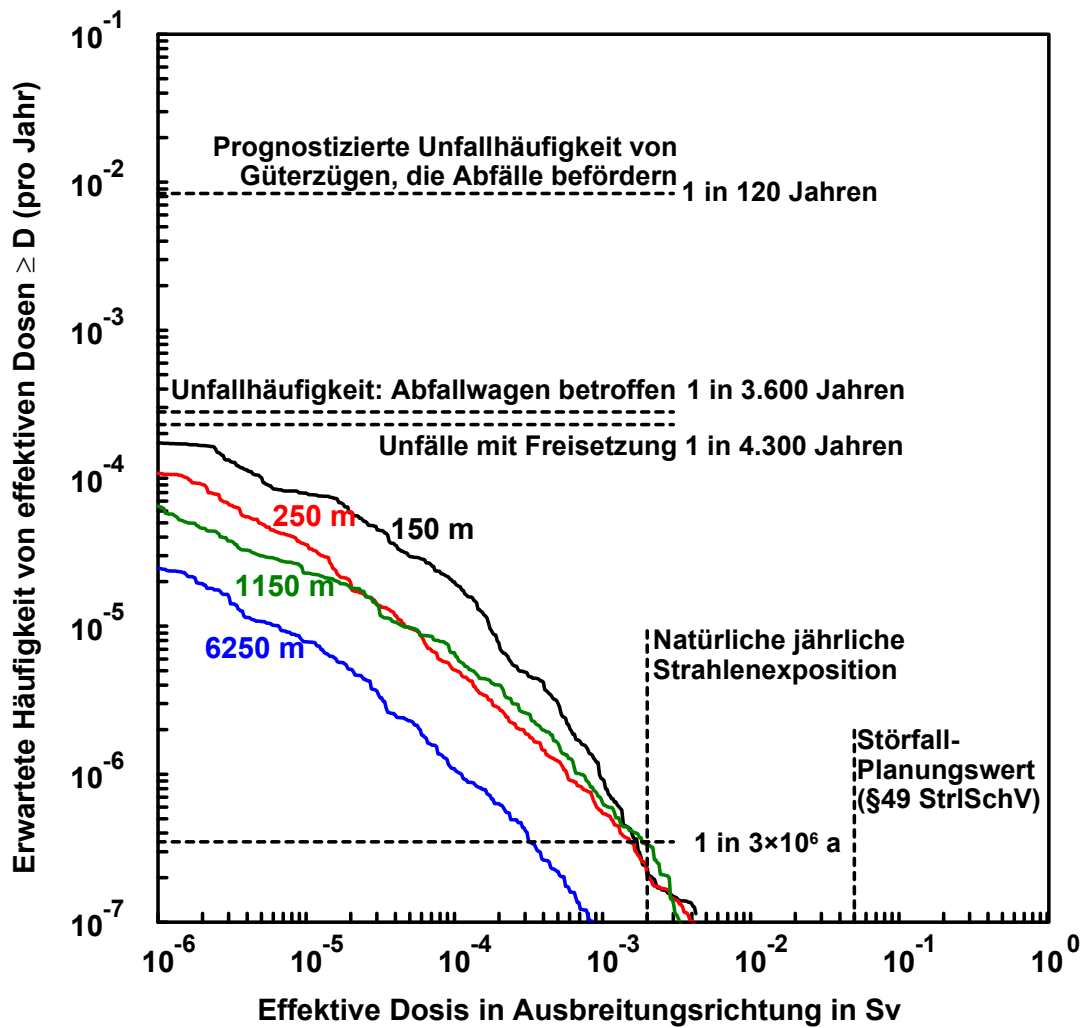


Abb. 8.13 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)
 – 100 % Bahnbeförderung
 – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)

Folgende Informationen sind zum Verständnis der in Abb. 8.13 zusammengefassten Ergebnisse zum Transportunfallrisiko wichtig:

- Die auf der vertikalen Achse aufgeführten Häufigkeiten beziehen sich auf die gesamte Endlagerregion, also auf einen Umkreis von 25 km Radius um die Anlage.
- Die auf der horizontalen Achse aufgeführten effektiven Dosen geben die Höhe der potentiellen Strahlenexpositionen an, die in der näheren Umgebung eines Unfallortes für die angegebenen Entfernungen bei Aufenthalt in Richtung der Schadstoffausbreitung auftreten können.
- Bei den Berechnungen von potenziellen Strahlenexpositionen infolge unfallbedingter Freisetzungen radioaktiver Stoffe wurde angenommen, dass sich erwachsene Personen in bestimmten Entfernungen – hier: 150 m, 250 m, 1150 m, 6250 m – vom Unfallort in der Richtung aufhalten, in die sich aufgrund des vorherrschenden Windes jeweils die Schadstofffahne ausbreitet.
- Dabei wird konservativ unterstellt, dass sich die Person an dem betreffenden Aufpunkt über die Dauer des Vorbeizugs der luftgetragenen radioaktiven Stoffe im Freien aufhält (Inhalationspfad, Submersion). Außerdem hält sie sich in diesem Bereich während der nächsten 50 Jahre auf (Bodenstrahlung) und bezieht von dort ihre Nahrungsmittel (Ingestionspfad).
- Die für ausgewählte Entfernungen aufgeführten Kurvenverläufe erfassen für das gesamte Spektrum möglicher Freisetzungen bei Transportunfällen mit Abfallgebinden die potenziellen resultierenden Strahlenexpositionen von Personen. Sie geben gleichzeitig die Häufigkeiten an, mit der solche Auswirkungen irgendwo innerhalb des 25 km-Umkreises um das Endlager auftreten können.
- Bei den Berechnungen von potenziellen Strahlenexpositionen sind keine dosismindernden Gegenmaßnahmen unterstellt worden. D. h. insbesondere, dass ein Beseitigen von auf Bewuchs und anderen Flächen abgelagerten radioaktiven Stoffen nach einem Unfall oder andere Maßnahmen zur Reduktion möglicher Strahlenexpositionen wie Verzehrseinschränkungen nicht angenommen wurden.
- Die Kurvenverläufe der Häufigkeitsverteilung beziehen sich auf potenzielle Strahlenexpositionen in Richtung der Ausbreitung. Andere Bereiche außerhalb eines Sektors von maximal 30° in jeweiliger Windrichtung wären nicht betroffen.

- Die kürzeste Entfernung, für die in Abb. 8.13 der Kurvenverlauf der Häufigkeitsverteilung aufgezeigt wird, beträgt 150 m. Allerdings werden bereits für eine Entfernung von 250 m von einem Unfallort Berechnungen von potenziellen Strahlenexpositionen ohne Annahme irgendwelcher dosismindernder Gegenmaßnahmen nach Unfalleintritt im Hinblick auf langfristige Expositionspfade wie Bodenstrahlung und Ingestion zunehmend unrealistisch. So wird u. a. die Berechnungsannahme, dass sämtliche Nahrungsmittel einer Person über einen Zeitraum von 50 Jahren aus noch geringeren Entfernungen als 250 m vom Unfallort stammen, zunehmend fragwürdig. Kürzere Entfernungen als 250 m sind daher nur für den Expositionspfad Inhalation relevant und dienen hier daher nur zur Orientierung. Zudem ist mit Brandereignissen, die zu deutlich höheren Freisetzungen von Partikeln im lungengängigen Größenbereich führen als rein mechanische Einwirkungen auf Abfallgebinde, ein thermischer Aufstieg der Schadstofffahne verbunden. Dies führt im Ergebnis dazu, dass bei Brandereignissen die maximalen bodennahen Schadstoffkonzentrationen erst in Entfernungsbereichen von einigen 100 m auftreten.

Aus den in Abb. 8.13 zusammengefassten Ergebnissen zum Unfallrisiko beim Güterzugtransport lassen sich u. a. folgende Aussagen ablesen:

- Bezogen auf das jährliche Abfalltransportaufkommen beträgt die erwartete Häufigkeit, mit der es in der Endlagerregion zu einem Unfall mit Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt, $2,3 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr (entsprechend 1 Unfall in ca. 4300 Jahren).
- Da die Menge der dabei freigesetzten radioaktiven Stoffe häufig gering ist, sind dann auch daraus resultierende potenzielle Strahlenexpositionen entsprechend niedrig. So bewegen sich berechnete effektive Lebenszeitdosen bei 1150 m Entfernung vom Unfallort in Ausbreitungsrichtung bei mehr als 99 % der Unfälle unterhalb von 2 mSv. Das entspricht in etwa der effektiven Dosis, die eine Person in Deutschland im Mittel aufgrund der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres erhält. Dies lässt sich in Abb. 8.13 aus dem Kurvenverlauf für 1150 m Entfernung ablesen, wonach – bezogen auf das Transportaufkommen eines Jahres – mit einer erwarteten Häufigkeit von $3,5 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr (entsprechend 1 in ca. $3 \cdot 10^6$ Jahren) effektive Dosen von 2 mSv oder höher auftreten können.
- Bei geringeren Entfernungen (hier 150 m und 250 m) ergibt sich eine weitere Reduktion der erwarteten Häufigkeit. Bei hypothetischem kontinuierlichem Anlieferungs- und Einlagerungsbetrieb wäre mit einer Eintrittshäufigkeit von ca. $2 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr, d. h. einmal in ca. 5 000 000 Jahren, mit einem Transportunfall in der Endla-

gerregion zu rechnen, der ohne Gegenmaßnahmen im Entfernungsbereich zwischen 150 m bis 250 m vom Unfallort zu Strahlenexpositionen im Bereich der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres führen könnte.

- Entsprechend unwahrscheinlicher sind Unfälle, bei denen potenzielle effektive Dosen im Bereich von 50 mSv liegen. 50 mSv entspricht dem Störfallplanungswert des § 49 der Strahlenschutzverordnung /BMU 07a/.
- Dieser Wert von 50 mSv tritt bei allen betrachteten Entfernungen vom Unfallort auch bei extrem niedrigen Eintrittshäufigkeiten von 10^{-7} pro Jahr nicht auf.

Im Gegensatz zur Transportstudie Konrad 1991 /GRS 91/ überkreuzen sich die Verläufe der Häufigkeitsverteilungen für 150 m, 250 m und 1150 m teilweise. Dies liegt zum einen daran, dass sich die bodennah emittierten Freisetzungen bei mechanischen Belastungen gegenüber /GRS 91/ deutlich verringert haben. Damit erhalten Unfälle mit Brand, bei denen thermische Überhöhnung (50 m) unterstellt wurde, einen deutlich höheren Einfluss auf die berechneten effektiven Dosen. Zum anderen kommt hier auch die Verwendung des Ausbreitungsmodells LASAT[®] zum Tragen. Dieses Modell simuliert die bodennahe Freisetzung und insbesondere die Ablagerung (und damit auch die Abreicherung der aerosolgebundenen luftgetragenen Radionuklide) viel realitätsnäher als das in /GRS 91/ eingesetzte Gauß-artige Ausbreitungsmodell MUSEMET. Dementsprechend werden im Nahbereich verstärkt große Aerosolpartikel abgeschieden.

Die in Abb. 8.13 aufgeführten Eintrittshäufigkeiten beziehen sich auf die gesamte Endlagerregion (25 km-Umkreis). Fragt sich jemand, der in der Nähe einer Transportstrecke wohnt, wie groß sein persönliches Risiko durch mögliche Transportunfälle mit radioaktiven Abfällen ist, so bewegt sich dieses in noch viel niedrigeren Bereichen. Das hat u. a. folgende Gründe:

- Ein Unfall müsste sich in der Nähe seines Aufenthaltsortes ereignen. Das ist in jedem Fall, auch wenn es sich um einen unfallträchtigeren Streckenbereich handeln sollte, deutlich unwahrscheinlicher als ein Unfall in der gesamten Endlagerregion.
- Die Person müsste sich bei einem Unfall gerade in Ausbreitungsrichtung vom Unfallort aufhalten, was sich ebenfalls in einer geringeren Wahrscheinlichkeit ausdrückt, betroffen zu sein.

Von den betrachteten Expositionspfaden Submersion, Bodenstrahlung, Inhalation, Ingestion und Resuspension liefert die Ingestion den größten Beitrag zur Strahlenexposi-

tion. Aus Tab. 8.13 kann für die beiden Unfallbelastungen ohne und mit Brand die Rangfolge der Expositionspfade abgelesen werden, die sich in 250 m Entfernung vom Unfallort ergibt. Außerdem sind in der Tabelle die wichtigsten Radionuklide angegeben, und zwar in der Rangfolge der radiologischen Bedeutung beider Arten von Unfallbelastungen. Die angegebenen Prozentzahlen wurden durch Mittelwertbildung der COSYMA-Ergebnisse für die Freisetzungsklassen FK 1 bis FK 10 (ohne Brand) sowie für FK 11 bis FK 20 (mit Brand) gewonnen.

Den aus Tab. 8.13 zu entnehmenden hohen Anteil der Ingestionsdosis an der Gesamtdosis kann man auch in Abb. 8.14 erkennen. In dieser Darstellung wurden für das Transportunfallszenario 100 % Schiene die Häufigkeitsverteilungen der effektiven Dosis ohne Ingestion für die Entfernungen 150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m aufgeführt. Bei allen betrachteten Entfernungen vom Unfallort wird bei dieser Betrachtung auch bei extrem niedrigen Eintrittshäufigkeiten von 10^{-7} pro Jahr nicht die natürliche Strahlenexposition während eines Jahres (ca. 2 mSv/a) in Deutschland erreicht.

Tab. 8.13 Rangfolge der betrachteten Expositionspfade und Radionuklide beim Transportunfallszenario 100 % Schiene für die Entfernung 250 m

Expositionspfad	Unfall mit Freisetzung	
	ohne Brand	mit Brand
Ingestion	83,1 %	70,0 %
γ -Bodenstrahlung	9,2 %	9,6 %
Inhalation	5,9 %	19,5 %
Resuspension	1,8 %	0,9 %
γ -Submersion	≈ 0 %	< 0,01 %
Radionuklide	Cs-137, Sr-90, Co-60, Am-241	Cs-137, Am-241, Co-60, Sr-90

Zum Vergleich sind in Abb. 8.14 zusätzlich die Häufigkeitsverteilungen der effektiven Dosis summiert über alle Expositionspfade einschließlich Ingestion für 150 m und 1150 m Entfernung aus Abb. 8.13 übernommen worden (gestrichelte Kurven). Damit wird erkennbar, in welchem Umfang nach einem Unfall ein Verzehrsverbot von Nahrungsmitteln aus der näheren Umgebung des Unfallortes zur Reduktion von Strahlenexpositionen beitragen kann. Man erkennt aus Abb. 8.14, dass in unmittelbarer Nähe

des Unfallortes (150 m) die effektive Gesamtdosis ohne Ingestion um bis zu einem Faktor 10 geringer ausfällt als bei Berücksichtigung aller Expositionspfade. Im mittleren Entfernungsbereich ergibt sich eine geringere Reduktion mit Faktoren im Bereich zwischen 1,2 und etwa 3.

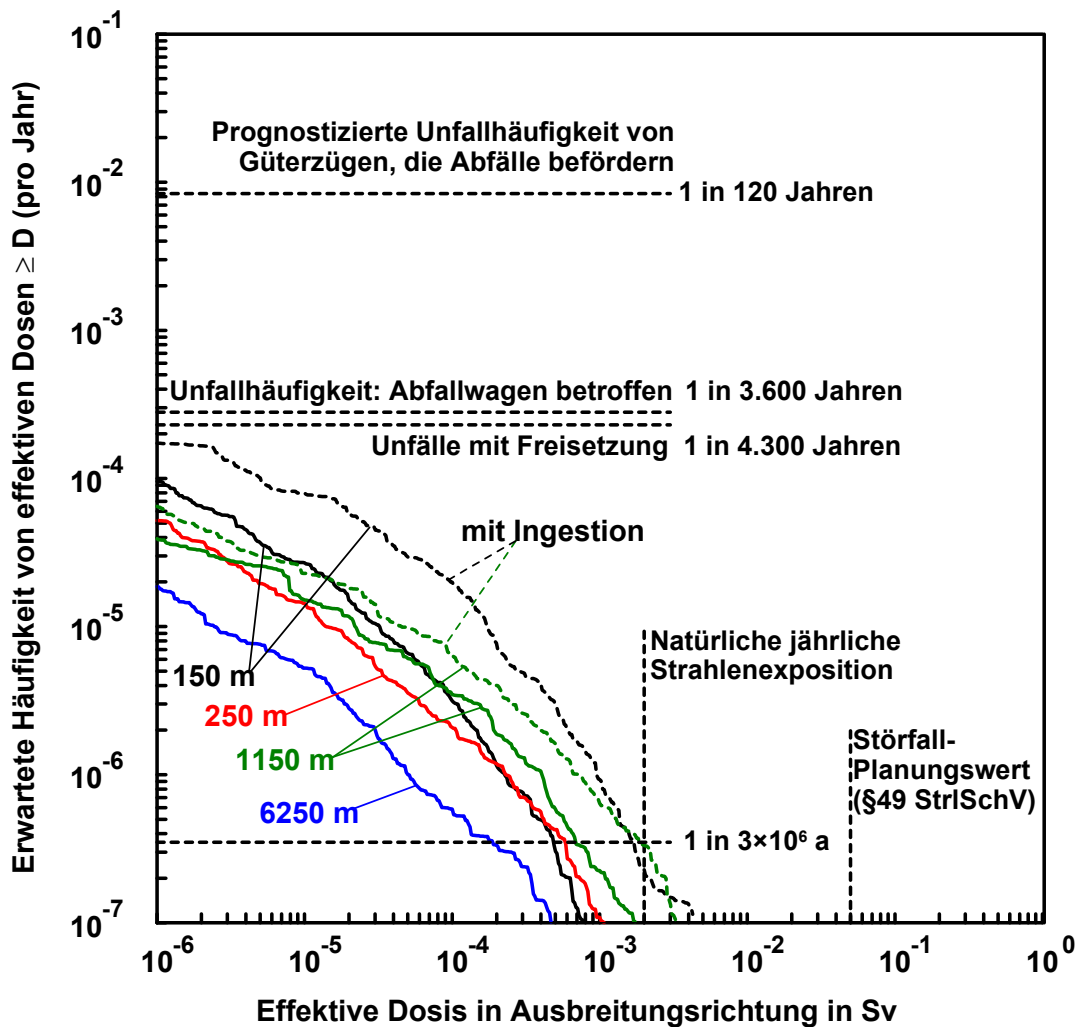


Abb. 8.14 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)
 – 100 % Bahnbeförderung
 ——— Alle Expositionspfade, ohne Ingestion
 - - - - - Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)

Der Beitrag, den die langfristigen Expositionspfade Bodenstrahlung, Ingestion und Resuspension zur Gesamtdosis im Vergleich zum Expositionspfad Inhalation verursachen, kann aus Abb. 8.15 entnommen werden. Aus dieser Darstellung komplementärer Häufigkeitsverteilungen kann zunächst einmal abgelesen werden, dass die effektive Lebenszeitdosis durch Inhalation für die vier betrachteten Entfernungen vom Unfallort auch bei extrem niedrigen Eintrittshäufigkeiten von 10^{-7} pro Jahr nicht die natürliche Strahlenexposition eines Jahres von ca. 2 mSv/a erreicht. Zum Vergleich sind in der Abbildung zusätzlich noch die Häufigkeitsverteilungen der effektiven Dosis summiert über alle Expositionspfade für 150 m und 250 m Entfernung aus Abb. 8.13 übernommen worden. Dadurch wird erkennbar, in welchem Umfang Maßnahmen nach einem Unfall zur Reduktion von Strahlenexpositionen beitragen können. Die Kurvenverläufe der komplementären Häufigkeitsverteilungen der effektiven Gesamtdosis für 150 m und 250 m hüllen die Kurvenverläufe der Inhalationsdosis vollständig ein. Daraus wird ersichtlich, dass potenzielle effektive Dosen bei Beschränkung auf den Inhalationspfad bei geringeren Entfernungen vom Unfallort durch die für 250 m ausgewiesene Gesamtdosis abdeckend erfasst sind.

Um den möglichen Einfluss von Maßnahmen nach einem Unfall zur Reduktion von Strahlenexpositionen auch für größere Entfernungen in Ausbreitungsrichtung beurteilen zu können, sind in Abb. 8.16 zu den aus Abb. 8.15 übernommenen (durchgezogenen) Kurvenverläufen für den Expositionspfad Inhalation die komplementären Häufigkeitsverteilungen der Gesamtdosis für die Entfernungen 1150 m und 6250 m (gestrichelte Kurven) gegenübergestellt. Dabei zeigt jeweils der horizontale Abstand der Kurvenpaare 1150 m und 6250 m, welcher Anteil der gesamten Strahlenexposition im Mittel aus den langfristigen Expositionspfaden Bodenstrahlung, Ingestion und Resuspension resultiert und damit durch Gegenmaßnahmen wie Dekontamination oder Verzicht auf landwirtschaftliche Nutzung reduziert werden kann. Da die Kurvenverläufe der Häufigkeitsverteilungen ein großes Spektrum von Unfallabläufen und Ausbreitungsbedingungen repräsentieren, lassen sich durch den Vergleich der Gesamtdosis ohne Gegenmaßnahmen und der Inhalationsdosis nur generelle Aussagen treffen, welchen Einfluss Gegenmaßnahmen haben können. Die relativen Beiträge der einzelnen Expositionspfade an der Gesamtdosis variieren je nachdem, welche Radionuklide im Einzelfall freigesetzt werden, und in Abhängigkeit von dem Verhältnis von abgelagerter zu luftgetragener Radioaktivität. Die Ablagerung auf Bewuchs und Boden ist effizienter bei nasser Deposition aufgrund von Regen oder durch die schnellere trockene Ablagerung von Partikeln mit größeren aerodynamischen Durchmessern.

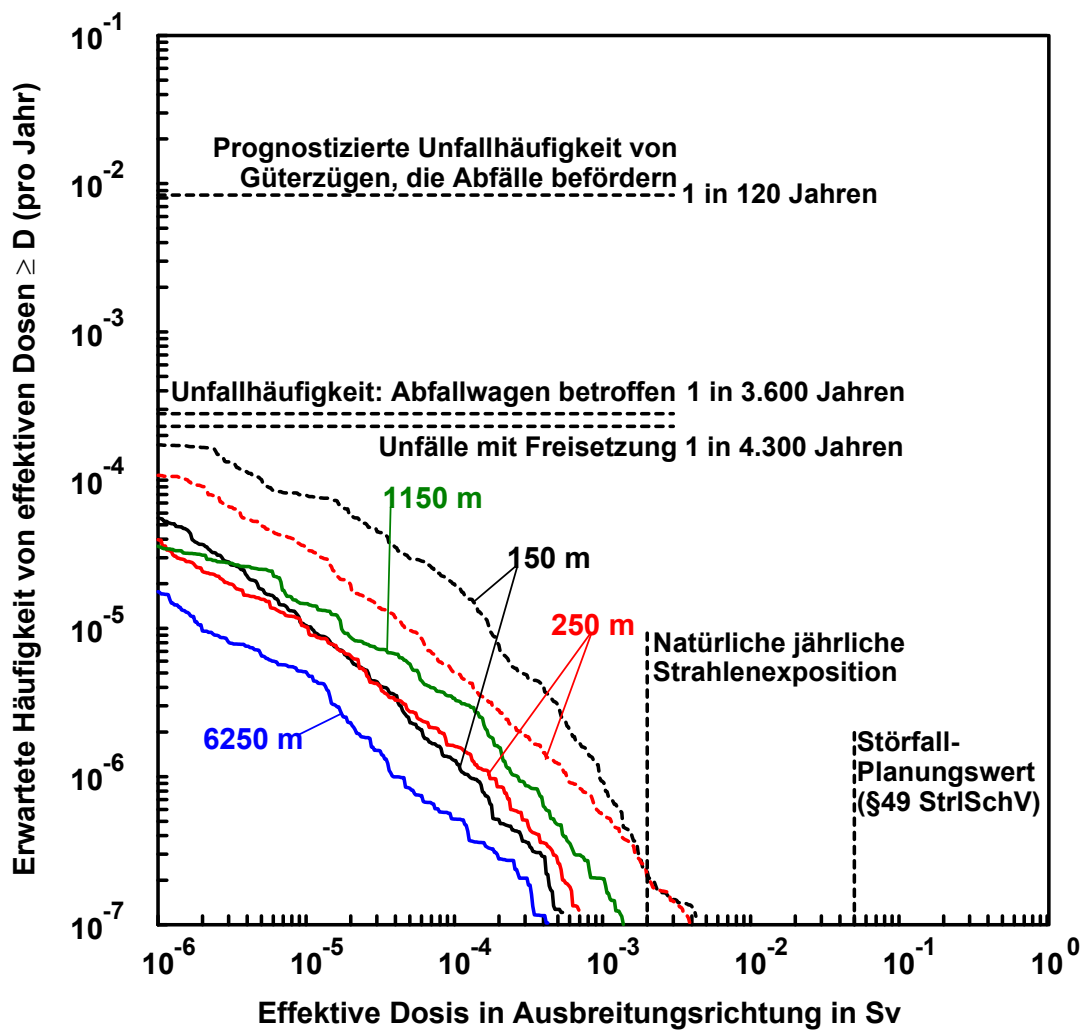


Abb. 8.15 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)

- 100 % Bahnbeförderung
- – – – – Alle Expositionspfade
(keine Gegenmaßnahme, 150 m und 250 m)
- Nur Inhalation (alle Entfernungen)

Aus den Abb. 8.15 und Abb. 8.16 können folgende Informationen zum möglichen Einfluss von Maßnahmen nach einem Unfall entnommen werden:

- Der Unterschied zwischen der potenziellen Gesamtdosis und der Inhalationsdosis ist für kleinere Entfernungen vom Unfallort (150 m und 250 m) größer als für weitere Entfernungen wie 1150 m und 6250 m. Dies ist überwiegend darauf zurückzuführen, dass im Nahbereich verstärkt Partikel mit größeren aerodynamischen Durchmessern abgelagert werden, die nicht lange luftgetragen bleiben.
- So können Maßnahmen, die die langfristigen Expositionspfade beeinflussen, bei ca. 99 von 100 Unfällen mit Freisetzung im Entfernungsbereich bis 250 m in Ausbreitungsrichtung eine Dosisreduktion größenordnungsmäßig um den Faktor 10 und mehr bewirken. Im Entfernungsbereich um 1000 m bewegt sich die mögliche Reduktion potenzieller Strahlenexpositionen durch Gegenmaßnahmen etwa um einen Faktor 3 und höher.
- Bei keiner der hier untersuchten Entfernungen vom Unfallort erreicht die Inhalationsdosis auch bei extrem niedrigen Eintrittshäufigkeiten von 10^{-7} pro Jahr die natürliche Strahlenexposition eines Jahres (ca. 2 mSv/a).
- Die bei Unfällen möglicherweise betroffenen Gebiete sind in der Breite (maximal 30° Sektor) und Tiefe begrenzt. Der Anteil von Unfällen mit Freisetzung, die bei den Entfernungen 150 m und 250 m ohne Gegenmaßnahmen zu potenziellen Strahlenexpositionen führen, die die natürliche Strahlenexposition von 2 mSv/a überschreiten, liegt im Promille-Bereich. In 1150 m Entfernung wäre das nur in weniger als einem von 100 Unfällen mit Freisetzung der Fall, bei größeren Entfernungen um 6000 m gar nicht.
- Die berechneten Strahlenexpositionen liegen weit unterhalb von Dosiswerten, bei denen Notfallschutzmaßnahmen erwogen werden müssten. Die hier diskutierten Gegenmaßnahmen sollen den möglichen Einfluss von Maßnahmen verdeutlichen und sind im Sinne einer vorsorglichen Minimierung gemäß Strahlenschutzvorsorgegesetz zu verstehen.

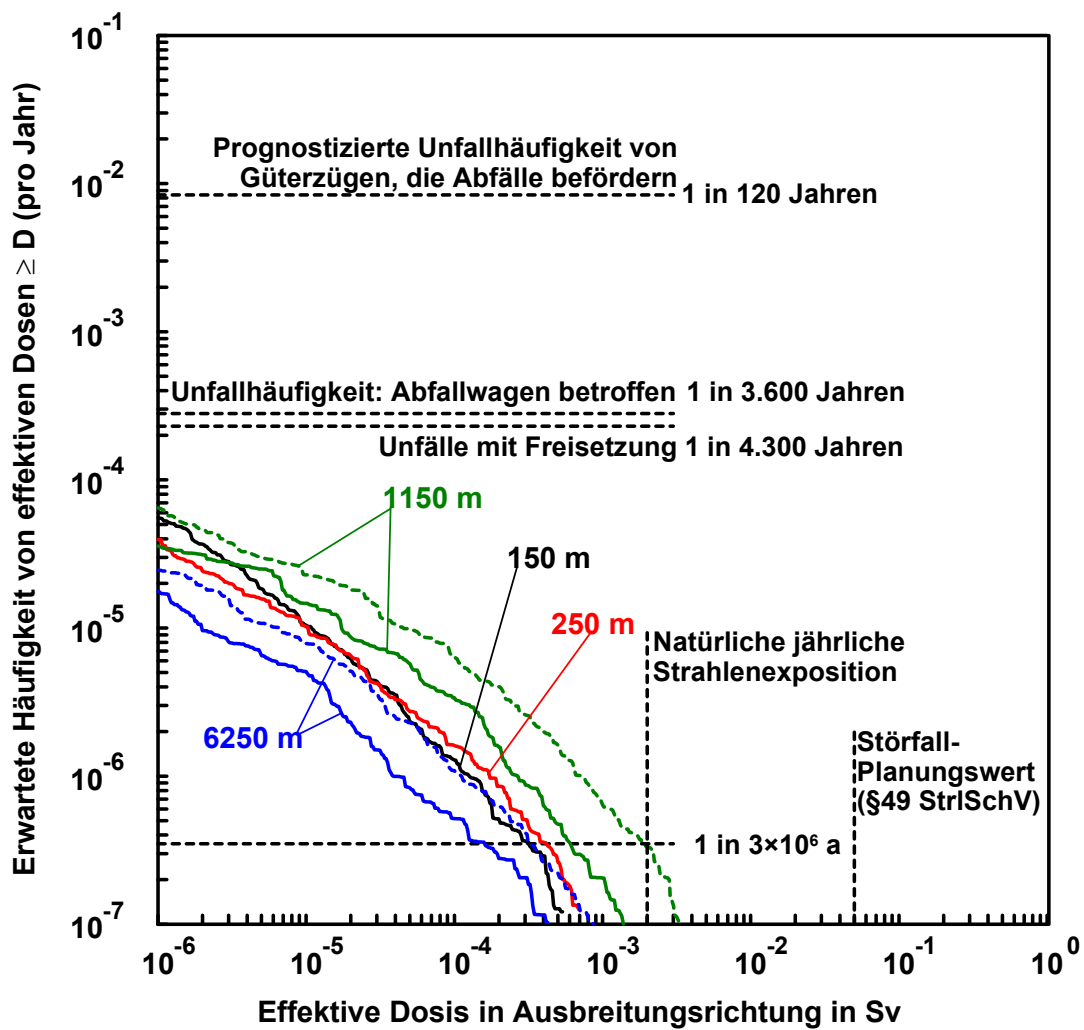


Abb. 8.16 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)

- 100 % Bahnbeförderung
- – – – – Alle Expositionspfade
(keine Gegenmaßnahme, 1150 m und 6250 m)
- Nur Inhalation (alle Entfernungen)

8.6.3 Szenarium: 100 % Straßentransport

Die Ergebnisse zum Risiko von Transportunfällen bei ausschließlicher Beförderung mit LKW sind in gleicher Weise wie in Abb. 8.13 für den Schienentransport in Abb. 8.17 zusammengefasst. Die dargestellten Kurvenverläufe geben die Häufigkeiten an, mit denen aufgrund von Straßentransportunfällen bestimmte potenzielle Strahlenexpositionen (effektive Lebensdosis) in den Entfernungen 150 m, 250 m, 1150 m und 6250 m vom Unfallort jeweils in Ausbreitungsrichtung auftreten können.

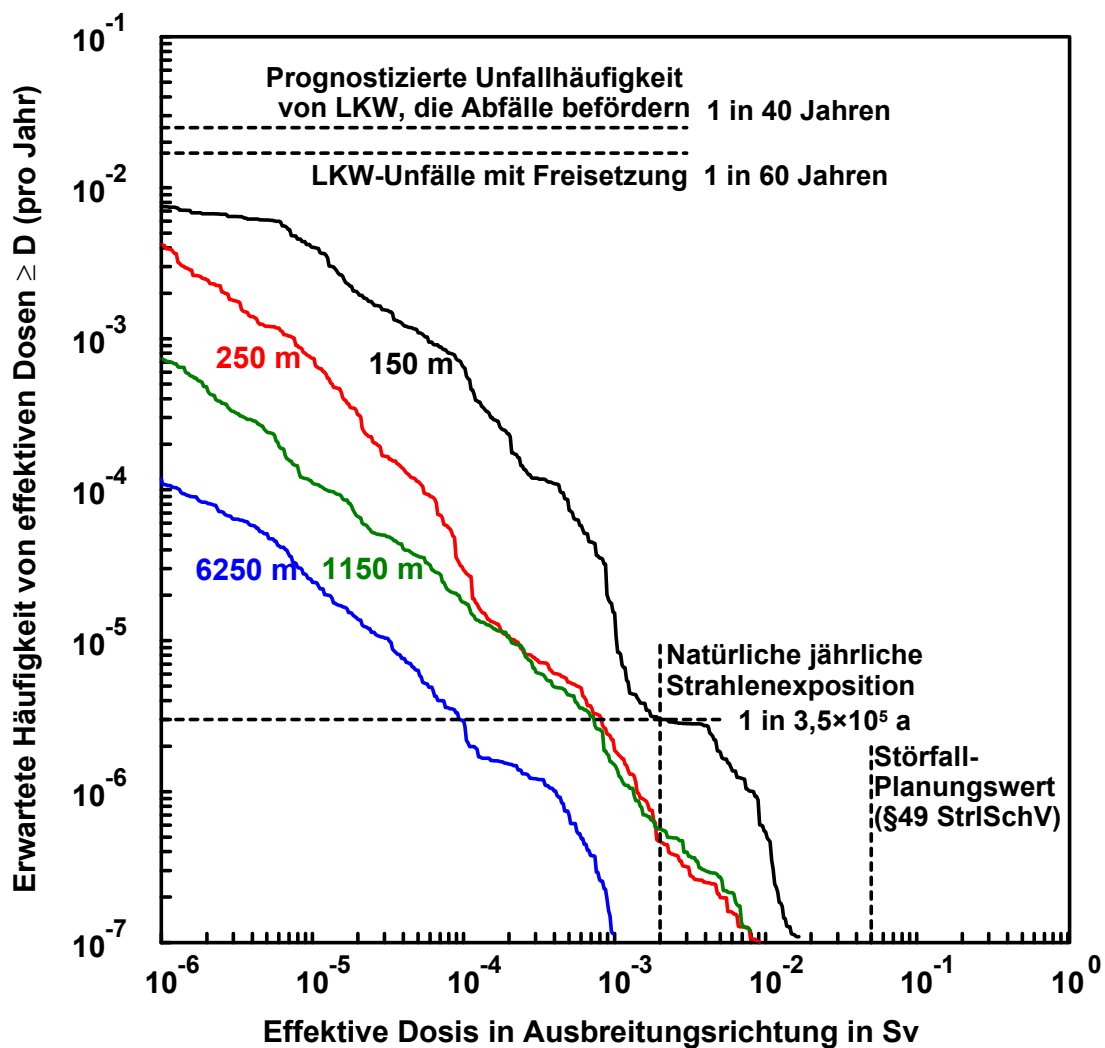


Abb. 8.17 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)
– 100 % Straßentransport
– Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)

Aus den in Abb. 8.17 zusammengefassten Ergebnissen zum Unfallrisiko beim Straßen-transport lassen sich u. a. folgende Aussagen ablesen:

- Bezogen auf das Abfalltransportaufkommen eines Jahres beträgt die erwartete Häufigkeit, mit der es in der Endlagerregion zu einem LKW-Unfall mit Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt, $1,7 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr (entsprechend einem LKW-Unfall in 60 Jahren). Diese Wahrscheinlichkeit ist deutlich (um mehr als den Faktor 70) höher als die entsprechende erwartete Häufigkeit für einen Güterzugtransportunfall mit Freisetzung radioaktiver Stoffe.
- Da auch bei LKW-Transportunfällen die Menge der dabei freigesetzten radioaktiven Stoffe häufig gering ist, sind dann auch daraus resultierende potenzielle Strahlenexpositionen wieder entsprechend niedrig. So bewegen sich berechnete effektive Lebenszeitdosen bei 150 m Entfernung vom Unfallort in Ausbreitungsrichtung bei mehr als 99,9 % der Unfälle unterhalb von 2 mSv. Das entspricht in etwa der effektiven Dosis, die eine Person in Deutschland im Mittel aufgrund der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres erhält. Bei den Entfernungen 250 m und 1150 m sinkt die erwartete Häufigkeit noch weiter auf ca. $6 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr, d. h. einmal in ca. 1 600 000 Jahren.
- Ebenso wie beim Schienentransport werden bei größeren Entfernungen vom Unfallort (hier 6250 m) effektive Dosen von 2 mSv auch im ungünstigsten Fall gar nicht mehr erreicht.
- Potenzielle effektive Dosen im Bereich des Störfallplanungswerts des § 49 der Strahlenschutzverordnung /BMU 07a/ in Höhe von 50 mSv treten – ebenso wie beim Schienentransport – bei allen betrachteten Entfernungen vom Unfallort auch bei extrem niedrigen Eintrittshäufigkeiten von 10^{-7} pro Jahr nicht auf.
- Im Hinblick auf die betrachteten Expositionspfade liefert die Ingestion unter der Annahme ausschließlicher Versorgung mit lokal angebauten Nahrungsmitteln auch beim LKW-Transportunfall (ebenso wie beim Güterzugtransportunfall) wieder den größten Beitrag zur Strahlenexposition. Aus Tab. 8.14 kann für die beiden Unfallbelastungen ohne und mit Brand wieder die Rangfolge der Expositionspfade abgelesen werden, die sich in 250 m Entfernung vom Unfallort ergibt. Außerdem finden sich in der Tabelle wieder die wichtigsten Radionuklide, und zwar in der Rangfolge der radiologischen Bedeutung beider Arten von Unfallbelastungen. Sowohl bei Transportunfällen mit Güterzügen als auch mit LKW tragen Cs-137, Sr-90, Co-60 und Am-241 hauptsächlich zur Strahlenexposition bei.

Tab. 8.14 Rangfolge der betrachteten Expositionspfade und Radionuklide beim Transportunfallszenario 100 % Straßentransport für die Entfernung 250 m

Expositionspfad	Unfall mit Freisetzung	
	ohne Brand	mit Brand
Ingestion	82,2 %	68,3 %
γ-Bodenstrahlung	8,0 %	8,7 %
Inhalation	7,3 %	22,0 %
Resuspension	2,5 %	1,0 %
γ-Submersion	≈ 0 %	< 0,01 %
Radionuklide	Cs-137, Sr-90, Co-60, Am-241	Cs-137, Am-241, Co-60, Sr-90

Die in Abb. 8.17 aufgeführten Eintrittshäufigkeiten beziehen sich auf die über alle Expositionspfade summierte Gesamtdosis ohne Annahme von Gegenmaßnahmen nach Unfalleintritt. Für kürzere Entfernungen ist es unrealistisch anzunehmen, dass gar keine Maßnahmen getroffen würden, um die Strahlenexpositionen durch die langfristigen Expositionspfade Bodenstrahlung, Ingestion und Resuspension zu begrenzen. Auch hier wird wieder die Berechnungsannahme, dass sämtliche Nahrungsmittel einer Person über einen Zeitraum von 50 Jahren aus einem kleinen kontaminierten Bereich in Ausbreitungsrichtung vom Unfallort in einem Entfernungsbereich um 250 m stammen, zunehmend fragwürdig.

Der Beitrag, den die langfristigen Expositionspfade Bodenstrahlung, Ingestion und Resuspension zur Gesamtdosis im Vergleich zum Expositionspfad Inhalation verursachen, kann aus Abb. 8.18 entnommen werden. Aus dieser Darstellung komplementärer Häufigkeitsverteilungen ist zunächst einmal ersichtlich, dass nur für die Entfernung 1150 m vom Unfallort im Bereich der extrem niedrigen Eintrittshäufigkeit von 10^{-7} pro Jahr die natürliche Strahlenexposition eines Jahres (ca. 2 mSv/a) erreicht wird. Zum Vergleich sind in der Abbildung zusätzlich noch die Häufigkeitsverteilungen der effektiven Dosis summiert über alle Expositionspfade (gestrichelte Kurven) für 150 m und 250 m Entfernung aus Abb. 8.17 übernommen worden. Dadurch wird erkennbar, dass in diesem Entfernungsbereich durch das Ergreifen von Maßnahmen nach einem Unfall die resultierenden potenziellen Strahlenexpositionen um den Faktor 10 und mehr reduziert werden könnten.

In Abb. 8.19 sind neben den komplementären Häufigkeitsverteilungen für den Expositionspfad Inhalation zusätzlich noch die Häufigkeitsverteilungen der effektiven Dosis summiert über alle Expositionspfade für die Entfernungen 1150 m und 6250 m aus Abb. 8.17 dargestellt.

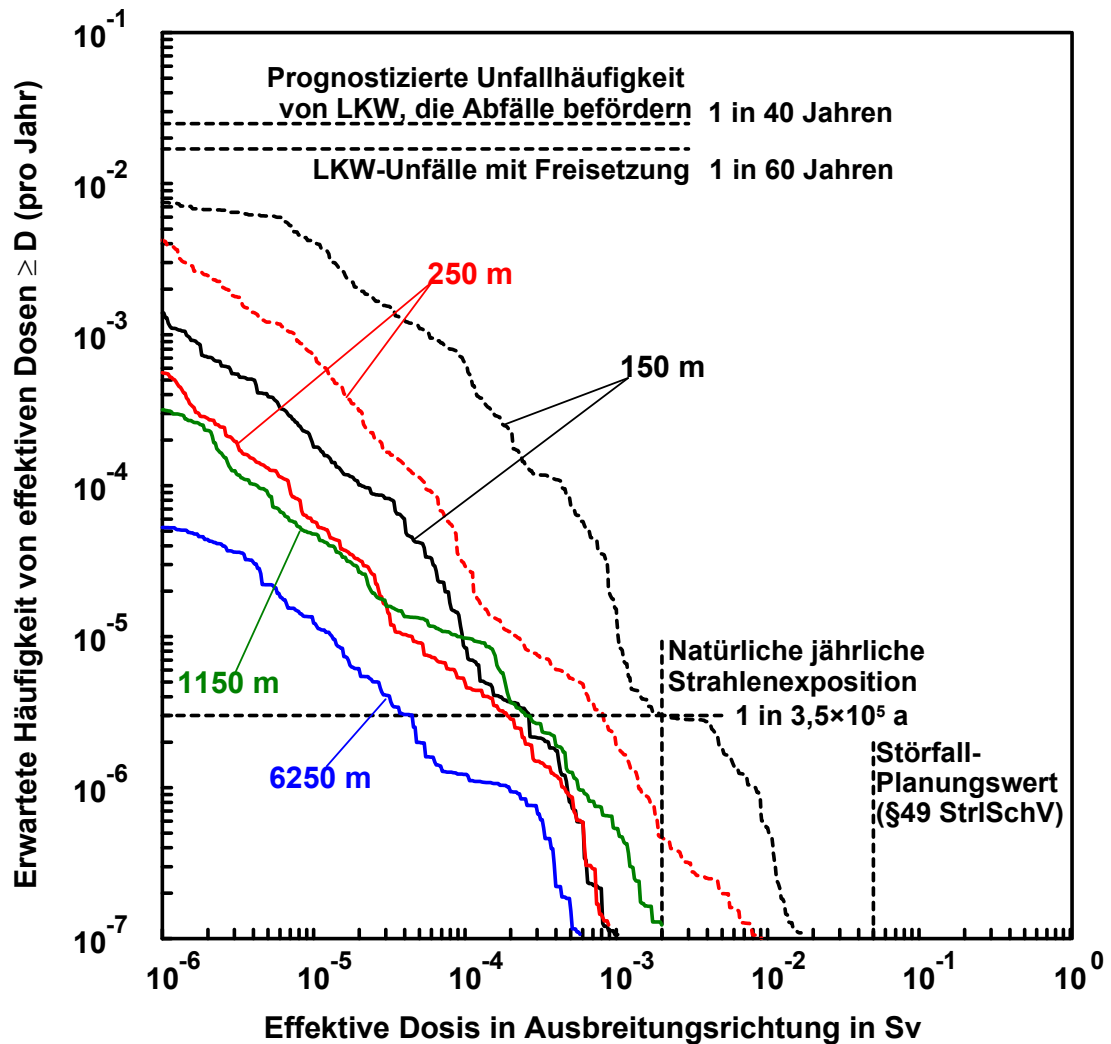


Abb. 8.18 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)

- 100 % Straßentransport
- - - - - Alle Expositionspfade
(keine Gegenmaßnahmen, 150 m und 250 m)
- Nur Inhalation

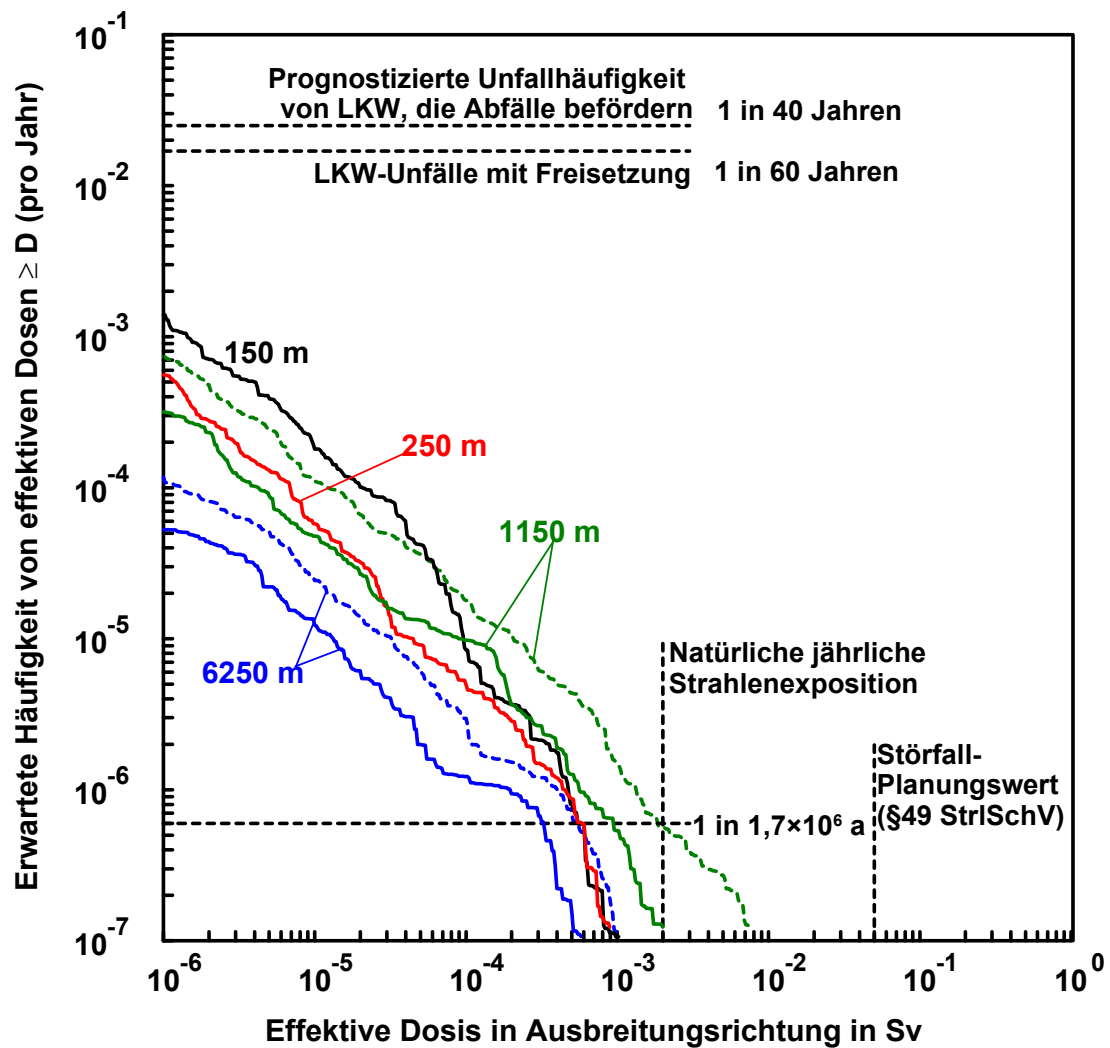


Abb. 8.19 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)

- 100 % Straßentransport
- - - - - Alle Expositionspfade
(keine Gegenmaßnahmen, 1150 m und 6250 m)
- Nur Inhalation

Aus den Abb. 8.18 und Abb. 8.19 können folgende Informationen zum möglichen Einfluss von Maßnahmen nach einem Unfall entnommen werden:

- Der Unterschied zwischen der potenziellen Gesamtdosis und der Inhalationsdosis ist für kleinere Entfernungen vom Unfallort (150 m und 250 m) größer als für weitere Entfernungen wie 1150 m und 6250 m. Dies ist überwiegend darauf zurückzuführen, dass im Nahbereich verstärkt Partikel mit größeren aerodynamischen Durchmessern abgelagert werden, die nicht lange luftgetragen bleiben.
- So könnten Maßnahmen, die die langfristigen Expositionspfade beeinflussen, bei ca. 99 von 100 Unfällen mit Freisetzung im Entfernungsbereich bis 250 m in Ausbreitungsrichtung eine Dosisreduktion größenordnungsmäßig um den Faktor 10 und mehr bewirken. Bei den Entfernungen 1150 m und 6250 m reduziert sich die potenzielle Strahlenexposition durch Gegenmaßnahmen etwa um einen Faktor 3 und mehr. Bei der Beurteilung zu erwägender Gegenmaßnahmen sind jedoch auch die insgesamt sehr niedrigen Werte einer zusätzlichen Strahlenexposition zu berücksichtigen.
- Nur in 1150 m Entfernung vom Unfallort erreicht die Inhalationsdosis die natürliche Strahlenexposition eines Jahres (2 mSv/a), allerdings verbunden mit einer extrem niedrigen Eintrittshäufigkeit von etwa 10^{-7} pro Jahr. Bei keiner der übrigen untersuchten Entfernungen erreicht die Inhalationsdosis den 2 mSv-Wert.
- Der Anteil von Unfällen mit Freisetzung, die bei den Entfernungen 150 m und 250 m ohne Gegenmaßnahmen zu einer die natürliche Strahlenexposition überschreitenden potenziellen Strahlenexpositionen führen, ist kleiner als 10^{-3} . In 1150 m Entfernung wäre dies in weniger als fünf von 1000 Unfällen mit Freisetzung der Fall, bei größeren Entfernungen um 6000 m gar nicht.
- Auch bei Straßentransportunfällen bewegen sich die berechneten Strahlenexpositionen weit unterhalb von Dosiswerten, bei denen Notfallschutzmaßnahmen erwo-gen werden müssten.

8.6.4 Szenarium: 80 % Schienen- / 20 % Straßentransport

Im Folgenden werden die Ergebnisse der probabilistischen Risikoanalyse von Transportunfällen in der Endlagerregion für das realistische Anlieferungsszenarium dargestellt, das von einer bestimmten Aufteilung des Abfallbeförderungsaufkommens auf die beiden Verkehrsträger Straße und Schiene ausgeht und dem Sachverhalt Rechnung

trägt, dass alleine aus verkehrstechnischen Gründen (z. B. fehlender Schienenanschluss des Ablieferers) eine ausschließliche Anlieferung auf dem Schienenweg ausgeschlossen werden kann. Nach Abschnitt 6.1 erfolgt die Abfallanlieferung im Endlager Konrad vorrangig auf dem Schienenwege; dabei entfällt auf die Schienenbeförderung ein Anteil von etwa 80 % und auf die Straßenbeförderung der Anteil von etwa 20 %.

Die Ergebnisse der entsprechenden Transportunfallrisikoanalyse sind in Abb. 8.20 zusammengefasst, und zwar für die über einen Zeitraum von 50 Jahren nach Unfallereignis summierte effektive Gesamtdosis über alle Expositionspfade, die ohne Gegenmaßnahmen, z. B. durch lokal und zeitlich begrenzte Einschränkungen bei der Verwertung dort angebauter Nahrungs- und Futtermittel, resultieren kann. Die Kurvenverläufe resultieren aus der Überlagerung von COSYMA-Rechnungen für insgesamt 40 repräsentative Freisetzungsklassen mit jeweils 20 Klassen für Transportunfälle beim Güterzugtransport und beim Straßentransport. Die in Tab. 8.11 aufgeführten erwarteten Eintrittshäufigkeiten der einzelnen Freisetzungsklassen für den kombinierten Transport sind in den komplementären Häufigkeitsverteilungen von Abb. 8.20 berücksichtigt. Dabei wurden die für 80 % Schienentransport in Tab. 8.11 ausgewiesenen erwarteten Eintrittshäufigkeiten der Freisetzungsklassen verwendet. Die erwarteten Eintrittshäufigkeiten der Freisetzungsklassen bei Straßentransportunfällen liegen höher als bei Schienentransportunfällen. Darin kommt die höhere Eintrittshäufigkeit von Unfällen pro gefahrenen LKW-km beim Straßenverkehr im Vergleich zum Eisenbahnwagen-km beim Güterzugverkehr zum Ausdruck. Dies ist auch an den in Tab. 8.11 angegebenen erwarteten Häufigkeiten für Unfälle mit Freisetzung von $1,8 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr bei 80 % Schienentransport und $3,7 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr bei 20 % Straßentransport erkennbar.

Ebenso wie bei den Transportszenarien 100 % Schiene und 100 % Straße liefert die Ingestion unter der Annahme ausschließlicher Versorgung mit lokal angebauten Nahrungsmitteln auch beim 80/20-Szenarium den größten Beitrag zur Strahlenexposition und die Rangfolge der anderen Expositionspfade – γ -Bodenstrahlung, Inhalation, Resuspension und γ -Submersion – bleibt ebenfalls unverändert. Weiterhin bleiben natürlich auch die in den Tabellen Tab. 8.13 und Tab. 8.14 für beide Unfallbelastungen (mit und ohne Brand) ausgewiesene Rangfolgen der wichtigsten Radionuklide erhalten.

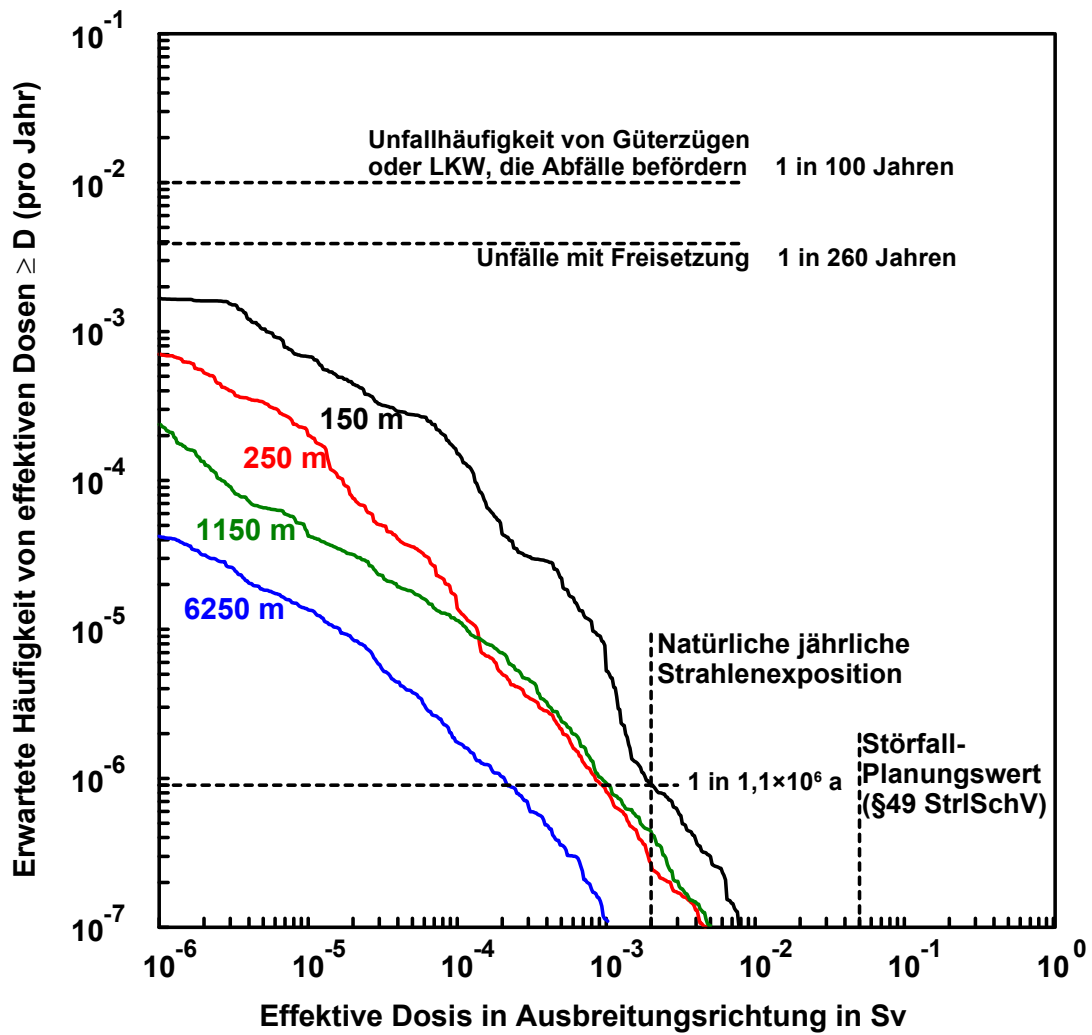


Abb. 8.20 Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis)
 – 80 % Schienentransport/20 % Straßentransport
 – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)

Abb. 8.20 können u. a. folgende Informationen entnommen werden:

- Im Vergleich zu den komplementären Häufigkeitsverteilungen beim hypothetischen Anlieferungsszenarium 100 % Schiene in Abb. 8.13 fallen die erwarteten Häufigkeiten für Unfälle mit Freisetzung und für effektive Gesamtdosen, die sich im Bereich der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres bewegen, höher aus. Dagegen liegen die komplementären Häufigkeitsverteilungen beim Transportmodus 100% Straße (Abb. 8.17) für alle betrachteten Entfernungen vom Unfallort komplett oberhalb des kombinierten Transportmodus 80 % Schiene / 20 % Straße.
- Darin drückt sich die Tatsache aus, dass die erwartete Wahrscheinlichkeit einer unfallbedingten Freisetzung bei Straßentransporten deutlich höher ist als bei Schienentransport (siehe Abschnitt 8.5).
- Mit einer Eintrittshäufigkeit von ca. $9 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr, d. h. bei hypothetischem kontinuierlichem Betrieb des Endlagers im Mittel alle 1 100 000 Jahre, wäre in der Endlagerregion beim kombinierten Transportmodus mit einem Transportunfall zu rechnen, der ohne Gegenmaßnahmen bei 150 m Entfernung in Ausbreitungsrichtung zu Strahlenexpositionen im Bereich der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres in Höhe von etwa 2 mSv/a führen könnte. Zum Vergleich: Bei 100 % Bahnbeförderung ergibt die Transportrisikoanalyse eine geringere erwartete Eintrittshäufigkeit. Demnach treten solche Auswirkungen im Mittel nur alle 3 000 000 Jahre auf. Bei 100 % Straßenbeförderung ist die Eintrittshäufigkeit größer, d. h. Unfallereignisse, die zu Strahlenexpositionen im Bereich der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres führen können, werden im Mittel alle 350 000 Jahre erwartet.
- Für das hier betrachtete wahrscheinliche 80/20-Szenarium zeigen die in Abb. 8.20 dargestellten kumulativen Häufigkeitsverteilungen für die ausgewählten Entfernungen vom Unfallort, dass das Risiko potenzieller Strahlenexpositionen in Folge von Transportunfällen sehr gering ist. So würden schon bei der Referenzentfernung von 150 m vom Unfallort in 9 von 10 Unfallereignissen, die zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe führen, berechnete Strahlenexpositionen unterhalb von $30 \mu\text{Sv}$ bleiben und in 99 von 100 solcher Ereignisse immer noch unterhalb von $300 \mu\text{Sv}$. Die ausgeprägte Entfernungsabhängigkeit potenzieller Strahlenexpositionen im Nahbereich lässt sich aus dem Vergleich mit der Kurve für 250 m erkennen: Da wären in 9 von 10 Unfallereignissen mit Freisetzung berechnete Folgedosen unter $3 \mu\text{Sv}$ und in 99 von 100 Fällen unterhalb von $30 \mu\text{Sv}$.

- Die höchste für das realistische Transportszenarium ausgewiesene potenzielle Gesamtexposition inklusive Ingestion bei einer Eintrittshäufigkeit von 10^{-7} pro Jahr (im Mittel alle 10 Millionen Jahre) beträgt im Entfernungsbereich 250 m bis etwa 1000 m ca. 5 mSv für den Erwachsenen (Schnittpunkt der rot und grün dargestellten Häufigkeitsverteilungen mit der Abszissenachse). Ergänzend durchgeführte Sensitivitätstests für andere Altersgruppen unter Einbeziehung aller Freisetzungsklassen und Ausbreitungssituationen haben gezeigt, dass die potenzielle Strahlenexposition für jüngere Altersgruppen jeweils dicht bei den Ergebnissen für den Erwachsenen liegt, sofern man den Expositionspfad Ingestion ausschließt. Nur wenn man zusätzlich zu den ohnehin konservativen Modellannahmen die unrealistische Annahme trifft, dass ab einer Entfernung von 250 m keine Verzehrseinschränkungen oder sonstigen Maßnahmen ergriffen werden, würde sich für einen Säugling (Alter 0 - 1 Jahr) bei einer Eintrittshäufigkeit von 10^{-7} pro Jahr rechnerisch eine maximal um den Faktor 3 höhere potenzielle Gesamtdosis von 15 mSv ergeben. Diese Dosis läge immer noch deutlich unter dem hilfsweise zur Beurteilung herangezogenen Störfallplanungswert von 50 mSv. Gleichzeitig würde aber die zugehörige, bereits beim Erwachsenen extrem geringe erwartete Eintrittshäufigkeit von 10^{-7} pro Jahr tatsächlich auf Grund des niedrigen Bevölkerungsanteils der Altersgruppe 0 - 1 Jahr und der damit verbundenen geringen Aufenthaltswahrscheinlichkeit noch niedriger sein.

8.6.5 Übergabebahnhof Beddingen

Für das zu erwartende und zwei hypothetische Anlieferungsszenarien wurde in den vorangegangenen Abschnitten das Transportunfallrisiko durch Diagramme mit kumulativ komplementären Häufigkeitsverteilungen potenzieller Strahlenexpositionen dargestellt und diskutiert. Was das mögliche Unfallgeschehen beim Rangieren von Abfallwagen auf dem Übergabebahnhof Beddingen betrifft, so wurde dafür eine sicher pessimistische Analyse möglicher Freisetzungen und deren zu erwartender Häufigkeiten durchgeführt. Dazu gibt Abb. 8.8 eine Übersicht über die Höhe der Freisetzung relevanter Radionuklide für die vom Simulationsprogramm ermittelten 20 Freisetzungsklassen und deren bedingte Wahrscheinlichkeiten – einen Unfall mit Freisetzung vorausgesetzt.

Ein Vergleich mit der entsprechenden Darstellung in Abb. 8.7 zum Szenario 100 % Straßentransport zeigt, dass bei Straßentransportunfällen die Aktivitätsfreisetzungen fast durchgehend ungünstiger sind und insbesondere bei den höheren Nummern der

Freisetzungskategorien 1 bis 10 (rein mechanische Beaufschlagung) und 11 bis 20 (mechanisch und thermisch) überwiegend abdeckend sind. Das erklärt sich im Wesentlichen dadurch, dass bei Rangierunfällen auch in Beddingen nur das Auftreten der untersten drei der insgesamt neun Belastungsklassen zu unterstellen ist. Auch hinsichtlich der erwarteten absoluten Häufigkeiten von Unfällen, bei denen eine Freisetzung radioaktiver Stoffe angenommen wird, stehen sich eine Häufigkeit von $1,7 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr (100 % Straßentransport) und von $4,7 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr (Rangierbetrieb bei 100 % Schienentransport) gegenüber, so dass vom Rangierbetrieb keine ungünstigeren potenziellen Konsequenzen zu erwarten sind.

Die obige Aussage lässt sich auch auf das als realistisch angesehene, gemischte Beförderungsszenarium (80 % Schiene/20 % Straße) ausdehnen. Da dort der Anteil der jährlich beförderten Abfallwagen gegenüber der Annahme bei der Abschätzung für den Rangierbetrieb um 20 % niedriger ist, würde die Freisetzungshäufigkeit aus Rangierunfällen entsprechend nur $0,8 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr beitragen. Diese Häufigkeit liegt unterhalb der Freisetzungshäufigkeit des kombinierten Beförderungsszenariums von $3,9 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr. Wie bereits in Abschnitt 8.5 ausgeführt, sind die Freisetzungsklassen sowohl bei 100 % Schienentransport als auch bei 100 % Straßentransport zum Teil deutlich höher als bei Rangierunfällen. Damit gilt dies auch für die Kombination beider Verkehrsträger, so dass der Risikobeitrag aus Rangierunfällen deutlich niedriger als aus den eigentlichen Transportunfällen ist. Auch aus dieser Sicht kann daher auf eine separate Berechnung der potenziellen Konsequenzen verzichtet werden.

Die in der Abb. 8.20 für das 80/20-Szenarium dargestellten entfernungsabhängigen Kurvenscharen würden sowohl bezüglich der potenziellen Konsequenzen als auch der assoziierten Eintrittshäufigkeiten das Rangierunfallrisiko abdeckend beschreiben. Danach würden sich auch bei Rangierunfällen mögliche Strahlenexpositionen von Personen bei sehr niedrigen Werten bewegen. Selbst im Falle äußerst selten zu erwartender besonders ungünstiger Unfallkonstellationen mit Eintrittshäufigkeiten unterhalb von 10^{-6} pro Jahr würden über alle Expositionspfade summierte Strahlenexpositionen unterhalb derjenigen bleiben, die eine Person im Mittel in Deutschland während eines Jahres durch natürliche Strahlenexposition erhält.

8.7 Bewertung der Transportunfallrisiken

In den vorangegangenen Abschnitten sind die Ergebnisse zum Unfallrisiko vorgestellt und diskutiert worden. Die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen sind Folgedosen, die ohne Einleitung von Gegenmaßnahmen, z. B. durch lokal und zeitlich begrenzte Einschränkungen bei der Verwertung dort angebauter Nahrungs- und Futtermittel, summiert über einen Zeitraum von 50 Jahren nach dem Unfallereignis resultieren können. Für die wahrscheinliche Anlieferungsvariante, bei der 80 % der Abfälle auf der Schiene und 20 % auf der Straße zum Endlager befördert werden, zeigen die in Abb. 8.20 dargestellten Kurvenverläufe für die ausgewählten Entfernungen vom Unfallort, dass das Risiko potenzieller Strahlenexpositionen in Folge von Transportunfällen sehr gering ist. So würden schon bei der Referenzentfernung von 150 m vom Unfallort in 9 von 10 Unfallereignissen, die zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe führen, berechnete Strahlenexpositionen unterhalb von 30 μSv bleiben und in 99 von 100 solcher Ereignisse immer noch unterhalb von 300 μSv . Die ausgeprägte Entfernungsabhängigkeit im Nahbereich lässt sich aus dem Vergleich mit der Kurve für 250 m erkennen. Da wären in 9 von 10 Unfallereignissen mit Freisetzung berechnete Folgedosen unter 3 μSv und in 99 von 100 Fällen unterhalb von 30 μSv .

8.7.1 Konservative Annahmen der Transportunfallanalyse

Bei dieser Diskussion der Ergebnisse ist zudem noch auf die vielfältigen konservativen Annahmen und Festlegungen bei den Unfallanalysen hinzuweisen. Die Einbeziehung solcher Konservativitäten war notwendig, um entweder Beurteilungsunsicherheiten in den Ausgangsdaten und Modellannahmen zu berücksichtigen oder um Vereinfachungen in der Berechnungsmethodik abzudecken. Diese notwendigen Annahmen und vereinfachenden Festlegungen wurden überwiegend so getroffen, dass sowohl Unfallkonsequenzen als auch deren zu erwartende Eintrittshäufigkeiten in ungünstiger Richtung und reale Bedingungen weitgehend überschätzend ermittelt werden. Da schon an einigen Stellen bei der Darstellung und Begründung der Vorgehensweise bei den probabilistischen Unfallanalysen ausführlich darauf eingegangen worden ist, sollen hier nur die wesentlichen Punkte nochmals zusammengefasst werden, um ein Gesamtbild zum Grad der Abdeckung der durchgeführten Risikoanalysen zu liefern.

Bereits bei der Definition der beförderten Abfallgebilde (Referenzabfälle) wurde auf Grund teilweise nicht hinreichend detaillierter Informationen bei einigen Referenzabfäl-

len die Aktivität, das enthaltene Nuklidspektrum oder die Konditionierung in Richtung eher ungünstiger potenzieller Konsequenzen von Transportunfällen festgelegt.

Die bei Unfallereignissen auftretenden Belastungen von Abfallbehältern werden in 9 Belastungsklassen eingeordnet, die das Spektrum möglicher Kombinationen von Aufprallgeschwindigkeiten und Brandverläufen bei Transportunfällen vereinfachend unterteilen. Bei der Modellierung der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus betroffenen Abfallbehältern wird überwiegend unterstellt, dass dieser jeweils mit einer Geschwindigkeit entsprechend der oberen Grenze einer Belastungsklasse auf ein unnachgiebiges, also selber keine Energie absorbierendes Hindernis aufprallt. Beide Annahmen führen dazu, dass die auf das Abfallgebilde einwirkende mechanische Energie in vielen Fällen deutlich überschätzt wird.

Besonders ausgeprägt sind die konservativen Elemente der Unfallkonsequenzenanalyse bei der Modellierung und Quantifizierung der Freisetzung infolge eines Brandes. Nur bei einem kleinen Bruchteil der bei Transportunfällen auf der Schiene oder Straße auftretenden Brände sind Brandlasten in ausreichender Menge und in einer Konfiguration involviert, sodass bei der räumlichen Ausdehnung betroffener Abfallbehälter Brandeinwirkungen resultieren, die zu einer vollständigen Flammenumschließung mit 800 °C über Dauern von 30 min oder 60 min äquivalent sind. In den Unfallanalysen wurde hingegen jeder registrierte Brand einem der beiden Referenzbrände zugeordnet und mit diesen Annahmen eine Freisetzung radioaktiver Stoffe abgeschätzt. Bei der Bestimmung der durch einen solchen Brand (in Verbindung mit einer Vorschädigung von Abfallbehältern) hervorgerufenen Freisetzung wurden experimentell bestimmte Freisetzungsanteile für das Element Cäsium mit seinen leichter flüchtigen chemischen Formen herangezogen, um die Berechnung potenzieller Freisetzungen handhabbar und gleichzeitig konservativ zu machen. Viele andere Elemente, die als radioaktive Isotope in den Abfällen auftreten, sind hingegen bei durch einen Brand verursachten erhöhten Temperaturen von Abfallprodukten im Vergleich dazu schwerflüchtig und werden tatsächlich in wesentlich geringerem Maße freigesetzt. Die bei solchen Brandereignissen für die berechneten Freisetzungen angenommene effektive Quellhöhe von lediglich 50 m unterschätzt in den meisten Unfall- und Ausbreitungssituationen den tatsächlichen, günstigeren thermischen Auftrieb durch den Brand.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass trotz der Bemühungen, die potenziellen radiologischen Konsequenzen bei unfallbedingten Freisetzungen möglichst realistisch zu berechnen, die an verschiedenen Stellen der Berechnungen enthaltenen Konservativitäts-

ten in der Summe zu einer Überschätzung der tatsächlichen Aktivitätsfreisetzungen und radiologischen Konsequenzen aus Transportunfällen geführt haben.

8.7.2 Vergleich mit der 1991er Transportstudie Konrad

Vergleicht man beispielsweise die in Abb. 8.20 der vorliegenden Studie dargestellten Ergebnisse zum Transportunfallrisiko mit einer vergleichbaren Darstellung in der 1991er Transportstudie Konrad /GRS 91/, dort ebenfalls für ein 80/20-Szenarium, so lässt sich feststellen, dass die berechneten Strahlenexpositionen und deren zugehörige Eintrittshäufigkeiten sich zu kleineren Werten verschoben haben. Speziell für den Nahbereich am Beispiel der Kurven für 250 m Entfernung in Ausbreitungsrichtung vom Unfallort sind berechnete effektive Dosen bei gegebenem Häufigkeitsniveau deutlich niedriger. So liegen jetzt die höchsten Werte auf dem extrem niedrigen Häufigkeitsniveau von 10^{-7} pro Jahr mit ca. 5 mSv Folgedosis ohne Gegenmaßnahmen um mehr als eine Zehnerpotenz niedriger. Entsprechend betrug die Häufigkeit in /GRS 91/ für das Erreichen oder Überschreiten einer effektiven Dosis in Höhe der mittleren natürlichen Strahlenexposition eines Jahres in Deutschland ca. $3 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr und liegt jetzt bei 10^{-6} pro Jahr.

Diese Reduktion des Unfallrisikos lässt sich auf eine Reihe von Einflussgrößen zurückführen, auf die hier in qualitativer Weise eingegangen wird:

- Die 1991er Transportstudie Konrad ging von einem jährlichen Transport von 3400 Transporteinheiten aus, während die gegenwärtige Planung die jährliche Anlieferung von etwa 2300 TE vorsieht.
- Von den früheren 3400 TE/a entstammten dem damaligen Planungsstand zufolge allein 1785 TE aus rückgeführten schwach- und mittelradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente deutscher Kernkraftwerke in Frankreich und Großbritannien. Dieser Abfallstrom ist wie bereits angesprochen inzwischen nicht mehr für die Einlagerung im Endlager Konrad vorgesehen. Diese Abfälle zeichneten sich dadurch aus, dass der Anteil der Alpha-Emitter insbesondere in Form von Transuranelementen im Vergleich zu den Abfällen anderer Abfallverursacher relativ hoch war und demzufolge auch deren Beitrag zur berechneten Strahlenexpositionen.

- Durch die direkte Erhebung aktueller Abfalldaten bei den Ablieferungspflichtigen konnte ein realistischeres Bild des Abfallspektrums gewonnen werden als dies 1991 auf der Basis von Modelldaten des BfS möglich war.
- Bei der Ableitung von Aktivitätsfreisetzunganteilen aus Abfallbinden aufgrund einer mechanischen Belastung gemäß den Definitionen der Belastungsklassen mussten Annahmen dem damaligen Kenntnisstand entsprechend getroffen werden. Dabei wurden unzureichende Kenntnisse durch (teils erhebliche) konservative Annahmen kompensiert. Seit den 1990er Jahren sind jedoch bedeutsame Fortschritte durch ein systematisches experimentelles Untersuchungsprogramm erzielt worden /LAN 07/. Dadurch konnten in der vorliegenden Studie bezüglich des Freisetzungsverhaltens aus Abfallbinden unter mechanischer Lasteinwirkung und den dafür relevanten Freisetzunganteilen und Partikelgrößenverteilungen experimentell gut abgesicherte Daten verwandt werden. Die verwendeten Freisetzunganteile liegen um mehr als einen Faktor 10, teilweise sogar um mehr als einen Faktor 100 unter denen der Vergangenheit. Das wirkt sich insbesondere bei den berechneten Strahlenexpositionen für kleinere Entfernungen vom Freisetzungsort (150 m, 250 m) aus.
- Das in dieser Studie zur Beschreibung des Ausbreitungs- und Ablagerungsverhaltens verwandte physikalisch realistischere Partikelsimulationsmodell LASAT führt demgegenüber insbesondere bei bodennaher Freisetzung und für Partikel mit größeren aerodynamischen Durchmessern zu höheren bodennahen und abgelagerten Aktivitätskonzentrationen im Vergleich zum früher eingesetzten Gauß-Fahnenmodell. Dadurch wird der Effekt reduzierter Freisetzungsteile jedoch nur zu einem Teil kompensiert.

8.7.3 Einordnung und Bewertung

Die Ergebnisse zum Transportunfallrisiko liegen in Form von Häufigkeitsverteilungen vor, aus denen der Zusammenhang zwischen der Höhe möglicher Strahlenexpositionen und der erwarteten Häufigkeit ihres Eintritts ersichtlich wird. Diese Art der Risikoermittlung erfasst sowohl vergleichsweise harmlose Transportunfälle, bei denen die Freisetzung radioaktiver Stoffe geringfügig ist, als auch besonders ungünstig gelagerte Unfallabläufe mit vergleichsweise hohen Freisetzungen und die damit verbundenen potenziellen Strahlenexpositionen. Erst aus der gleichzeitigen Information, mit welcher

Häufigkeit bestimmte Unfallauswirkungen in der Endlagerregion zu erwarten sind, lassen sich Schlussfolgerungen zum Risiko von Transportunfällen ziehen.

Erwartete Häufigkeiten sind in den Abb. 8.11 bis Abb. 8.20 bis zu einem unteren Häufigkeitsniveau von 10^{-7} pro Jahr aufgeführt. Diese Zahl bedeutet, dass bezogen auf das Abfalltransportaufkommen eines Jahres die Wahrscheinlichkeit 1 zu 10 Millionen beträgt, dass es in der Endlagerregion zu einem Unfallereignis mit den ausgewiesenen Konsequenzen kommen kann. So niedrige Ereigniseintrittswahrscheinlichkeiten von Vorkommnissen lassen sich etwas leichter einordnen, wenn man diese Zahlenangabe mit anderen seltenen Vorkommnissen vergleicht. So übersteigt beispielsweise die statistisch zu erwartende Häufigkeit, dass eine Person in dem betrachteten Gebiet von 25 km Umkreis durch einen Blitzschlag getötet wird, etwa 0,03 pro Jahr und ist damit um mehr als einen Faktor 300 000 größer als die niedrigste ausgewiesene Ereignishäufigkeit in den Risikodarstellungen der vorliegenden Studie.

Die in den Abb. 8.11 bis Abb. 8.20 ausgewiesenen erwarteten Eintrittshäufigkeiten für bestimmte Unfallauswirkungen wie Strahlenexpositionen beziehen sich auf den gesamten Umkreis von 25 km Radius um den Standort des geplanten Endlagers Konrad. Damit wird eine Aussage zum Unfallrisiko in diesem gesamten Gebiet gemacht. Das Individualrisiko von einzelnen Bewohnern in dieser Region, durch einen Abfalltransportunfall betroffen zu sein, ist sehr viel kleiner.

Das Individualrisiko soll hier als grobe Orientierung abgeschätzt werden, wobei es nur darum geht, die Größenordnung dieses Risikos in etwa zu erfassen: Aus Abb. 8.20 ergibt sich für das realistische 80/20-Szenarium, dass die Häufigkeit eines Abfalltransportunfalls in der Standortregion etwa 10^{-6} pro Jahr beträgt, bei dem für Entfernungen um 150 m in der Hauptausbreitungsrichtung – und mit größerem Abstand weiter abnehmend – als Unfallfolge Strahlenexpositionen auftreten können, die der mittleren natürlichen Strahlenexposition eines Jahres von etwa 2,1 mSv/a entspricht oder diese übersteigt. Dabei sind bei den berechneten Strahlenexpositionen keine Gegenmaßnahmen in Bezug auf die langfristigen Expositionspfade wie Bodenstrahlung und Ingestion unterstellt worden.

Transportunfälle können sich irgendwo auf den Transportstrecken ereignen. Betrachtet man vereinfachend eine Streckenlänge von 40 km, auf der in der Endlagerregion Abfalltransporte stattfinden, und einen beiderseitigen Korridor von 250 m Tiefe entlang der Transportstrecke, so wohnen in diesem unmittelbaren Nahbereich etwa 10 000

Personen, wenn man von einer typischerweise entlang von Bahnstrecken und Fernstraßen gegenüber dem Bundesdurchschnitt erhöhten mittleren Bevölkerungsdichte von 500 Einwohnern/km² ausgeht. Ereignet sich irgendwo auf der benachbarten Transportstrecke ein Unfall, so wäre bis zu einer Entfernung von wiederum 250 m eine Fläche in Ausbreitungsrichtung betroffen, die etwa einem Sektor mit 30° Öffnungswinkel entspricht. Das wäre eine Fläche von etwa 0,02 km². Auf einem Gebiet dieser Größe wohnen im statistischen Mittel 10 Personen, wenn man wiederum von einer mittleren Bevölkerungsdichte von 500 Einwohnern pro km² ausgeht. Damit bewegt sich das Individualrisiko der unmittelbaren Transportstreckenbewohner durch einen Abfalltransportunfall, eine zusätzliche Strahlenexposition zu erhalten, die im Bereich der natürlichen Strahlenexposition eines Jahres liegt, unabhängig von der angenommenen Bevölkerungsdichte bei 10⁻⁹ pro Jahr.

Diese Zahlenangabe soll nur als grobe Orientierung über die Größenordnung verstanden werden, in der sich das angesprochene Individualrisiko bewegt. Stellt man zur Einordnung dieser Zahlenangabe dem einmal das jährliche Individualrisiko gegenüber, durch den Straßenverkehr schwer verletzt zu werden, so bewegt sich dieses Risiko in einer ganz anderen Größenordnung: Gegenwärtig werden in Niedersachsen pro Jahr ca. 7000 Schwerverletzte im Straßenverkehr registriert bei einer Bevölkerung von rund 8 Millionen Einwohnern. Daraus folgt ein Individualrisiko von etwa 8·10⁻⁴ pro Jahr, durch einen Straßenverkehrsunfall schwer verletzt zu werden. Ohne hier eine zusätzliche Strahlenexposition von der Größenordnung der natürlichen jährlichen Strahlenexposition mit einer schweren Unfallverletzung in irgendeiner Weise vergleichen zu wollen, lässt sich aus dem obigen Zahlenvergleich unmittelbar ersehen, dass das zusätzliche Individualrisiko aus möglichen Abfalltransportunfällen im Vergleich zu anderen Risiken wie des Straßenverkehrs um Größenordnungen niedriger liegt und im Vergleich dazu untergeordnete Bedeutung hat.

9 Literatur

/BAST 06/ Bundesamt für Straßenverkehr (BAST): Streckenbezogene Analysen der Unfälle auf Bundesautobahnen: Signifikante Unfallhäufungen auf BAB, Unfälle mit Personenschaden 2006, http://www.bast.de/nn_42740/DE/Aufgaben/abteilung-u/referat-u2/analyse/analysen.html, zuletzt besucht: 23.01.2009

/BAST 07/ Bundesamt für Straßenverkehr (BAST): Straßenverkehrszählung 2005: Ergebnisse (Kathmann, T. et al.), BAST-Bericht V 164, 2007

/BAY 06/ Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) (Hrsg.): Radioaktivität, Röntgenstrahlen und Gesundheit.; Druck: Medienhaus Mintzel-Münch GmbH, Hof, Oktober 2006

/BFS 95/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995) - Schachanlage Konrad -, BfS (Hrsg.), Salzgitter, Bericht ET-IB-79, Dez. 1995

/BMU 07a/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Artikel 1 der Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung) in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001, BGBl. I S. 1714, ber. BGBl. I, 2002, S. 1459, zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I 2007, Nr. 65, S. 2930)

/BMU 07b/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Unterrichtung durch die Bundesregierung: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2006. Parlamentsbericht 2006, 16. Wahlperiode, Drucksache 16/6835, 23.10.2007

/HER 88/ Ehrhardt, J. et al.: The Program System UFOMOD for Assessing the Consequences of Nuclear Accidents, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 4330, Oktober 1988

- /EUR 90/ COSYMA - A New Program Package for Accident Consequence Assessment; A Joint Report by KfK and NRPB, EUR-13028/EN, 1990
- /FET 91/ Fett, H. J. und Lange, F.: Häufigkeit von Bahnbetriebsunfällen im Güterzugverkehr der Deutschen Bundesbahn, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht GRS-82, Juli 1991
- /FRA 07/ Frasch, G.; Kammerer, L. und Stegemann, R.: Fliegen und Höhenstrahlung. In: Umweltmedizinischer Informationsdienst.; Druck: Umweltbundesamt (UBA), 2007, Heft 2/2007, S. 15 - 19
- /GRS 91/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS): Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad (Lange, F.; Gründler, D.; Schwarz, G.), Bericht GRS-84, Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 1991
- /GRS 07/ Lange, F. et al.: Assessment, Evaluation and further Development of the Safe Transport of Radioactive Material - Final Report of the Research Project SR 2497 (Working Area 4) „Methods and Tools applied for Radioactive Material Transport Risk Analysis Purposes“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, GRS-A-3378/IV, June 2007
- /HAN 80/ Hanna, S. R.: Measured σ_y and σ_z in Complex Terrain near the TVA Widows Creek, Alabama, Steam Plant, Atmospheric Environment, Vol. 14, pp. 401 – 407, 1980
- /HAN 82/ Hanna, S. R.; Briggs, G. A.; Hosker, Jr., R. P.: Handbook on Atmospheric Diffusion; Technical Information Center, U. S. Department of Energy, DOE/TIC-11223, 1982
- /HAS 95/ Hasemann, I.; Jones, J. A.: COSYMA User Guide, Version 95/1, EUR-13045, KfK 4331 B, 1995
- /IAEA 96/ International Atomic Energy Agency (IAEA): International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, 1996

- /IAEA 05/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Requirements No. TS-R-1, IAEA, Vienna, 2005
- /ICRP 90/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP Volume 21/1-3, Elsevier, April 1991
- /ICRP 07/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): ICRP Publication 101: Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection, April 2007
- /ICRP 08/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): ICRP Publication 103: Recommendations of the ICRP, Annals of the ICRP Volume 37/2-4, Elsevier, Februar 2008
- /JAN 98a/ Janicke, L.: LASAT 2.8 - Modellbeschreibung, Version 2.8. Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik, Dunum, 1998
- /JAN 98b/ Janicke, L.: Ausbreitungsmodell LASAT – Arbeitsbuch. Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik, Dunum, 1998
- /JAN 00/ L. Janicke: A random walk model for turbulent diffusion. Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik, Dunum, Berichte zur Umweltphysik, Nummer 1, Auflage 1, August 2000, (Print), ISSN 1439-8222, (Internet), ISSN 1439-8303
- /KUG 07/ Kugel, K. und Brennecke, P.: Anfall radioaktiver Abfälle in Deutschland - Abfallerhebung für das Jahr 2004 und Prognose des zukünftigen Abfallanfalls bis zum Jahr 2080, KONTEC 2007 (Tagungsband), 21.-23. März 2007, Hamburg (Germany)

- /LAN 07/ Lange, F.; Martens, R.; Nolte, O.; Lödding, H.; Koch, W.; Hörmann, E.:
Testing of Packages with LSA Materials in very Severe Mechanical Impact
Conditions with Measurement of Airborne Release, Intern. Journ. on Pack-
aging, Transport, Storage and Security of Radioactive Material, Vol. 18,
No. 2, pp. 59 – 71(13), 2007
- /MIL 07/ Miller, J. J. et al.: Characterizing Potential Exposure to the Public from Low-
Level Radioactive Waste Transportation by Truck, Health Phys. 93(6): 645-
655; 2007
- /NEU 93/ Neuhauser, K. S. and Kanipe, F. L.: RADTRAN 4, Volume II: Technical
Manual, Sandia National Laboratories, Albuquerque (USA), SAND89-2370,
August 1993
- /PSE 85a/ Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE) - Abschlussbericht, Fach-
band 9, 1985
- /PSE 85b/ Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Bestimmung des Straßen-
transportrisikos bei der Entsorgung durch ein Nukleares Entsorgungszen-
trum (Tully, A. et al.), Integriertes Entsorgungskonzept oder Andere Ent-
sorgungstechniken, Endbericht, Januar 1985
- /SCH 04/ Schwarz, G. et al.: Radiation Exposures of Workers and the Public asso-
ciated with the Transport of Radioactive Material in Germany, PATRAM 04
(Proceedings), Berlin 2004
- /STE 02/ Steinman, R. L. et al.: A Comparison of Transient Dose Model Predictions
and Measurements, Health Physics 83(4), 504-511, 2002
- /VDI 02/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie, Messwertgestütz-
te Turbulenzparameterisierung für Ausbreitungsmodelle. Kommission Rein-
haltung der Luft im VDI und DIN, VDI 3783, Blatt 8, Dezember 2002, Beuth-
Verlag, Berlin, 2002
- /VOG 81/ Vogt, K. J.; Straka, J.; Geiß, H.: Ein Modell zur Berechnung der Ausbrei-
tung von Luftemissionen bei variierenden Wetterbedingungen. KFA Jülich,
ZST-Bericht Nr. 339, 1981

/WEI 91/ Weiner, R. F. and Neuhauser, K. S.: Conservatism of RADTRAN Line-Source Model for Estimating Worker Exposures, Sandia National Laboratories, Albuquerque (USA), SAND91-2601C TTC-119, 1991

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Geplante Anlagen des Endlagers Konrad über Tage – Bereich Konrad 2 (Quelle: BfS).....	6
Abb. 4.1	Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Quelle: FZK)	19
Abb. 4.2	Betonbehälter (links) und Gussbehälter (rechts) (Quelle: BfS)	23
Abb. 4.3	200 l-Blechfässer (Quelle: HDB)	24
Abb. 4.4	Konrad-Container Typ IV (Quelle: HDB)	24
Abb. 4.5	Aufschlüsselung des Abfallbestandes bzw. jährlichen Abfallbeförderungsaufkommens nach Herkunftsbereichen	29
Abb. 4.6	Prozentuale Anteile der Herkunftsbereiche des erwarteten Abfallbeförderungsaufkommens	30
Abb. 4.7	Erwartete Transporteinheiten pro Jahr nach Behältertypen sortiert	30
Abb. 4.8	Prozentuale Anteile der Gebindetypen an den Transporteinheiten	31
Abb. 4.9	Prozentuale Anteile der Herkunftsbereiche am Bruttovolumen der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.....	33
Abb. 5.1	Häufigkeitsverteilung der Aktivität pro Transporteinheit (Mittelwerte je Referenzabfall)	37
Abb. 5.2	Anteile der Herkunftsbereiche an der in den Abfällen enthaltenen Aktivität.....	37

Abb. 5.3	Typische Ortsdosisleistungsverteilung eines Abfallbehälters (Konrad-Container Typ IV), Abstand mittig von der Containerlängsseite	39
Abb. 5.4	Verteilung der Ortsdosisleistung (Höchstwerte an der Behälteroberfläche bzw. in 1 m Abstand) für zylindrische Gebinde (Basis: 14 830 Abfallbehälter)	41
Abb. 5.5	Verteilung der Ortsdosisleistung (Höchstwerte an der Behälteroberfläche bzw. in 2 m Abstand) für quaderförmige Gebinde (Basis: 12 324 Abfallbehälter)	41
Abb. 5.6	Typischer Verlauf der Ortsdosisleistung für eine Transportkonfiguration aus 2 Tauschpaletten mit jeweils 2 Gussbehältern auf einem Containertragwagen.....	43
Abb. 5.7	Typischer Verlauf der Ortsdosisleistung für eine Transportkonfiguration aus Containertragwagen mit 2 Konrad-Containern Typ IV	44
Abb. 6.1	Lageplan des Endlagers Konrad mit den übertägigen Betriebsanlagen Schacht Konrad 1 (Personen- und Materialbeförderung) und Schacht Konrad 2 (Annahme/Einlagerung radioaktiver Abfälle) (Quelle: BfS)	46
Abb. 6.2	Geplante Verkehrsanbindung des Endlagers Konrad (Schacht Konrad 2) an das öffentliche Verkehrswegenetz (Quelle: BfS).....	47
Abb. 6.3	Tauschpalette zur Beförderung zylindrischer Abfallbehälter, mit Anschlagmöglichkeiten für Spreadertechnik und Gabeln (Quelle: GNS).....	49
Abb. 6.4	Beispiel für den Umschlag eines quaderförmigen Abfallbehälters, hier mit Topspreadertechnik (Quelle: GNS)	49
Abb. 6.5	Für Spreadertechnik geeigneter Abfalltransportcontainer (Typ IP-2) – 20'-Open-all-Container (Quelle: GNS)	50

Abb. 6.6	Verkehrswegenetz der erweiterten Endlagerstandortregion, Autobahnen blau, Schienennetz dunkelgrau (Quelle: OpenStreetMap).....	52
Abb. 6.7	Tragwagen für Großcontainer/Wechselbehälter der Baureihe Sgjs 712 (Quelle: GNS).....	54
Abb. 6.8	Straßentransportfahrzeug für radioaktive Abfälle (Quelle: GNS)	55
Abb. 8.1	Unfallrate von Güterzügen mit Sachschäden über 1500 € mit den Anteilen der Unfallarten.....	88
Abb. 8.2	Anzahl betroffener Wagen bei relevanten Güterzugunfällen: Abhängigkeit von der Unfallart (Daten 1997 - 2001).....	92
Abb. 8.3	Anzahl betroffener Wagen bei relevanten Güterzugunfällen: Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei Unfalleintritt (Daten 1997 - 2001).....	93
Abb. 8.4	Relative Häufigkeit der Anzahl betroffener Wagen bei Rangierunfällen: Empirische Verteilung Rbf. Braunschweig 1987 - 1989	100
Abb. 8.5	Hypothetische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abfallwagenzahl in Regelgüterzügen mit mindestens einem Abfallwagen bei 100 % Schienentransport (Annahme: Ankunft in Seelze als Einzelwagen)	111
Abb. 8.6	Freisetzungsklassen für ausgewählte Radionuklide bei 100 % Schienentransport mit zugehörigen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten	120
Abb. 8.7	Freisetzungsklassen für ausgewählte Radionuklide bei 100 % Straßentransport mit zugehörigen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten	122

Abb. 8.8	Freisetzungsklassen für ausgewählte Radionuklide bei Rangierbetrieb (100 % Schienentransport) mit zugehörigen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten	124
Abb. 8.9	Standortregion des Endlagers Konrad mit 25 km-Umkreis um den Standort (roter Punkt) und Streckenführung für Schienentransport (grau hervorgehoben, Quelle: OpenStreetMap).....	127
Abb. 8.10	Standortregion des Endlagers Konrad mit 25 km-Umkreis um den Standort (roter Punkt) und längster Streckenführung für Straßentransporte (blau hervorgehoben, Quelle: OpenStreetMap).....	129
Abb. 8.11	Realistische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abfallwagenzahl in Regelgüterzügen mit mindestens einem Abfallwagen bei 80 % Schienentransport (Annahme: gruppenweise Ankunft in Seelze)	131
Abb. 8.12	Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Messhöhe 20 m über Grund) sowie der Diffusionskategorien und Regenintensität am Standort Konrad, Schacht 1, aus den Jahren 2002 bis 2006.....	141
Abb. 8.13	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Bahnbeförderung – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)	146
Abb. 8.14	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Bahnbeförderung – Alle Expositionspfade, ohne Ingestion – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)	151

Abb. 8.15	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Bahnbeförderung – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahme, 150 m und 250 m) – Nur Inhalation (alle Entfernungen).....	153
Abb. 8.16	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Bahnbeförderung – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahme, 1150 m und 6250 m) – Nur Inhalation (alle Entfernungen).....	155
Abb. 8.17	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Straßentransport – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen)	156
Abb. 8.18	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Straßentransport – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen, 150 m und 250 m) – Nur Inhalation.....	159
Abb. 8.19	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 100 % Straßentransport – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen, 1150 m und 6250 m) – Nur Inhalation.....	160
Abb. 8.20	Häufigkeitsverteilung der effektiven Lebenszeitdosis auf Grund von Abfalltransportunfällen in der Endlagerregion (25 km-Umkreis) – 80 % Schienentransport/20 % Straßentransport – Alle Expositionspfade (keine Gegenmaßnahmen).....	163

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Personendosisgrenzwerte für Arbeitskräfte und die Bevölkerung	15
Tab. 3.2	Dosisleistungsgrenzwerte für Versandstücke und Transportmittel gemäß den gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften	15
Tab. 3.3	Dosisleistungsgrenzwerte für Abfallgebinde gemäß den Endlagerungsbedingungen /BFS 95/	17
Tab. 4.1	Behältergrundtypen für die Verpackung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, nach /BFS 95/	25
Tab. 5.1	Radionuklide mit erheblichem Aktivitätsanteil bzw. hoher radiologischer Relevanz.....	38
Tab. 6.1	Anzahl der erwarteten wöchentlichen Abfalltransporte in der Endlagerstandortregion für verschiedene Anlieferungsszenarien (Basis: Anlieferung von 2300 TE pro Jahr bzw. 50 TE pro Woche bei einschichtigem Einlagerungsbetrieb)	57
Tab. 7.1	Beförderungsbedingt zu erwartende maximale Strahlenexpositionen (gerundet) der Bevölkerung (Erwachsene) aufgrund der geplanten Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad auf dem Schienen- und Straßenweg für verschiedene Anlieferungsszenarien	68
Tab. 7.2	Beförderungsbedingt zu erwartende maximale Strahlenexpositionen (gerundet) der Bevölkerung (Säugling) aufgrund der geplanten Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad auf dem Schienen- und Straßenweg.....	69

Tab. 7.3	Beförderungsbedingt zu erwartende maximale Strahlenexpositionen des Transportpersonals aufgrund der geplanten Anlieferung radioaktiver Abfälle im Endlager Konrad auf dem Schienen- und Straßenwege für verschiedene Anlieferungsszenarien.....	70
Tab. 8.1	Definitionsschema der neun Belastungsklassen.....	75
Tab. 8.2	Partikelgrößenabhängige Freisetzungsteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe.	80
Tab. 8.3	Freisetzungsteile für H-3, C-14 und Halogene (AED 0 - 10 µm) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe, w. s. N. = wie sonstige Nuklide.	81
Tab. 8.4	Relative Häufigkeit der neun Belastungsklassen bei Güterzugunfällen.....	91
Tab. 8.5	Bedingte Wahrscheinlichkeiten (Eintritt eines Unfalls vorausgesetzt) für Belastungsklassen bei Güterzugunfällen, aufgeteilt nach der Anzahl betroffener Wagen.....	96
Tab. 8.6	Bedingte Wahrscheinlichkeiten (Eintritt eines Unfalls vorausgesetzt) für Belastungsklassen bei Rangierunfällen, aufgeteilt nach der Anzahl betroffener Wagen (Bereiche ohne Ereignisse grau schattiert)	102
Tab. 8.7	Relative Häufigkeit der neun Belastungsklassen bei Straßentransportunfällen.....	105
Tab. 8.8	Anzahl von Transporteinheiten pro LKW in Abhängigkeit vom Behältertyp	115
Tab. 8.9	Vorgegebene Wahrscheinlichkeitsintervalle für die Bildung von Quelltermgruppen	117

Tab. 8.10	Übersicht zu den Parametern und zugehörigen Unfall- und Freisetzungshäufigkeiten der drei untersuchten Beförderungsszenarien	134
Tab. 8.11	Erwartete Eintrittshäufigkeiten der Freisetzungsklassen im 25 km-Umkreis des Endlagers Konrad aufgrund von Transportunfällen	136
Tab. 8.12	Repräsentative Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} und des Washout-Koeffizienten Λ_0 für verschiedenen Bereiche des aerodynamischen Partikeldurchmessers /GRS 07/	143
Tab. 8.13	Rangfolge der betrachteten Expositionspfade und Radionuklide beim Transportunfallszenario 100 % Schiene für die Entfernung 250 m	150
Tab. 8.14	Rangfolge der betrachteten Expositionspfade und Radionuklide beim Transportunfallszenario 100 % Straßentransport für die Entfernung 250 m.....	158

Abkürzungsverzeichnis

ABK	Abfallbehälterklasse
ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
AED	Aerodynamischer Äquivalentdurchmesser
AGG	Abfallgebindegruppe
APG	Abfallproduktgruppe
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG)
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSS	International Basic Safety Standards der IAEO
BW	Bundeswehr
BK	Belastungsklasse
DB	Deutsche Bundesbahn
DB AG	Deutsche Bahn AG
DR	Deutsche Reichsbahn
CCFD	kumulativ-komplementäre Häufigkeitsverteilung; engl.: Complementary Cumulative Distribution Function
Euratom	Europäische Atomgemeinschaft
EWN	Energiewerke Nord GmbH
FK	Freisetzungsklasse
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GGBefG	Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz - GGBefG)
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
HDB	Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe des FZK
HMI	Hahn-Meitner-Institut Berlin
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation; engl.: IAEA, International Atomic Energy Agency
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission; engl.: International Commission on Radiological Protection
IP	Industrierversandstück; engl.: Industrial Package

ISO	Internationale Organisation für Normung; engl.: International Organization for Standardization
KKW	Kernkraftwerk
LKW	Lastkraftwagen
LSA	Stoffe mit geringer spezifischer Aktivität; engl.: Low Specific Activity Material
LSS	Landessammelstelle
NCS	Nuclear Cargo + Service GmbH
ODL	Ortsdosisleistung
PFB	Planfeststellungsbeschluss
Rbf	Rangierbahnhof
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)
TE	Transporteinheit
Tfz	Triebfahrzeug
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.
ZESAM	Zentrale Sammelstelle für radioaktive Abfälle der Bundeswehr

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de