TÜV Rheinland Industrie Service GmbH
Bereich Energiesysteme und Automation
Kerntechnik und Strahlenschutz

TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

Stellungnahme

zu

den radiologischen Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes auf den Forschungsreaktor TRIGA Mainz

Auftraggeber:	Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung des Landes Rheinland-Pfalz
Veranlasser:	Forschungsreaktor TRIGA Mainz
TÜV-Aktenzeichen:	T17.27.1.4
TÜV-Auftrags-Nr.:	10900811
Bearbeiter:	Dr. Margot Horn Dr. Philipp Lodomez Dr. Karsten Hilgers Dipl.-Ing. Norbert Kohtz
Geschäftsfeld:	Strahlenschutz Kerntechnik
Seitenzahl:	30
Datum:	30.11.2012

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Kerninventar 5

3 Standort 6

4 Freisetzung radioaktiver Stoffe infolge eines Flugzeugabsturzes 7

4.1 Freisetzung ohne Treibstoffbrand 9

4.2 Freisetzung mit Treibstoffbrand 10

5 Radiologische Auswirkungen 11

5.1 Annahmen zur Berechnung der Störfalldosen 11

5.2 Vergleichsrechnung der radiologische Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes 12

5.3 Eigene Berechnungen der radiologische Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes 15

5.3.1 Radiologische Auswirkungen ohne Treibstoffbrand 17

5.3.2 Radiologische Auswirkungen mit Treibstoffbrand 20

6 Zusammenfassung 26

7 Verwendete Unterlagen 28

1 Einleitung

In der Folge des Reaktorunfalls in Fukushima hat die Reaktorsicherheitskommission (RSK) eine Sicherheitsüberprüfung der Leistungsreaktoren vorgenommen. Diese hatte das Ziel, die Robustheit der Anlagen insbesondere gegen äußere Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen zu überprüfen. Hierzu wurde von der Reaktorsicherheitskommission (RSK) ein Anforderungskatalog für eine Sicherheitsüberprüfung der deutschen Kernkraftwerke erstellt /1/. Auch wenn von Forschungsreaktoren, bedingt durch ein wesentlich geringeres Brennstoff- und Aktivitätsinventar, ein im Vergleich zu Kernkraftwerken geringeres Gefährdungspotential ausgeht, hat der Bundesrat in seiner Stellungnahme zum Entwurf des dreizehnten Gesetztes zur Änderung des Atomgesetzes vom 17. Juni 2011 beschlossen, dass die Sicherheitsüberprüfung auf alle kerntechnischen Anlagen ausgedehnt wird und die Überprüfung der Forschungsreaktoren mit einer thermischen Dauerleistung von mehr als 50 kW enthalten ist /2/.

Die Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU Mainz) hat mit /3/ Stellung zum RSK-Fragenkatalog für den TRIGA Mainz genommen. Auf der 447. Sitzung kommt die RSK bezüglich der Ausführungen zum Flugzeugabsturz zu folgendem Ergebnis /4/:

„Die RSK sieht es anhand der Aussagen des Betreibers als möglich an, dass Bewertungskriterien des Schutzgrads 1 oder 2 (die radiologischen Auswirkungen in der Umgebung der Anlage bleiben auch bei maximalen Lastannahmen unterhalb der Werte, die eine Evakuierung der Bevölkerung bzw. sonstige Katastrophenschutzmaßnahmen erfordern) erfüllt werden können, wobei aber die Auswirkungen von Treibstoffbränden zu berücksichtigen sind. Die zitierten Unterlagen lassen aber nicht erkennen, ob die Aussagen des Betreibers im atomrechtlichen Aufsichts- und Genehmigungsverfahren geprüft und bestätigt sind. Insofern hängt die mögliche Erfüllung des Schutzgrades von der Bestätigung der Aussage des Betreibers ab.“

Mit E-Mail vom 12.07.2012 /5/ wurde die TÜV Rheinland Industrie Service GmbH (TIS) beauftragt, auf Basis ihrer Kostenabschätzung vom 9. Juli 2012 /6/ die radiologischen Berechnungen zum Flugzeugabsturz durchzuführen.

Im Zusammenhang mit der Sicherheitsüberprüfung der Forschungsreaktoren in Deutschland durch die RSK wurde für den TRIGA Mainz für die radiologischen Auswirkungen infolge eines Flugzeugabsturzes auf Ergebnisse einer Diplomarbeit, in der die radiologischen Auswir-

kungen eines Flugzeugabsturzes auf den Forschungsreaktor TRIGA Mark II in Wien untersucht wurden /9/, zurückgegriffen. Bei diesen Betrachtungen wurde nur der Flugzeugabsturz ohne Brand untersucht. Die Störfallfolgedosen wurden als effektive Dosen für 1 Tag und als 50 Jahre Folgedosis angegeben.

In Deutschland sind für die Bewertung, ob und ggf. welche Notfallschutzmaßnahmen zu treffen sind, die Eingreifrichtwerte gemäß "Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen" /7/ zugrunde zu legen. Hierfür sind aber Expositionszeiträume von 7 Tagen, 1 Monat und 1 Jahr zu betrachten. Neben der effektiven Dosis ist auch die Schilddrüsendosis zu betrachten. Darüber hinaus ist auch zu prüfen, ob bei einem Flugzeugabsturz mit Treibstoffbrand und der damit verbundenen thermischen Erhöhung der Freisetzungshöhe im Nahbereich die Störfalldosen durch die höheren Freisetzungen aus dem Kern zu höheren Störfalldosen führen als ohne Brand.

Die TÜV Rheinland Industrie Service GmbH wurde beauftragt, auf Basis der folgenden Randbedingungen ihre radiologischen Berechnungen durchzuführen:

- Es wird nur der Absturz eines großen Flugzeuges betrachtet.
- Die Störfalldosis wird über einen Zeitraum von 50 Jahren mit dem Programm der TÜV Rheinland Industrie Service GmbH berechnet als Vergleichswert zu der ausgewiesenen effektiven Dosis in der Diplomarbeit.
- Berechnung der Störfalldosen als effektive Dosis für Expositionszeiträume von 7 Tagen, 1 Monat und 1 Jahr sowie für die Schilddrüsendosis für einen Expositionszeitraum von 7 Tagen gemäß" Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen".
- Die Störfalldosen werden mit und ohne Berücksichtigung eines Treibstoffbrandes berechnet.
- Die Störfalldosen werden mit und ohne Berücksichtigung von Regen berechnet.
- Die Abschätzungen bezüglich der Freisetzungsraten von schwerflüchtigen Radionukliden aus dem Kern bei Treibstoffbrand werden durch eine Literaturrecherche noch einmal geprüft und bei den Berechnungen berücksichtigt. Der Betreiber des TRIGA Mainz führt die Literaturrecherche durch und stellt die für die Beantwortung dieser Fragestellung relevante Literatur zur Verfügung.
- Das Kerninventar wird auch für schwerflüchtige Radionuklide seitens des Betreibers zur Verfügung gestellt.

- Die minimale zu betrachtende Entfernung für die Berechnung der Störfalldosen beträgt 200 m.

2 Kerninventar

Sachstand

Der Betreiber hat das Kerninventar des TRIGA Mainz mit denselben Methoden berechnen lassen, die auch bei der Untersuchung für den TRIGA Mark II in Wien eingesetzt worden sind. Dazu sind die 75 Brennelemente im Kern des TRIGA Mainz in 11 Gruppen mit ähnlichem Abbrand eingeordnet worden /15/. Aus jeder dieser Abbrandgruppen wurde ein repräsentatives Brennelement ausgewählt, für das je eine Rechnung mit ORIGEN 2.2 durchgeführt wurde. Bei diesen Berechnungen wurde die gesamte Einsatzgeschichte der repräsentativen Brennelemente einschließlich eventueller Abklingzeiten nachgerechnet und es wurden die Inventare an Spaltprodukten, Aktivierungsprodukten und Aktiniden einschließlich Tochterisotopen für einen Zeitpunkt unmittelbar nach Abschaltung bestimmt. Der Betreiber hat die Ergebnisse der ORIGEN-Rechnungen in Arbeitsblätter einer Excel-Datei /14/ übertragen und zusammen mit den ORIGEN-Ergebnisdaten /16/ und der Einteilung der Abbrandgruppen /15/ an die Sachverständigen übermittelt /13/. Mit getrennter E-Mail wurde auch ein Ladeplan des Reaktors /23/ übermittelt.

Bewertung

Die Sachverständigen bewerten den Einsatz des Rechenprogramms ORIGEN 2.2 für repräsentative Brennelemente mit ihrer jeweiligen Einsatzgeschichte als sachgerecht. Sie haben sich davon überzeugt, dass die in /15/ aufgeführten Brennelemente mit dem Ladeplan /23/ übereinstimmen und nur eine Abweichung gefunden, die sie nach Erläuterung durch den Betreiber als unerheblich ansehen.

Dem Ladeplan ist zu entnehmen, dass im TRIGA Mainz außer den 75 Brennelementen im Kern noch je zwei bestrahlte Brennelemente in den Raufen bzw. an der Tankwand gelagert werden. Drei weitere bestrahlte Brennelemente sind in einer der Lagergruben im Hallenboden untergebracht. Alle diese Brennelemente sind seit längerer Zeit abgeschaltet und enthalten keine kurzlebigen Radioisotope mehr. Ihr Beitrag zu den langlebigen Radioisotopen ist gemäß ihrer Anzahl im Vergleich zu Anzahl der Brennelemente im Kern für den Zweck die-

ser Untersuchung unerheblich. Die Sachverständigen stimmen daher dem Vorgehen zu, nur die Brennelemente im Kern zu betrachten.

Die Sachverständigen haben sich durch Stichproben davon überzeugt, dass der Betreiber die ORIGEN-Ergebnisse gemäß /16/ korrekt in die Excel-Arbeitsblätter /14/ übertragen hat und haben diese zur Grundlage ihrer weiteren Betrachtungen gemacht.

3 Standort

Der Forschungsreaktor TRIGA Mainz befindet sich auf dem Gelände des Gutenberg-Campus der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Das Gebäude des Forschungsreaktors grenzt direkt an das Institut für Kernchemie an (siehe Abbildung 1). Der TRIGA Mainz ist innerhalb des Campusgeländes ungefähr mittig gelegen, der minimale Abstand bis zum Stadtgebiet von Mainz beträgt ca. 200 Meter in nördlicher Richtung. Der Gutenberg-Campus befindet sich südwestlich des Stadtzentrums von Mainz in einem Abstand von ca. 1 km.

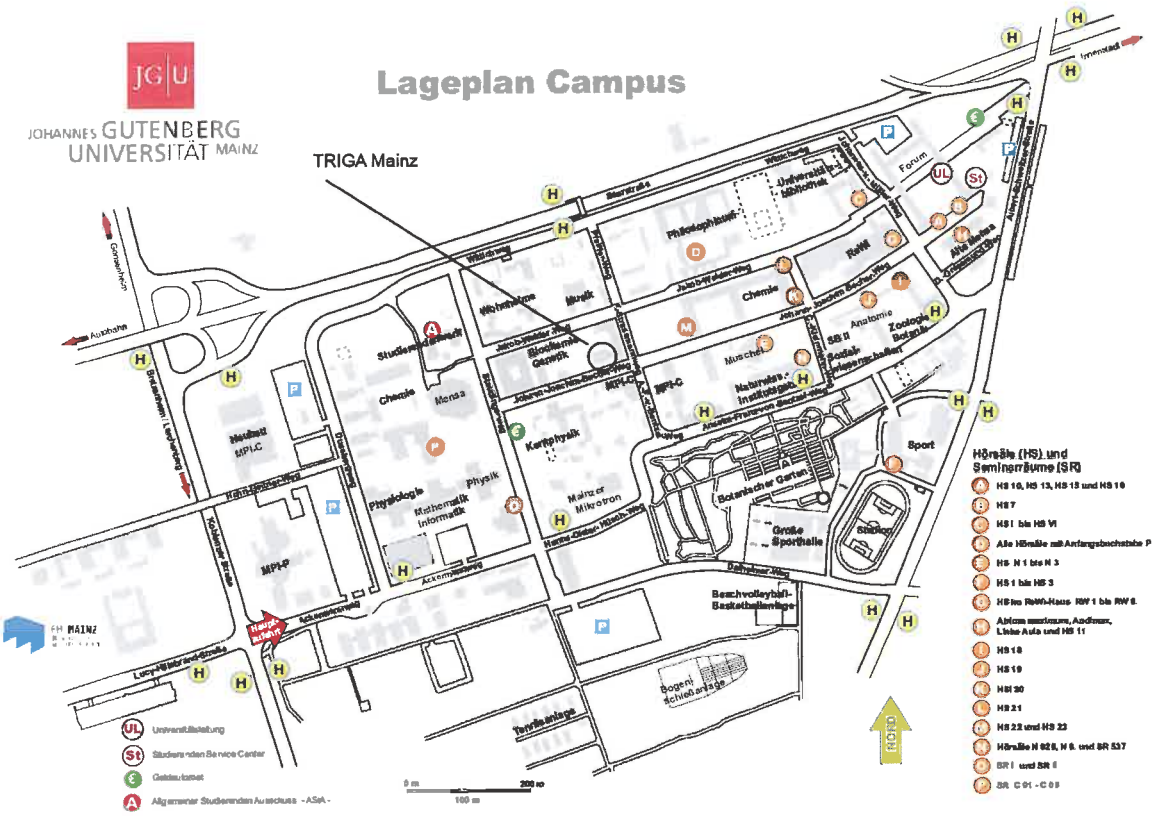

Abbildung 1: Lage des Forschungsreaktors TRIGA auf dem Campus der JGU Mainz /11/

4 Freisetzung radioaktiver Stoffe infolge eines Flugzeugabsturzes

Es wurde der Absturz eines großen Flugzeugs postuliert, wobei zwischen zwei Fällen unterschieden wurde:

1. Der Absturz zerstört das Reaktorgebäude und Teile des Reaktorbeckens. Der Absturz führt zu keinem Treibstoffbrand.
2. Der Absturz zerstört das Reaktorgebäude und Teile des Reaktorbeckens, der Reaktorkern wird in der Folge direkt einem Treibstoffbrand ausgesetzt.

Der Brennstoff von TRIGA-Reaktoren zeichnet sich im Vergleich mit dem anderer Forschungsreaktoren oder Leichtwasserreaktoren (LWR) dadurch aus, dass kleine Körnchen einer metallischen Uran-Zirkonium-Verbindung gleichmäßig in einer Zirkonhydrid-Matrix eingebettet sind. Zirkonhydrid ist für ein Metallhydrid ungewöhnlich stabil gegen Oxidation dadurch, dass sich an seiner Oberfläche eine dünne Oxidschicht bildet, die auch eine effektive Diffusionsbarriere darstellt. Bei Temperaturen oberhalb von 600 °C kommt es allerdings zunehmend zu einer thermischen Zersetzung des Zirkonhydrids. Der dabei entstehende Wasserstoff wird bis zu Temperaturen von 900 °C bis 1000 °C von der äußeren Oxidschicht zurückgehalten, danach aber zunehmend freigesetzt. Die Oxidschicht wirkt auch als Barriere gegen die Freisetzung von Spaltprodukten.

Zur Freisetzung von Spaltprodukten speziell aus TRIGA-Brennstoff liegen nur wenige Untersuchungen vor. Die Ergebnisse aus der Entwicklung des TRIGA-Brennstoffs sind in der Hersteller-Unterlage /18/ von 1980 zusammengefasst. Dort werden die zu jener Zeit verfügbaren Messwerte aus Aufheizversuchen von Brennstoffproben ohne Hüllrohre zu einer temperaturabhängigen Korrelation zusammengefasst. Die Korrelation soll für gasförmige Spaltprodukte und Iod gelten. Sie fasst zwei unterschiedliche Temperaturbereiche zusammen: einen Bereich bis ca. 300 °C mit einer temperaturunabhängigen relativen Freisetzung von $1{,}5 \times 10^{-5}$, und einen daran anschließenden bis ca. 1300 °C reichenden Bereich, in dem die relative Freisetzung bis in den hohen Prozentbereich ansteigt. Die niedrige Freisetzung bis ca. 300 °C wird damit begründet, dass bis zu diesen Temperaturen die Zirkonhydrid-Matrix und die Oxidschicht an ihrer Oberfläche eine Freisetzung aus dem Inneren des Brennstoffs verhindern und nur diejenigen Spaltprodukte freigesetzt werden, die bei ihrem Entstehen aus dem Brennstoff herausgeschleudert werden (direct recoil). Mit zunehmender Temperatur werden dann Diffusionsprozesse wirksam, die den Freisetzungsprozess zunehmend domi-

nieren. Die in /18/ angegebene Korrelation überschätzt die gemessenen Freisetzungen speziell im Temperaturbereich oberhalb von etwa 1000 °C deutlich, wie Fig. 1 von /18/ zeigt.

Die Hersteller-Unterlage /18/ wird in einem Safety Evaluation Report der U.S. NRC von 1987 /19/ zitiert und auch in dem im Jahr 2008 erschienenen IAEA-Report /17/ als Quelle für die Spaltproduktfreisetzung aus TRIGA-Brennstoff herangezogen.

Eine weitere, TRIGA-spezifische Untersuchung von 2006 /22/ berichtet im Vergleich zu den in /18/ aufgeführten relativen Freisetzungen über deutlich höhere relative Freisetzungen aus TRIGA-Brennstoff bei erhöhten Temperaturen für eine Probe mit sehr hohem Abbrand, bei der der Brennstoff nach Schwellen eine metallurgische Verbindung mit einem Incoloy 800 Cladding eingegangen war. Ursache für die höhere Freisetzung war nach Ansicht der Autoren die Bildung von niedrig schmelzenden Eutektika von Uran und Zirkonium mit Bestandteilen der Cladding-Legierung. Da die Autoren selbst in der Zusammenfassung von /22/ ausführen, dass die Ergebnisse nach /18/ die Freisetzung aus niedriger abgebranntem TRIGA-Brennstoff besser wiedergeben als ihre eigenen Ergebnisse und die Abbrände im TRIGA Mainz niedrig sind, gehen auch die Sachverständigen von der weiteren Anwendbarkeit der in /18/ aufgeführten Korrelation aus.

In der Literatur werden für andere Brennstoffe in Forschungsreaktoren (Uran-Aluminium, Uran-Silizid-Aluminium) höhere Freisetzungsraten bei erhöhten Temperaturen aufgeführt. Diese berücksichtigten jedoch nicht die besonderen Rückhalteeigenschaften der Zirkonhydrid-Matrix des TRIGA-Brennstoffs und sind daher nach Auffassung der Sachverständigen für ihre Betrachtungen nicht zutreffend.

Wie oben schon erwähnt, gelten die in /18/ aufgeführten relativen Freisetzungen nur für die Spaltedelgase und für Iod. Diese sind gemäß /17/, Kap. 3.2.2 die am leichtesten flüchtigen Spaltprodukte. In /17/ wird darüber hinaus festgestellt, dass Cäsium und Tellur aus überhitztem Brennstoff ähnlich flüchtig sind wie Iod. Von den als halbflüchtig bezeichneten Spaltprodukten wird in /17/ dem Ruthenium die relativ größte Flüchtigkeit zugeschrieben. Seltene Erden und Aktiniden (z. B. Uran und Plutonium) bleiben gemäß /17/ wegen ihrer hohen Siedepunkte im Brennstoff gelöst. Auf dieser Grundlage werden in den eigenen Berechnungen der Sachverständigen zusätzlich zu den Spaltedelgasen und zum Iod die Spaltprodukte Brom (in der Literatur gemeinsam mit Iod aufgeführt), Cäsium, Tellur und Ruthenium berücksichtigt. Konservativ wird für diese zusätzlich berücksichtigten Elemente dieselbe Freisetzungsrate wie für Iod angenommen. Gleichfalls konservativ wird die Freisetzung aus dem

Brennstoff mit der Freisetzung in die Umgebung gleichgesetzt, das heißt, es wird keine Spaltproduktrückhaltung im Gebäude bzw. seinen Trümmern angenommen.

4.1 Freisetzung ohne Treibstoffbrand

Wie oben beschrieben, wird der Unfallablauf eines Flugzeugabsturzes auf den TRIGA Mainz so postuliert, dass die besonders wirksamen Teile eines großen Flugzeugs wie Turbinen und Fahrwerksteile das Reaktorgebäude durchschlagen und das Reaktorbecken beschädigen. Ein großes Flugzeug kann aufgrund seiner Flugeigenschaften nur in einem relativ flachen Winkel zur Horizontalen auftreffen. Wie bei den Becken anderer Forschungsreaktoren ist davon auszugehen, dass der dünnwandigere obere Beckenteil bei einem direkten Treffer durchschlagen werden kann und Wandtrümmer sowie Trümmer des Reaktorgebäudes in den unteren Beckenteil fallen und den Reaktorkern mechanisch beschädigen. Eine direkte Zerstörung des unteren Beckenteils ist angesichts der großen Wanddicke nicht anzunehmen, allerdings könnte es zu Lecks an der thermischen Säule oder anderen Durchdringungen der unteren Beckenwand kommen, die zu einem Leerlaufen auch des unteren Beckenteils führen würden. Der Reaktorkern und evtl. in das Becken gestürzte Trümmer könnten demnach trocken fallen.

Im Sicherheitsbericht /20/ wird nachgewiesen, dass der Reaktorkern auf Grund seiner geringen Nachwärme auch ohne umgebendes Wasser nur durch Naturzirkulation von Luft auf einer Temperatur von ca. 300 °C gehalten wird. Je nach Größe und Menge der in das Reaktorbecken gestürzten Trümmer wird die im Sicherheitsbericht /20/ unterstellte Geometrie im hier postulierten Unfallablauf nicht mehr gegeben sein, allerdings wird der Reaktorkern zusätzlich zu den Annahmen in /20/ auch Nachwärme durch Strahlung und ggf. durch Wärmeleitung abgeben.

Insgesamt gehen die Sachverständigen davon aus, dass sich der Reaktorkern bei einem Flugzeugabsturz ohne Treibstoffbrand nicht wesentlich über 300 °C aufheizen wird. Damit gelten für die Freisetzung von Spaltprodukten die in /18/ für den niedrigeren Temperaturbereich aufgeführten relativen Freisetzungen von $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ für die Spaltedelgase und für Iod. Eine Freisetzung weniger flüchtiger Elemente ist in diesem Temperaturbereich nicht oder nur zu noch geringeren Anteilen anzunehmen, wird aber konservativ für die in Kapitel 4.2 genannten Spaltprodukte (Krypton, Xenon, Iod, Brom, Cäsium, Tellur, Ruthenium) mit derselben relativen Freisetzung von $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ unterstellt.

4.2 Freisetzung mit Treibstoffbrand

Wie im vorigen Kapitel ausgeführt, würde sich der Reaktorkern des TRIGA Mainz nach dem Verlust seines Kühlmittels infolge eines Flugzeugabsturzes nicht wesentlich über 300 °C aufheizen. Wesentlich höhere Brennstofftemperaturen und damit einhergehende höhere Spaltproduktfreisetzungen sind nur denkbar, wenn ein Treibstoffbrand direkt auf den Reaktorkern einwirken würde. Die Sachverständigen weisen darauf hin, dass eine derartige direkte Brandeinwirkung für den postulierten Ereignisablauf Flugzeugabsturz unwahrscheinlich ist, da die Brandeinwirkung nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen vorkommen könnte. So müsste das gesamte Wasserinventar des Reaktorbeckens sehr schnell verloren gehen und erst danach eine größere Treibstoffmenge direkt unter dem Reaktorkern abbrennen. Der plausiblere Ereignisablauf ist aber der, dass der Treibstoff unmittelbar mit dem Aufprall des Flugzeugs auf dem Gelände bzw. in den Gebäudetrümmern verteilt wird und sich entzündet. Gegebenenfalls wird das Oberteil des Reaktorbeckens zerstört und das Unterteil leckgeschlagen, sodass das Beckenwasser zwar ausläuft, aber nicht ohne Verzögerung verloren geht und nicht gleichzeitig durch eine brennende Treibstofflache unterhalb des Reaktorkerns ersetzt werden kann.

Detaillierte Untersuchungen der skizzierten Ereignisabläufe sind den Sachverständigen nicht bekannt, daher wird in Anlehnung an Untersuchungen zum Flugzeugabsturz auf Brennelement-Zwischenlager /21/ postuliert, dass der Reaktorkern einem Treibstoffbrand von 1100 °C ausgesetzt ist und selbst diese Temperatur annimmt.

Für diese Temperatur ist gemäß /18/ eine relative Freisetzung von 21 % des Kerninventars an Spaltedelgasen und an Iod zugrunde zu legen. Davon abweichend wird im Annex I von /17/ empfohlen, bei Freisetzungen aus zerstörtem Brennstoff von Forschungsreaktoren (ohne Differenzierung der Brennstoffarten) von einer 100 %igen Freisetzung der Spaltedelgase und einer 25 %igen Freisetzung des Iod-Inventars auszugehen. Im Sinne eines abdeckenden Vorgehens übernehmen die Sachverständigen diese relativen Freisetzungen für ihre eigenen Berechnungen zum TRIGA-Brennstoff und weisen den übrigen berücksichtigten Spaltprodukten denselben Freisetzungsanteil wie für Iod zu.

Damit werden im Weiteren beim Flugzeugabsturz mit Treibstoffbrand die folgenden Spaltprodukte und Freisetzungsraten berücksichtigt:

- Krypton, Xenon: Freisetzung 100 % des Inventars
- Iod, Brom, Cäsium, Tellur, Ruthenium: Freisetzung 25 % des Inventars

5 Radiologische Auswirkungen

5.1 Annahmen zur Berechnung der Störfalldosen

Zur Ermittlung der Störfalldosen haben die Sachverständigen eigene Berechnungen durchgeführt. Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an die Modelle und Parameter der Störfallberechnungsgrundlagen /8/, wobei eine Anpassung der Modelle und Parameter in /8/ aus dem folgenden Grund geboten ist.

Die Modelle und Parameter der Störfallberechnungsgrundlagen wurden ursächlich zur Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung bei Störfällen entwickelt. Zur Ermittlung der Strahlenexposition sind alle in der Anlage VII, Teil A StrlSchV /12/ genannten Expositionspfade zu berücksichtigen. Bei den Auslegungsstörfällen wird unterstellt, dass sich die Referenzperson nach dem Störfall u.a. bis zum fünfzigsten bzw. siebzigsten Jahr nach dem Störfall am Ort der maximalen Bodenkontamination ununterbrochen aufhält und über diesen Zeitraum eine Strahlenexposition erhält. Darüber hinaus bezieht die Referenzperson auch ihre Lebensmittel ausschließlich von dem Ort, an dem die Kontamination der Lebensmittel am höchsten ist. Auch für diesen Expositionspfad ist eine Nahrungsmittelaufnahme über einen Zeitraum von 50 bzw. 70 Jahren zu unterstellen.

Bei den auslegungsüberschreitenden Ereignissen (Unfällen) wird die Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Luft und die Ablagerung auf dem Boden üblicherweise mit den gleichen Modellen und Parametern wie bei den Auslegungsstörfällen berechnet. Auch die Berechnung der Inhalationsdosis erfolgt mit dem gleichen Modell. Die Prüfung, ob Notfallschutzmaßnahmen gemäß /7/ zu planen bzw. einzuleiten sind, erfolgt auf Basis der Störfalldosen für einen Expositionszeitraum von 7 Tagen, einem Monat und 1 Jahr (s. auch Tabelle 4). Dementsprechend ist das Modell in den Störfallberechnungsgrundlagen /8/ zur Berechnung der Strahlenexposition durch Gamma-Bodenstrahlung zu modifizieren. Eine Strahlenexposi-

tion über den Belastungspfad Ingestion ist bei auslegungsüberschreitenden Störfällen nicht zu berücksichtigen /7/.

Das von den Sachverständigen verwendete Programm zur Berechnung der Störfalldosen ist eine Eigenentwicklung und wurde seinerzeit im Rahmen eines vom VdTÜV durchgeführten Ringversuches qualifiziert und ist seit vielen Jahren im Einsatz. Das Programm zur Berechnung der Störfalldosen bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen wurde auf Basis dieses Störfallprogrammes entwickelt und wird ebenfalls seit vielen Jahren in den verschiedensten Genehmigungsverfahren verwendet.

Für die Berechnung der Strahlenexposition durch den Flugzeugabsturz werden in dem Programm die folgenden Parameter verwendet:

Trockene Ablagerung

Bei der trockenen Ablagerung werden die in den Störfallberechnungsgrundlagen /8/ genannten Ablagerungsgeschwindigkeiten angesetzt.

Nasse Ablagerung

Für den Washoutfaktor werden die in den Störfallberechnungsgrundlagen /8/ aufgeführten Werte verwendet.

Dosismodell

Die Berechnung der Störfalldosen für die Referenzpersonen aller Altersgruppen durch Inhalation und durch externe Bestrahlung (Gamma-Submersion und Gamma-Bodenstrahlung) erfolgt mit den Modellen und Parametern der Störfallberechnungsgrundlagen /8/ unter Berücksichtigung der bereits oben diskutierten Modifikation bei der Gamma-Bodenstrahlung sowie den Dosiskoeffizienten aus der Zusammenstellung im Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28.08.2001 /10/.

5.2 Vergleichsrechnung der radiologische Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes

Um die radiologischen Folgen eines gezielten Flugzeugabsturzes auf den TRIGA Mainz zu betrachten, wurden durch die JGU Mainz in /9/ die Ergebnisse einer Diplomarbeit, die an der Universität Wien erstellt wurde und die Folgen eines Flugzeugabsturzes auf den TRIGA Mark II Reaktor in Wien betrachtet, herangezogen. Aus den in dieser Diplomarbeit /9/ ermittelten Ergebnissen leitet die JGU Mainz ab, dass die innerhalb eines Tages in einem Abstand von 200 Metern vom Reaktortank resultierende effektive Dosis gemäß ICRP-60 bei maximal 300 µSv liegt. In einem Abstand von 600 m verringert sich die effektive Dosis gemäß /9/ auf < 100 µSv und in einem Abstand von 5 km auf < 10 µSv. Weiterhin führt die JGU

Mainz in /3/ aus, dass sich diese Werte bei Betrachtung eines Zeitraumes von 50 Jahren nur unwesentlich ändern.

Wie bereits in Kapitel 5.1 ausgeführt, werden zur Entscheidungsfindung, ob Notfallschutzmaßnahmen einzuleiten sind, sowohl International als auch in Deutschland die Störfalldosen für einen Expositionszeitraum von 7 Tagen, einem Monat und einem Jahr herangezogen.

Zur Abklärung des Einflusses der Modellparameter in den beiden zugrunde gelegten Berechnungsmodellen (TIS: Modell der Störfallberechnungsgrundlagen, Uni Wien: Programm PC COSYMA) zur Berechnung der effektiven Dosis haben die Sachverständigen mit dem in der TÜV Rheinland Industrie Service GmbH vorliegenden Störfallprogramm Vergleichsrechnungen für einen Expositionszeitraum von 50 Jahren durchgeführt. Hierzu wird von den Sachverständigen das in der Diplomarbeit /9/ verwendete Kerninventar (siehe Tabelle 1) zu Grunde gelegt und hieraus mit den in /9/ für das Szenario 4 genannten Parametern für die Freisetzungsanteile der Edelgase und Halogene der Quellterm berechnet. Der sich ergebende Quellterm kann Tabelle 1 entnommen werden. Die verschiedenen Iod-Radionuklide werden wie in /9/ zu 10 % auf den organisch gebundenen Zustand und zu je 45 % auf den elementaren und den schwebstoffgebundenen Zustand aufgeteilt. Weiterhin werden der Berechnung konservativerweise eine Freisetzungszeit von einer Stunde und eine bodennahe Freisetzung mit und ohne Niederschlag zu Grunde gelegt. Die Ausbreitungsparameter werden gemäß den Störfallberechnungsgrundlagen /8/ angesetzt.

Tabelle 1: Kerninventar gemäß /9/ und daraus berechnete freigesetzte Aktivität

Radionuklid	Kern-inventar [Bq]	freigesetzte Aktivität [Bq]
Kr-83m	3,82E+12	3,82E+12
Kr-85m	9,00E+12	9,00E+12
Kr-85	1,67E+12	1,67E+12
Kr-87	1,82E+13	1,82E+13
Kr-88	2,57E+13	2,57E+13
I-129	8,78E+06	1,08E+02
I-130	6,57E+10	8,08E+05
I-131	2,08E+13	2,56E+08
I-132	3,10E+13	3,81E+08
I-133	4,83E+13	5,94E+08
I-134	5,45E+13	6,70E+08
I-135	4,49E+13	5,52E+08
Xe-131m	2,30E+11	2,30E+11
Xe-133m	1,41E+12	1,41E+12
Xe-133	4,83E+13	4,83E+13
Xe-135m	8,19E+12	8,19E+12
Xe-135	4,59E+13	4,59E+13
Xe-138	4,45E+13	4,45E+13

Es werden analog zur Vorgehensweise in /9/ Aufpunkte in Entfernungen von 200 m, 600 m und 5 km vom Freisetzungsort betrachtet. Die Berechnungen mit dem Programm der TIS ergeben die in den Tabellen 2 und 3 dargestellten effektiven Dosen für die am höchsten exponierte Referenzperson, aufgeschlüsselt auf die einzelnen Expositionspfade. Für alle Entfernungen und sowohl mit als auch ohne Niederschlag ergeben sich für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr die radiologisch ungünstigsten Werte. Ebenfalls für alle Szenarien ist die durch die Gamma-Submersion verursachte effektive Dosis der bestimmende Expositionspfad. Der Dosisanteil durch Gamma-Submersion liegt in allen Fällen bei über 90 % der Gesamtdosis. Verglichen mit den in der Diplomarbeit /9/ ermittelten effektiven Dosen liegen die mit dem Programm der TIS ermittelten Werte um einen Faktor 2 bis 3 höher. Dieser Unterschied in den ermittelten effektiven Dosen lässt sich durch die unterschiedlichen Modellansätze, die dem in /9/ eingesetzten Programm PC COSYMA bzw. den Störfallberechnungsgrundlagen /8/ zu Grunde liegen, erklären.

Tabelle 2: Effektive Dosis ohne Niederschlag für den Quellterm aus der Diplomarbeit /9/ für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1

	Effektive Dosis (ohne Niederschlag) [mSv]					
Abstand [m]	**Beta-Submersion**	**Gamma-Submersion**	**Gamma-Bodenstrahlung**	**Inhalation**	**Ingestion**	**Summe Gesamt**
200	0,0E+0	4,1E-1	2,9E-3	9,4E-4	4,7E-3	4,1E-1
600	0,0E+0	2,2E-1	7,5E-4	2,4E-4	1,2E-3	2,2E-1
5000	0,0E+0	2,5E-2	1,3E-5	2,3E-5	1,1E-4	2,5E-2

Tabelle 3: Effektive Dosis mit Niederschlag für den Quellterm aus der Diplomarbeit /9// für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1

	Effektive Dosis (mit Niederschlag) [mSv]					
Abstand [m]	**Beta-Submersion**	**Gamma-Submersion**	**Gamma-Bodenstrahlung**	**Inhalation**	**Ingestion**	**Summe Gesamt**
200	0,0E+0	4,1E-1	3,4E-3	9,4E-4	4,7E-3	4,2E-1
600	0,0E+0	2,2E-1	9,4E-4	2,4E-4	1,2E-3	2,2E-1
5000	0,0E+0	2,2E-2	4,3E-5	9,4E-6	4,7E-5	2,2E-2

Die mit und ohne Berücksichtigung des Niederschlags ermittelten maximalen effektiven Dosen unterscheiden sich nur unwesentlich, da der für die Gesamtdosis dominierende Anteil, die Gamma-Submersion, nicht durch die Niederschlagsmenge beeinflusst wird.

5.3 Eigene Berechnungen der radiologische Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes

Im Folgenden werden durch die TIS die radiologischen Folgen, die sich bei einer Freisetzung gemäß Kapitel 4 ergeben, dargestellt. Es werden die Fälle mit und ohne Treibstoffbrand betrachtet. Hinsichtlich der Bewertung der Ergebnisse werden die Eingreifrichtwerte, die sich aus dem „Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ /7/ ergeben, zu Grunde gelegt. Aus /7/ folgen Eingreifrichtwerte für Expositionszeiten von 7 Tagen, einem Monat und einem Jahr. Es werden sowohl die effektive Dosis als auch die Schilddrüsendosis betrachtet. Diese Eingreifrichtwerte sind nochmals in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Eingreifrichtwerte gemäß /7/

Maßnahme	Eingreifrichtwerte		
	Schilddrüsendosis	**Effektive Dosis**	**Integrationszeit und Expositionspfade**
Aufenthalt in Gebäude	-	**10 mSv**	Äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide
Einnahme von Iodtabletten	**50 mSv** Kinder und Jugendliche bis zu 18 Jahre sowie Schwangere **250 mSv** Personen von 18 bis 45 Jahren	-	Im Zeitraum von 7 Tagen inhaliertes Radioiod einschließlich der Folgeäquivalentdosis
Evakuierung	-	**100 mSv**	Äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide
Langfristige Umsiedlung	-	**100 mSv**	Äußere Exposition in 1 Jahr durch abgelagerte Radionuklide
Temporäre Umsiedlung	-	**30 mSv**	Äußere Exposition in 1 Monat

Wie aus der Tabelle 4 ersichtlich, wird die Ingestionsdosis bei der Ermittlung der effektiven Dosis und der Schilddrüsendosis nicht berücksichtigt. Dies ist konform mit den internationalen Regelungen.

Mit in Kraft treten der Strahlenschutzverordnung im Jahr 2001 wurde u.a. neu eingeführt, dass die Berechnung der Störfalldosen für 6 Altersgruppen zu erfolgen hat. Für die Refe-

renzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr wurde zusätzlich der Expositionspfad Muttermilch aufgenommen. Das heißt, es ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Aktivität, die die Mutter über die Inhalation und mit kontaminierter Nahrung aufnimmt, in die Muttermilch gelangt und damit zu einer zusätzlichen Aktivitätsaufnahme bei der Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr führt. Die Iod-Aktivitätszufuhr mit der Muttermilch ist insbesondere für die Schilddrüsendosis der Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr ein nicht zu vernachlässigender Expositionspfad. Diskussionen, ob überhaupt und wenn ja, in welchem Maße dieser Dosisbeitrag zukünftig bei der Berechnung der unfallbedingten Schilddrüsendosis zur Planung von Notfallschutzmaßnahmen zu berücksichtigen ist, laufen in Deutschland gerade erst an.
Obwohl derzeit weder in Deutschland noch International die Ingestion bei der Planung von Notfallschutzmaßnahmen berücksichtigt wird, haben die Sachverständigen bei den nachfolgenden Betrachtungen den Dosisbeitrag über den Expositionspfad Muttermilch bei der Schilddrüsendosis vorsorglich zusätzlich berechnet und in den Tabellen ausgewiesen.
Für die effektive Dosis haben die Sachverständigen ebenfalls geprüft, ob der Expositionspfad Muttermilch wesentlich zur Dosis für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr beiträgt.

5.3.1 Radiologische Auswirkungen ohne Treibstoffbrand

Für den Fall eines Flugzeugabsturzes ohne Treibstoffbrand werden zur Ermittlung der radiologischen Auswirkungen die in Kapitel 4 dargestellten Freisetzungen zu Grunde gelegt. Zur Berechnung der Störfalldosen werden nur die Radionuklide berücksichtigt, für die Dosiskoeffizienten in /10/ vorhanden sind. Damit ergibt sich der in Tabelle 5 zusammengefasste Quellterm. Hinsichtlich der Aufteilung des Radionuklids Iod auf die drei Zustände schwebstoffgebunden, elementar und organisch gebunden wird die in der Diplomarbeit /9/ hergeleitete Aufteilung (10 % organisch gebunden, 45 % schwebstoffgebunden und 45 % elementar) zu Grunde gelegt.

Tabelle 5: Quellterm zur Berechnung der radiologischen Auswirkungen ohne Treibstoffbrand

Radionuklid	freigesetzte Aktivität [Bq]	Radionuklid	freigesetzte Aktivität [Bq]
Br-80	3,77E+01	Xe-131M	1,50E+06
Br-80M	1,59E+01	Xe-133	3,13E+08
Br-82	4,94E+04	Xe-133M	9,17E+06
Br-83	2,49E+07	Xe-135	3,01E+08
Br-84	4,67E+07	Xe-135M	5,30E+07
Kr-79	2,61E-06	Xe-138	2,89E+08
Kr-81	3,34E-05	Cs-132	2,60E+03
Kr-81M	1,62E-01	Cs-134	4,62E+06
Kr-83M	2,49E+07	Cs-134M	4,60E+05
Kr-85	1,13E+07	Cs-135	3,67E+03
Kr-85M	5,86E+07	Cs-136	1,37E+06
Kr-87	1,18E+08	Cs-137	1,70E+08
Kr-88	1,67E+08	Cs-138	3,12E+08
Ru-103	1,49E+08	Te-123M	4,62E+00
Ru-105	5,14E+07	Te-125M	4,97E+05
Ru-106	2,22E+07	Te-127	7,87E+06
I-128	2,34E+04	Te-127M	1,09E+06
I-129	2,72E+01	Te-129	3,23E+07
I-130	1,08E+05	Te-129M	4,85E+06
I-131	6,07E+07	Te-131	1,21E+08
I-132	9,03E+07	Te-131M	1,71E+07
I-133	1,41E+08	Te-132	2,00E+08
I-134	1,59E+08	Te-133	1,82E+08
I-135	1,31E+08	Te-133M	1,35E+08
Xe-127	5,21E+03	Te-134	3,11E+08
Xe-129M	6,04E+00		

Für den Flugzeugabsturz ohne Treibstoffbrand wird von den Sachverständigen eine bodennahe Freisetzung unterstellt, da keine einen Auftrieb verursachenden Mechanismen zur Verfügung stehen. Hinsichtlich der Freisetzungsdauer legen die Sachverständigen konservativerweise eine Freisetzungszeit von einer Stunde zu Grunde. Die Störfalldosen werden für Abstände von 200 m, 600 m und 5 km berechnet. Für Entfernungen kleiner als 200 m gehen die Sachverständigen davon aus, dass vorsorglich eine Räumung des Universitätsgeländes aufgrund des Zerstörungsausmaßes durch den Flugzeugabsturz erfolgt und ein Aufenthalt von Personen der allgemeinen Bevölkerung nicht zu unterstellen ist. Die für die oben ge-

nannten Entfernungen ermittelten Störfalldosen können den Tabellen 6 und 7 entnommen werden.

Tabelle 6: Störfalldosen (ohne Niederschlag und ohne Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Entfernung [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
200	1,0E-2	4,4E-3	2,0E-2 (1,2 E-1)*	3,2E-2	1,5E-2	5,1E-3
600	2,0E-3	9,8E-4	4,4E-3 (2,2E-2)*	7,2E-3	3,3E-3	1,1E-3
5000	1,2 E-4	5,3E-5	2,4E-4 (1,2E-3)*	3,9E-4	1,8E-4	6,1E-5

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Tabelle 7: Störfalldosen (mit Niederschlag und ohne Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Entfernung [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre/≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
200	8,9E-3***	3,2E-3	1,4E-2 (6,8E-2)*	2,2E-2	1,0E-2	3,9E-3
600	2,2E-3***	6,5E-4	2,5E-3 (1,3E-2)*	4,1E-3	1,9E-3	8,3E-4
5000	2,5E-4**	4,0E-5	1,0E-4 (5,9E-4)*	1,6E-4	7,6E-5	6,2E-5

* in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis
** für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr
***für die Referenzperson der Altersgruppe > 1 - ≤ 2 Jahre

Für alle Entfernungen und Expositionszeiträume werden die jeweiligen Eingreifrichtwerte zu weniger als 1 % ausgeschöpft. Die im Vergleich zu /9/ deutlich niedrigeren Dosiswerte sind durch das geringere Kerninventar des TRIGA Mainz im Vergleich zum TRIGA Wien sowie

den geringeren Anteil der Edelgase im Kerninventar, der zur Ausbreitung kommt, bedingt. Daraus ergibt sich, dass die in /3/ für den Flugzeugabsturz ohne Treibstoffbrand durch den Betreiber aus der Diplomarbeit /9/ abgeleiteten Dosiswerte eine konservative Abschätzung darstellen.

5.3.2 Radiologische Auswirkungen mit Treibstoffbrand

Für den Fall eines Flugzeugabsturzes mit Treibstoffbrand kommt es durch die thermische Überhöhung zu einer Vergrößerung der Freisetzungshöhe. Ebenso erhöhen sich die Freisetzungen gemäß Kapitel 4. Zur Berechnung der Störfalldosen werden wiederum nur die Radionuklide berücksichtigt, für die in /10/ Dosiskoeffizienten vorhanden sind. Daraus ergibt sich der in Tabelle 8 zusammengefasste Quellterm. Das Radionuklid Iod wird zu den gleichen Anteilen wie im Falle ohne Treibstoffbrand auf die drei Zustände schwebstoffgebunden, elementar und organisch gebunden aufgeteilt.

Als Niederschlagsmenge wird ein Wert von 0,5 mm/h zugrunde gelegt. Eine Niederschlagsmenge von 0,5 mm/h deckt aus den Erfahrungen der Sachverständigen in Verfahren an anderen Standorten das 95 %-Perzentil der Niederschlagsmenge ab.

Aufgrund ihrer Erfahrungen aus Betrachtungen zu den radiologischen Folgen eines Flugzeugabsturzes in anderen Genehmigungsverfahren nehmen die Sachverständigen konservativ eine durch die thermische Überhöhung verursachte Freisetzungshöhe von 100 Metern an.

Zusätzlich wird durch die Sachverständigen eine Freisetzungshöhe von 150 Metern betrachtet, da die durch den Washout auf dem Boden deponierte Aktivität mit der Freisetzungshöhe ansteigt und eine Abschätzung dieses Effektes so möglich wird.

Tabelle 8: Quellterm zur Berechnung der radiologischen Auswirkungen mit Treibstoffbrand

Radionuklid	freigesetzte Aktivität [Bq]	Radionuklid	freigesetzte Aktivität [Bq]
Br-80	6,28E+05	Cs-132	4,33E+07
Br-80M	2,65E+05	Cs-134	7,71E+10
Br-82	8,24E+08	Cs-134M	7,66E+09
Br-83	4,15E+11	Cs-135	6,12E+07
Br-84	7,78E+11	Cs-136	2,29E+10
Kr-79	1,74E-01	Cs-137	2,83E+12
Kr-81	2,22E+00	Cs-138	5,20E+12
Kr-81M	1,08E+04	Te-123M	7,70E+04
Kr-83M	1,66E+12	Te-125M	8,29E+09
Kr-85	7,54E+11	Te-127	1,31E+11
Kr-85M	3,91E+12	Te-127M	1,82E+10
Kr-87	7,89E+12	Te-129	5,39E+11
Kr-88	1,12E+13	Te-129M	8,08E+10
Ru-103	2,49E+12	Te-131	2,02E+12
Ru-105	8,57E+11	Te-131M	2,85E+11
Ru-106	3,71E+11	Te-132	3,33E+12
I-128	8,68E+08	Te-133	3,03E+12
I-129	1,01E+06	Te-133M	2,25E+12
I-130	4,00E+09	Te-134	5,18E+12
I-131	2,25E+12		
I-132	3,34E+12		
I-133	5,22E+12		
I-134	5,89E+12		
I-135	4,86E+12		
Xe-127	1,18E+03		
Xe-129M	1,37E+05		
Xe-131M	9,97E+10		
Xe-133	2,09E+13		
Xe-133M	6,11E+11		
Xe-135	2,01E+13		
Xe-135M	3,54E+12		
Xe-138	1,93E+13		

Wie im Falle ohne Treibstoffbrand wird konservativerweise eine Freisetzungszeit von einer Stunde unterstellt und es werden die Fälle ohne Niederschlag und mit 0,5 mm/h Niederschlag betrachtet. In den Tabelle 9 bis 14 sind die berechneten Störfalldosen für die gemäß der Eingreifrichtwerte /7/ zu betrachtenden Expositionszeiträume in einer Entfernung von

200 Metern, 600 m und 5.000 m für den Fall ohne und mit Berücksichtigung von Niederschlag dargestellt.

Tabelle 9: Störfalldosen in einer Entfernung von 200 m (ohne Niederschlag, mit Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Freisetzungshöhe [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
100	1,3E+0	6,0E-1	2,7E+0 (1,3E+1)*	4,3E+0	2,1E+0	6,9E-1
150	5,6E-1	2,5E-1	1,1E+0 (5,6E+0)*	1,8E+0	8,5E-1	2,9E-1

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Tabelle 10: Störfalldosen in einer Entfernung von 200 m (0,5 mm/h Niederschlag, mit Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Freisetzungshöhe [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr
100	2,3E+1	2,0E+0	5,1E-04 (5,8E-1)*	8,3E-04	3,8E-04	4,3E+0
150	2,8E+1	2,4E+0	1,3E-8 (6,6E-8)*	2,2E-08	9,9E-08	5,2E+0

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Dargestellt ist für die Zeiträume 7 Tage, 1 Monat und 1 Jahr jeweils die effektive Dosis für die am höchsten belastete Altersgruppe. Für die Altersgruppe „≤ 1 Jahr“ wurde bei der Berechnung der effektiven Dosis, wie sie in den Tabellen angegeben ist, die durch Inhalation von

der Mutter aufgenommene und dann über den Muttermilchpfad an den Säugling übertragene Aktivität nicht berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ist konform mit der derzeitigen Vorgehensweise sowohl in Deutschland als auch im Ausland. Der Dosisbeitrag würde aber auch keine so relevante Rolle spielen wie bei der Schilddrüsendosis. Für die Störfallszenarien mit den höchsten effektiven Dosen (s. Tabellen 10 und 12) würde sich die effektive Dosis durch den Muttermilchpfad um etwa 10 % erhöhen.

Die in den Tabellen dargestellten Schilddrüsendosen berücksichtigen regelkonform ebenfalls nur die durch die Inhalation von Radioiod verursachte Dosis. Da bei der Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr der wesentliche Dosisbeitrag nicht über die Inhalation sondern über den Expositionspfad Muttermilch resultiert, haben die Sachverständigen diesen Beitrag explizit mit ausgewiesen.

Diese Darstellung wurde auch für die im Folgenden betrachteten Entfernungen von 600 m und 5000 m gewählt.

Tabelle 11: Störfalldosen in einer Entfernung von 600 m (ohne Niederschlag, mit Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Freisetzungshöhe [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
100	2,2E+0	9,8E-1	4,4E+0 (2,2E+1)*	7,1E+0	3,3E+0	1,1E+0
150	1,1E+0	5,0E-1	2,3E+0 (1,1E+1)*	3,6E+0	1,7E+0	5,7E-1

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Tabelle 12: Störfalldosen in einer Entfernung von 600 m (0,5 mm/h Niederschlag, mit Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Freisetzungshöhe [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
100	1,1E+1	1,7E+0	4,4E+0 (2,2E+1)*	7,1E+0	3,3E+0	2,6E+0
150	1,1E+1	1,1E+0	1,1E+0 (5,5E+0)*	1,8E+0	08,4E-1	2,1E+0

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Tabelle 13: Störfalldosen in einer Entfernung von 5000 m (ohne Niederschlag, mit Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Freisetzungshöhe [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
100	2,8E-1	1,3E-1	5,2E-1 (2,5E+0)*	8,3E-1	3,9E-1	1,5E-1
150	3,1E-1	1,5E-1	5,8E-1 (2,8E+0)*	9,3E-1	4,4E-1	1,6E-1

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Tabelle 14: Störfalldosen in einer Entfernung von 5000 m (0,5 mm/h Niederschlag, mit Treibstoffbrand) für die verschiedenen Expositionszeiten

Freisetzungshöhe [m]	Expositionszeit					
	1 Jahr	7 Tage				1 Monat
	eff. Dosis [mSv]	eff. Dosis [mSv]	Schilddr.-Dosis durch Inhalation von Radioiod [mSv]			eff. Dosis [mSv]
	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. ≤ 1 Jahr	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre	Referenzp. > 17 Jahre	Referenzp. > 1 - ≤ 2 Jahre
100	1,9E+0	2,7E-1	5,2E-1 (2,5E+0)*	8,3E-1	3,9E-1	4,4E-1
150	1,9E+0	2,8E-1	5,8E-1 (2,8E+0)*	9,3E-1	4,4E-1	4,5E-1

*in Klammern die durch Radioiod für die Referenzperson der Altersgruppe "≤ 1 Jahr" über den Muttermilchpfad verursachte Schilddrüsendosis

Die maximale effektive Dosis für einen Expositionszeitraum von 1 Jahr ergibt sich für den Fall mit Treibstoffbrand für eine Entfernung von 200 m bei einer Niederschlagsmenge von 0,5 mm/h und einer Freisetzungshöhe von 150 m zu 28 mSv für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr. Der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „langfristige Umsiedlung" (100 mSv) wird zu 28 % ausgeschöpft.

Die maximale effektive Dosis für einen Expositionszeitraum von einem Monat ergibt sich für den Fall mit Treibstoffbrand für eine Entfernung von 200 m bei einer Niederschlagsmenge von 0,5 mm/h und einer Freisetzungshöhe von 150 m zu 5,2 mSv für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr. Der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „temporäre Umsiedlung" (30 mSv) wird zu ca. 17 % ausgeschöpft.

Die maximale effektive Dosis über einen Expositionszeitraum von 7 Tagen ergibt sich für den Fall mit Treibstoffbrand für eine Entfernung von 200 m bei einer Niederschlagsmenge von 0,5 mm/h und einer Freisetzungshöhe von 150 m zu 2,4 mSv für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr. Der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäude" (10 mSv) wird zu ca. 24 % und der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Evakuierung" (100 mSv) zu 2,4 % ausgeschöpft.

Die maximale Schilddrüsendosis über einen Expositionszeitraum von 7 Tagen ergibt sich für den Fall mit Treibstoffbrand für eine Entfernung von 600 m (sowohl mit als auch ohne Niederschlag) bei einer Freisetzungshöhe von 100 m zu 7,1 mSv für die Referenzperson der

Altersgruppe > 1 - ≤ 2 Jahre. Der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Einnahme von Iodtabletten" (50 mSv) für die Personengruppe „Kinder und Jugendliche bis zu 18 Jahre sowie Schwangere" wird zu ca. 14 % ausgeschöpft.

Würde man bei der Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 Jahr den Expositionspfad Muttermilch mit berücksichtigen ergäbe sich eine Schilddrüsendosis von 26 mSv. Auch dieser Wert liegt immer noch deutlich unterhalb des Eingreifrichtwertes für die Maßnahme „Einnahme von Iodtabletten" (50 mSv). Hierbei sei noch einmal betont, dass derzeit weder in Deutschland noch im Ausland die Aktivitätszufuhr über den Expositionspfad Muttermilch berücksichtigt wird.

Die maximale Schilddrüsendosis über einen Expositionszeitraum von 7 Tagen für die Personengruppe „18 Jahre bis 45 Jahre" ergibt sich für den Fall mit Treibstoffbrand für eine Entfernung von 600 m (sowohl mit als auch ohne Niederschlag) bei einer Freisetzungshöhe von 100 m zu 3,3 mSv. Der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Einnahme von Iodtabletten" (250 mSv) für die Personengruppe „Personen von 18 Jahren bis 45 Jahren" wird zu ca. 1,3 % ausgeschöpft.

Die großen Unterschiede bei der Höhe der Schilddrüsendosis in einer Entfernung von 200 m für den Fall „ohne Niederschlag" und „Niederschlagsmenge von 0,5 mm/h" erklärt sich daraus, dass im Falle ohne Niederschlag die radiologisch ungünstigste Ausbreitungskategorie gemäß Störfallberechnungsgrundlagen /8/ aus allen Ausbreitungskategorien gewählt wird, im Falle mit Niederschlag aber nur die Ausbreitungskategorien C, D und E zu betrachten sind. Im Falle ohne Niederschlag ist die Ausbreitungskategorie A der radiologisch ungünstigste Fall, im Falle mit Niederschlag die Ausbreitungskategorie D.

6 Zusammenfassung

Auftragsgemäß haben die Sachverständigen die radiologischen Auswirkungen des Absturzes eines großen Flugzeugs auf den Forschungsreaktor TRIGA Mainz untersucht.
In einem ersten Schritt wurden die Ergebnisse, die durch die JGU Mainz aus einer Diplomarbeit /9/ abgeleitet wurden, durch Vergleichsrechnungen mit dem TIS-eigenen Programm verifiziert. Die durch die TIS ermittelten Dosen liegen bei Zugrundelegung gleicher Freisetzungsraten um einen Faktor 2-3 höher als die von der JGU Mainz ermittelten Dosen. Dieser Unterschied lässt sich durch die unterschiedlichen Modellansätze, die dem Programm PC COSYMA bzw. den Störfallberechnungsgrundlagen zu Grunde liegen, erklären.

Unter Berücksichtigung des Kerninventars des TRIGA Mainz wurden für die beiden Unfallszenarien „Flugzeugabsturz mit Treibstoffbrand“ und „Flugzeugabsturz ohne Treibstoffbrand“ die Freisetzungsraten für die einzelnen Radionuklide ermittelt. Basierend auf diesen Freisetzungsraten haben die Sachverständigen die radiologischen Folgen des Flugzeugabsturzes berechnet.

Für die Bewertung der radiologischen Auswirkungen eines Flugzeugabsturz haben die Sachverständigen die im „Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ /7/ genannten Eingreifrichtwerte zugrunde gelegt.

Bei dem betrachteten Unfallszenario „Flugzeugabsturz ohne Treibstoffbrand“ werden die Eingreifrichtwerte gemäß /7/ bei den betrachteten Entfernungen zu weniger als 1 % ausgeschöpft.

Die höchsten Dosen treten ausschließlich bei dem Szenario „Flugzeugabsturz mit Treibstoffbrand“ auf. Die Eingreifrichtwerte gemäß /7/ werden wie folgt ausgeschöpft:

- Eingreifrichtwert für die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“ (100 mSv): 28 %
- Eingreifrichtwert für die Maßnahme „temporäre Umsiedlung“ (30 mSv): 17 %
- Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäude“ (10 mSv): 4 %
- Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Evakuierung“ (100 mSv): 2,4 %,
- Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Einnahme von Iodtabletten“ (50 mSv) für die Personengruppe „Kinder und Jugendliche bis zu 18 Jahre sowie Schwangere“: 14 %
- Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Einnahme von Iodtabletten“ (250 mSv) für die Personengruppe „Personen von 18 Jahren bis 45 Jahren“: 1,3 %

Köln, den 30.11.2012
976 – dr.ho
Für die Sachverständigen

Horn

Dr. Margot Horn

7 Verwendete Unterlagen

/1/ RSK
Anforderungskatalog für anlagenbezogene Überprüfungen deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)
Anlage 2 zum Ergebnisprotokoll der 434. RSK-Sitzung am 30.03.2011

/2/ BMU
Schreiben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 02.08.2011
Az. RS I 3-13042-2

/3/ Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Stellungnahme zum RSK-Fragenkatalog für den TRIGA Mainz

/4/ RSK
Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Forschungsreaktoren unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)
Stellungnahme von der 447. Sitzung am 03.05.2012

/5/ MWKEL
Email vom 12.07.2012

/6/ TÜV Rheinland Industrie Service GmbH
Email vom 9. Juli 2012 mit Anlage

/7/ SSK
Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen
SSK-Band Heft 37 (2004)

/8/ SSK
Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition
SSK-Band Heft 44 (2004)

/9/ Markus Haydn
Accident Scenarios with Environmental Impact of the TRIGA Mark II Reactor Vienna
Diplomarbeit am Atominstitut der Technischen Universität Wien
September 2009

/10/ BMU
Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001
Bundesanzeiger Nr. 160 a,b vom 28. August 2001

/11/ Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Lageplan
http://www.uni-mainz.de/universitaet/Dateien/JGU_campusplan.pdf
abgerufen am 12.09.2012

/12/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert am 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)

/13/ Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Kernchemie
E-Mail Dr. Hampel, 03.08.2012 10:52 Uhr, mit den Anhängen /14/ bis /16/

/14/ Excel-Datei: Freisetzungsrechnungen aus ORIGEN-Rechnungen_Haupt.xlsx

/15/ Excel-Datei: Abbrandgruppen 2012.xlsx

/16/ ORIGEN-Output Textdateien:

4973 samp_1.u6;	7909 samp_1.u6;	7010 samp_1.u6;
425 samp_1.u6;	4971+ samp_1.u6;	3449 samp_1.u6;
3187 samp_1.u6;	3418 samp_1.u6;	3201 samp_1.u6;
	3183 samp_1.u6;	3176 samp_1.u6

/17/ Derivation of the Source Term and Analysis of the Radiological Consequences of Research Reactor Accidents, Safety Reports Series No. 53, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2008

/18/ Baldwin et al., Fission Product Release from TRIGA-LEU Reactor Fuels, GA-16287 [E-117-830] General Atomics, November 1980

/19/ Safety Evaluation Report on High-Uranium Content, Low-Enriched Uranium-Zirconium Hydride Fuels for TRIGA Reactors, NUREG-1282, U.S. Nuclear Regulatory Commission, August 1987

/20/ Institut für Anorganische Chemie und Kernchemie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Sicherheitsbericht TRIGA Mark II Kernreaktor mit Pulseinrichtung, Anhang I, März 1962

/21/ Auswirkungen von gezielten Flugzeugabstürzen auf Zwischenlager für Kernbrennstoffe, http://www.bfs.de/de/transport/zwischenlager/flab18062003, besucht am 02.07.2012

/22/ Kim et al., Fission Gas Release from Uranium-Zirconium Hydride Fuel During Heating to Melting, Nuclear Technology Vol. 153, Jan. 2006

/23/ Johannes Gutenberg-Universität Mainz, TRIGA-Ladeplan Nr. 29 vom 09.02.2010