

Windrichtungsverteilung am Standort Neckarwestheim [GKN 2001]

# Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1

Dipl.-Phys. Oda Becker

Erstellt im Auftrag von Greenpeace Deutschland e.V.

**Hannover, Februar 2011**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Die GRS-Studie zum Flugzeugabsturz auf Atomkraftwerke</b> .....	<b>1</b>
<b>3 Die besondere Verwundbarkeit von Neckarwestheim 1</b> .....	<b>2</b>
<b>4 Das Unfallszenario</b> .....	<b>2</b>
<b>5 Die radioaktiven Freisetzungen</b> .....	<b>3</b>
5.1 Kerninventar .....	3
5.2 Freisetzunganteil .....	3
<b>6 Die Ausbreitungsrechnungen</b> .....	<b>5</b>
6.1 Parameter der Ausbreitungsrechnung .....	5
<b>7 Die Ermittlung der Strahlenbelastungen</b> .....	<b>6</b>
7.1 Notfallschutzmaßnahmen und ihre Eingreifrichtwerte.....	7
7.2 Mögliche Strahlenbelastungen nach sieben Tagen .....	8
7.3 Mögliche Strahlenbelastungen nach einem Jahr .....	8
<b>8 Die gesundheitlichen Folgen</b> .....	<b>9</b>
8.1 Akute Strahlenschäden.....	9
8.2 Risiko einer tödlichen Krebserkrankung.....	9
<b>9 Potenzielle gesundheitliche Folgen</b> .....	<b>10</b>
9.1 Betroffenheit durch akute Strahlenschäden .....	10
9.2 Betroffenheit durch eine tödliche Krebserkrankung .....	13
<b>10 Gesamtbewertung und Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>13</b>
<b>11 Zusammenfassung</b> .....	<b>16</b>
<b>12 Literatur</b> .....	<b>18</b>

## **Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

Abbildung 1: Windrichtungsverteilung am Standort Neckarwestheim [GKN 2001] .....	5
Abbildung 2: Potenzielle Strahlenbelastung bei Aufenthalt im Gebäude .....	12
Tabelle 1: Kerninventar, Freisetzunganteil und Quellterm .....	4
Tabelle 2: Potenzielle Strahlendosis nach sieben Tagen (ohne Niederschlag) .....	8
Tabelle 3: Potenzielle Strahlendosis nach sieben Tagen (mit Niederschlag) .....	8
Tabelle 4: Strahlendosis nach einem Jahr durch Bodenstrahlung (ohne Niederschlag).....	8
Tabelle 5: Strahlendosis nach einem Jahr durch Bodenstrahlung (mit Niederschlag).....	9
Tabelle 6: Auswirkungen von kurzzeitig hohen Strahlendosen.....	9
Tabelle 7: Potenzielle Strahlenbelastung bei Aufenthalt im Gebäude (ohne Niederschlag) ..	11
Tabelle 8: Potenzielle Strahlenbelastung bei Aufenthalt im Gebäude (mit Niederschlag) .....	11
Tabelle 9: Zeitdauer für die Ausbreitung der radioaktiven Wolke.....	14

## 1 Einleitung

Seit November 2010 ist die Bedrohung durch Terrorangriffe in Deutschland hoch. Laut Expertenmeinung beabsichtigt die Terrororganisation Al-Kaida hohe mediale Wirkung und eine hohe Zahl ziviler Opfer – dementsprechend ist auch ein Atomkraftwerk als Angriffsziel vorstellbar. Die Behörden gehen von drei unterschiedlichen Bedrohungsszenarien aus [NP 2010]. Im Zusammenhang mit Luftangriffen auf ein Atomkraftwerk ist insbesondere ein Bedrohungsszenario mit „Schläferzellen“ von Bedeutung (z.B. Schläfer, die Mitglieder der Bord- oder Cockpitcrew sind).

Die Atomkraftwerke in Deutschland sind gegen den – bewusst herbeigeführten oder auch durch Unfall bedingten – Absturz eines Verkehrsflugzeugs weder ausgelegt noch ausreichend geschützt. Das gilt laut einer Studie, die die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt hat, insbesondere für die ältesten Atomkraftwerke [BMU 2002]. Dazu gehört auch das Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 (Baubeginn 1972, kommerzieller Betrieb seit 1976).

Der Absturz eines Verkehrsflugzeugs kann in den gefährlichsten Reaktorunfall münden, in einen Kernschmelzunfall mit offenem Containment. Dieses Unfallszenario könnte auch durch andere Terrorangriffe oder durch Unfallabläufe aufgrund interner Störfälle entstehen, die zu einer Kernschmelze mit frühem Versagen des Containments führen.

In dieser Studie werden die Auswirkungen eines derartigen (potenziell möglichen) schweren Unfalls im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 ermittelt. Dazu werden mithilfe eines Ausbreitungsprogramms die Kontaminationen in unterschiedlichen Entfernungen berechnet. Anschließend wird geprüft, ob die potenziell resultierenden Strahlenbelastungen das Einleiten von Katastrophenschutzmaßnahmen erforderlich machen würden. Aus den ermittelten Strahlenbelastungen werden zudem die möglichen Gesundheitsfolgen abgeschätzt.

## 2 Die GRS-Studie zum Flugzeugabsturz auf Atomkraftwerke

In der nach dem 11.09.2001 von der Bundesregierung beauftragten GRS-Studie werden exemplarisch fünf Referenzanlagen behandelt, die die in Deutschland betriebenen Typen der Atomkraftwerke repräsentieren. Folgende drei Einwirkungsfaktoren, die bei derartigen Flugzeugabstürzen wichtig sind, werden betrachtet: Aufprall des Flugzeugs, Trümmerflug und Kerosinbrand. Bei den Lastfällen wird unterschieden zwischen zwei Absturzgeschwindigkeiten (175 m/s und 100 m/s) sowie zwischen drei Flugzeugtypen (groß – z.B. Boeing 747; mittel – z.B. A 300; klein – z.B. A 320) [BMU 2002].

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Anlage werden auf Grundlage dieser Randbedingungen zunächst die unmittelbaren mechanischen Auswirkungen analysiert. Es zeigt sich, dass bei Reaktorgebäuden mit einer Wandstärke von unter einem Meter ein Durchschlag der Gebäudewand zu erwarten ist.

Weiterhin werden die mittelbaren Folgen betrachtet. Dazu zählen Schäden im Inneren der Anlage, die durch induzierte Schwingungen aufgrund des Aufpralls des Flugzeugs ausgelöst werden und die zu Brüchen von Kühlmittleitungen führen können. Des Weiteren entstehen in der Folge des Absturzes durch den auslaufenden Treibstoff Brände, die zu Schäden an der Anlage führen können. Die Brandauswirkungen hängen sehr stark von den mechanischen Schäden ab. Entstehen in der Reaktorgebäudewand Öffnungen, kann Treibstoff ins Innere des Gebäudes eindringen.

Auf der Basis der insgesamt an der Anlage zu erwartenden Schäden wird beurteilt, ob das Ereignis von der Anlage beherrscht werden kann. Ergebnis der GRS-Studie ist, dass für Biblis B (und somit auch für die typgleiche Anlage Neckarwestheim 1) bei den größeren Flugzeugtypen und für beide Geschwindigkeiten mit einer großflächigen Zerstörung des Reaktorgebäudes zu rechnen ist. In diesen Fällen wird die Beherrschbarkeit des Ereignisses

als fraglich eingestuft. Eine Nichtbeherrschbarkeit bedeutet, dass ein Kernschmelzunfall mit massiven radioaktiven Freisetzungen resultiert.

Das BMU forderte die Länder auf, für die einzelnen Atomkraftwerke anlagenspezifische Untersuchungen durchzuführen, um „*Schadensminderungspotenziale im Falle eines herbeigeführten Flugzeugabsturzes zu ermitteln*“ [BMU 2004]. Dieser Aufforderung wurde bis heute nicht nachgekommen.

Anlagenspezifische Untersuchungen, die die grundsätzlichen Ergebnisse der GRS-Studie hinsichtlich der Beherrschbarkeit eines Flugzeugabsturzes in Neckarwestheim 1 widerlegen, wurden bisher nicht durchgeführt. Anhand der bekannten Auslegungsdefizite und Mängel muss eine Beherrschbarkeit jedoch auch ohne detaillierte Analysen ausgeschlossen werden.

### 3 Die besondere Verwundbarkeit von Neckarwestheim 1

Neckarwestheim 1 zählt zu den im Rahmen von Terrorangriffen verwundbarsten deutschen Atomkraftwerken. Die Kuppel des Reaktorgebäudes hat eine Stärke von unter einem Meter, sie ist lediglich gegen den Absturz eines kleinen Starfighters ausgelegt. Im Vergleich zu modernen Anlagen führen bereits geringere Lasten zum Durchdringen des Gebäudes [BMU 2002].

Die noch in Betrieb befindlichen deutschen Atomkraftwerke lassen sich anhand ihrer grundsätzlichen Auslegung gegen einen unfallbedingten Flugzeugabsturz in drei Kategorien unterteilen:

- Gegen den Absturz eines Militärflugzeugs vom Typ Phantom sind ausgelegt: Emsland, Neckarwestheim 2, Isar 2, Brokdorf, Philippsburg 2, Grohnde, Grafenrheinfeld, Krümmel, Gundremmingen B und C.
- Gegen den Absturz eines Starfighters sind ausgelegt: Biblis B, Unterweser und Neckarwestheim 1.
- Über keine explizite Auslegung gegen Flugzeugabsturz verfügen: Biblis A, Brunsbüttel, Isar 1 und Philippsburg 1.

### 4 Das Unfallszenario

Ein Terrorangriff auf ein Atomkraftwerk kann einen schweren Unfall mit massiven radioaktiven Freisetzungen auslösen. Das genaue Unfallszenario hängt von Angriffsart, Angriffsziel und Treffgenauigkeit der Einwirkung ab. Abläufe und Folgen können insofern sehr unterschiedlich sein.

Es ist jedoch anzunehmen, dass das Reaktorgebäude das primäre Angriffsziel darstellen würde. Bei einer Zerstörung des Reaktorgebäudes mit Ausfall der Kühlsysteme resultiert der gefährlichste Kernschmelzunfall: Eine rasche Kernschmelze bei offenem Containment.

In dieser Studie sollen die Folgen dieses Unfallszenarios betrachtet werden. Die radioaktiven Freisetzungen sind in diesem Fall besonders hoch. Bei einem intakten Containment schlägt sich ein Teil der Radionuklide, die aus dem geschmolzenen Reaktorkern freigesetzt werden, zunächst an den kälteren Innenflächen des Containments nieder. Dieser Faktor, der die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt reduziert, fällt bei einem bereits zu Beginn der Kernschmelze offenem Containment weg. Da dann auch keine Rückhaltung durch das Containment gegeben ist, erfolgen die Freisetzungen zudem besonders schnell (innerhalb weniger Stunden). Für Maßnahmen des Katastrophenschutzes steht dementsprechend sehr wenig Zeit zur Verfügung.

Ein solches Szenario kann durch einen Terrorangriff entstehen, der zu einer großflächigen Zerstörung des Reaktorgebäudes und des Containments sowie zu schweren Schäden am Primärkreislauf führt und bei dem aufgrund nicht mehr beherrschbarer Leckgrößen und/oder

schwerer Beschädigungen von Sicherheitssystemen eine Kernschmelze nicht verhindert werden kann. Dies könnte beispielsweise im Fall des gezielten Absturzes eines Verkehrsflugzeugs auf das Reaktorgebäude oder bei Beschuss desselben mit Hochexplosiv-Geschossen eintreten. Ein derartiges Szenario könnte auch durch Sprengungen im Reaktorgebäude ausgelöst werden. Der Angriff könnte von Innentätern oder einer eingedrungenen Terrorgruppe verübt werden.

Zu ähnlichen Unfallabläufen kann es auch aufgrund von technischem und/oder menschlichem Versagen kommen. So ist bei einem Kernschmelzunfall, der sich bei hohem Druck im Primärkreislauf ereignet, mit dem Versagen des Containments zu rechnen. Sollte der Reaktordruckbehälter bersten, ist durch Auftreffen von Bruchstücken ebenfalls eine Beschädigung des Containments zu erwarten. Auch bei einer Kernschmelze bei niedrigem Druck kann z.B. eine Wasserstoffexplosion zur Beschädigung des Containments führen.

Nach einem Terrorangriff (oder einem anderen Ereignis, das Auslöser eines schweren Unfalls sein kann) muss zunächst der Reaktor abgeschaltet und in einem unterkritischen Zustand gehalten werden (d.h. die Kettenreaktion muss unterbrochen werden.)

Allein durch das Abschalten des Reaktors wird ein Kernschmelzunfall jedoch nicht aufgehalten. Bei einer Unterbrechung der Kühlung kann auch bei abgeschaltetem Reaktor innerhalb kurzer Zeit (in einer Größenordnung von wenigen Stunden) eine Kernschmelze eintreten. Denn auch nach dem Abschalten wird durch den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte eine hohe Leistung (Nachzerfallsleistung) erzeugt. Sie beträgt anfänglich etwa sieben Prozent der ursprünglichen thermischen Leistung des Reaktors und klingt erst im Laufe der folgenden Stunden und Tage langsam weiter ab. Die Nachzerfallsleistung ist so hoch, dass bei einem Ausfall der Kühlung, selbst noch zehn Tage nach Abschalten des Reaktors, das Wasser im Primärkreislauf nach ca. zwei Stunden zu sieden beginnt.

Für externe Interventionsmaßnahmen zur Verhinderung einer Kernschmelze stünde dann ein Zeitraum von etwas mehr als zwei Stunden zur Verfügung. Für das Verlegen provisorischer Leitungen zur Kühlwassereinspeisung und für das Heranschaffen von Notstromaggregaten usw. werden (unter den schwierigen Bedingungen, die nach einem terroristischen Angriff beim Standort herrschen dürften) Zeiten von mehreren Stunden erforderlich sein.

Aus dieser Abschätzung wird deutlich, dass ein vorsorgliches Abschalten bei einer akuten Terrorgefahr keine Option darstellt. Ein Abschalten des Reaktors im Bedrohungsfall bringt nur dann einen deutlichen Gewinn an Sicherheit, wenn der Reaktor (deutlich) länger als zehn Tage vor einem potenziellen Terroranschlag heruntergefahren wird. Nur dann ist die Zerfallswärme soweit abgeklungen, dass ausreichend Zeit für Gegenmaßnahmen zur Verfügung stünde.

## **5 Die radioaktiven Freisetzungen**

### **5.1 Kerninventar**

Das aktuelle Kerninventar eines Reaktors wird nicht nur durch die eingesetzten Brennelemente bestimmt, sondern auch durch den zeitlichen Abstand zur letzten Revision, die Dauer dieser Revision und den Beginn der Freisetzung nach Beendigung der Kettenreaktion.

In dieser Studie wird das Aktivitätsinventar von Neckarwestheim 1 am Zyklusende und nach einer Freisetzungszeit von sechs Stunden nach Ende der Kettenreaktion verwendet. Diese Werte stellen repräsentative Werte für einen möglichen und konservativen Zykluszeitpunkt und einen realistischen Beginn der Freisetzung dar [SSK 2004].

### **5.2 Freisetzunganteil**

Bei einem Reaktorunfall wird eine Vielzahl von Radionukliden mit den unterschiedlichsten Eigenschaften freigesetzt. Die Höhe der radioaktiven Freisetzungen hängt von den Details

des Unfallablaufs ab und kann daher nur anhand vorliegender Studien grob abgeschätzt werden.

Der typgleiche Reaktor Biblis B war Referenzanlage der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, die (im Auftrag der Bundesregierung) Störfälle in Atomkraftwerken und die damit verbundenen Risiken untersuchte. In dieser Studie (sowie in einer neueren Studie der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit zu Neckarwestheim 2 (2001)) sind unterschiedliche Freisetzungskategorien definiert, bei denen jeweils ein bestimmter Anteil der im Kern enthaltenen Nuklide freigesetzt wird. Laut der Studien hängt das Ausmaß der nach einem Kernschmelzunfall freigesetzten radioaktiven Stoffe entschieden von der Schutzfunktion des Sicherheitsbehälters ab. Mindestens 50 bis maximal 90 Prozent der leicht flüchtigen Nuklide (Jod, Cäsium, Tellur) können nach einem Kernschmelzunfall mit frühzeitigem Versagen des Containments freigesetzt werden [GRS 1989; SSK 2004].

Für die Bestimmung der Unfallfolgen wird im Weiteren ein Freisetzunganteil von 50 Prozent der leichtflüchtigen Nuklide angesetzt. Er entspricht einem sehr schweren Unfall, ohne jedoch den schlimmsten denkbaren Fall darzustellen. Für einen Angriff mit einem Verkehrsflugzeug kann der hier angenommene Freisetzunganteil eher unterschätzend sein (aufgrund der großflächigen Zerstörung des Containments vor Einsetzen der Kernschmelze einerseits und dem die Freisetzung leicht flüchtiger Stoffe stark fördernden Treibstoffbrand andererseits).

Aus Kerninventar und Freisetzunganteil ergibt sich die freigesetzte Menge des jeweiligen Nuklids (Quellterm). In dieser Studie werden für die Ermittlung der Strahlenbelastung nur diejenigen Nuklide berücksichtigt, von denen die höchsten Strahlenbelastungen erwartet werden. In der folgenden Tabelle sind Kerninventar, Freisetzunganteil und Quellterm dieser Nuklide für Neckarwestheim 1 zusammengestellt [SSK 2004].

**Tabelle 1: Kerninventar, Freisetzunganteil und Quellterm**

Radionuklid		Inventar [Bq]	Freisetzunganteil	Quellterm [Bq]
Barium 140	Ba140	4,41E+18	0,3	1,32E+18
Curium 242	Cm242	5,22E+16	0,04	2,09E+15
Curium 244	Cm244	2,07E+15	0,04	8,29E+13
Cäsium 134	Cs134	2,34E+17	0,5	1,17E+17
Cäsium 136	Cs136	8,70E+16	0,5	4,35E+16
Cäsium 137	Cs137	2,01E+17	0,5	1,00E+17
Jod 131	I 131	2,41E+18	0,5	1,20E+18
Jod 132	I 132	3,41E+18	0,5	1,71E+18
Jod 133	I 133	4,28E+18	0,5	2,14E+18
Jod 135	I 135	2,54E+18	0,5	1,27E+18
Plutonium 238	Pu238	3,01E+15	0,04	1,20E+14
Tellur 132	Te132	3,34E+18	0,5	1,67E+18

## 6 Die Ausbreitungsrechnungen

In dieser Studie werden die Boden- und Luftkontaminationen ermittelt, die nach einem Kernschmelzunfall bei offenem Containment in einer Entfernung von 2 bis 100 km auftreten können. Zu beachten ist, dass die Genauigkeit der ermittelten Werte mit der Entfernung abnimmt.

Für die Berechnung wird das Ausbreitungsprogramm HOTSPOT (Version 2.06) verwendet. Dieses Programm wurde im renommierten amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory entwickelt und dient zur Ermittlung orientierender Werte [LLNL 2008]. Die Berechnung des Programms beruht auf dem Modell, mit dem gemäß Störfallberechnungsgrundlagen die Ausbreitung radioaktiver Stoffe aus einer kerntechnischen Anlage zu ermitteln ist [SSK 2003].

### 6.1 Parameter der Ausbreitungsrechnung

Die folgenden meteorologischen Bedingungen wurden dem Sicherheitsbericht zum Zwischenlager am Standort Neckarwestheim aus dem Jahr 2001 entnommen [GKN 2001].

#### Windrichtung

Die dominierende Windrichtung am Standort Neckarwestheim ist Westen, die zweithäufigste Windrichtung ist Süden. In der folgenden Abbildung sind die Windrichtungsverteilungen dargestellt:

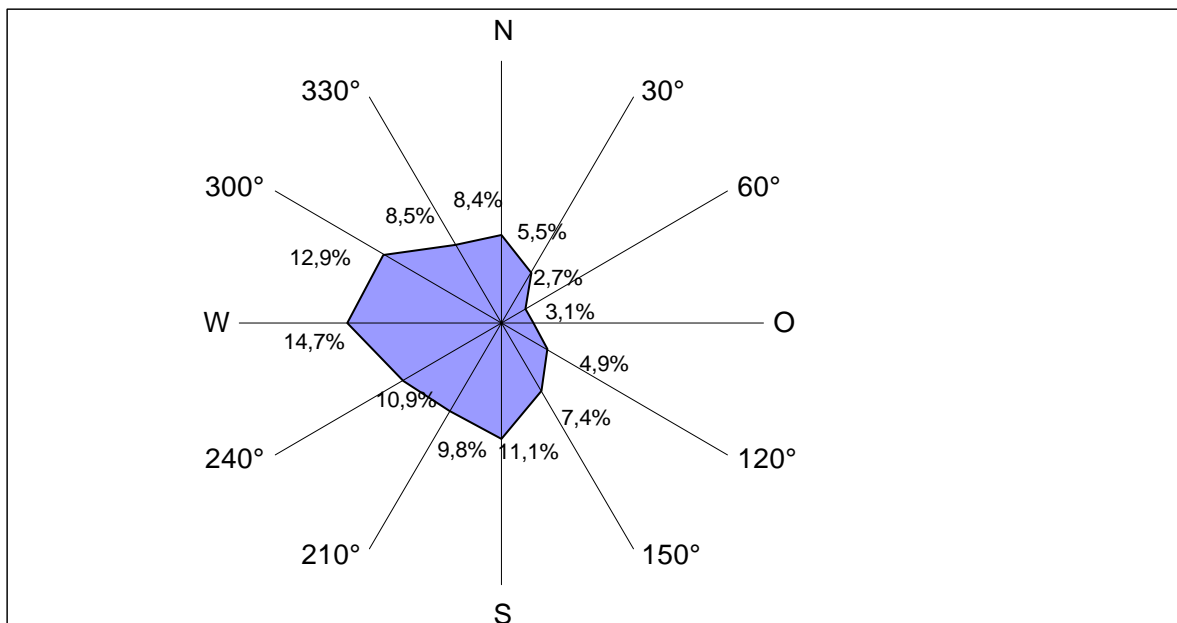


Abbildung 1: Windrichtungsverteilung am Standort Neckarwestheim [GKN 2001]

Im Fall eines Reaktorunfalls in Neckarwestheim 1 führen Winde aus westlicher bzw. südlicher Richtung zu Kontaminationen der im Osten bzw. Norden gelegenen Gebiete. Aber auch die im Westen oder Süden lebende Bevölkerung kann – wenn auch mit geringerer Wahrscheinlichkeit – betroffen sein.

#### Windgeschwindigkeiten

Am Standort Neckarwestheim 1 treten Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m/s (25 Prozent) am häufigsten auf [GKN 2001]. Für die Ausbreitungsrechnung wird daher eine Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s gewählt.

#### Diffusionsklassen

Die häufigste Diffusionsklasse<sup>1</sup> am Standort Neckarwestheim 1 ist D (ca. 34 Prozent) [GKN 2001]. Die Ausbreitungsrechnungen werden daher für die Diffusionsklasse D durchgeführt.

### Niederschlag

Im Durchschnitt beträgt die jährliche Niederschlagsmenge 639 mm. Die Ausbreitungsrechnungen werden für meteorologische Szenarien ohne Niederschlag und für solche mit einem kontinuierlichen Niederschlag mit einer Intensität von 1 mm/h durchgeführt.<sup>2</sup>

### Emissionshöhe

Die effektive Freisetzungshöhe wird von den genauen Umständen des Unfalls bestimmt, insbesondere vom thermischen Auftrieb durch einen Brand. Als effektive Emissionshöhe wird hier 100 m, als Freisetzungsdauer eine Stunde angenommen. Schwerwiegende orografische Einflüsse sind bei einer Emissionshöhe von 100 m nicht zu erwarten, sie werden daher in den Ausbreitungsrechnungen nicht berücksichtigt. In der folgenden Tabelle sind die Parameter der Ausbreitungsrechnung zusammengestellt:

**Tabelle 2: Parameter der Ausbreitungsrechnung**

Parameter	Einheit	mit Niederschlag	ohne Niederschlag
Diffusionsklasse		D	D
Niederschlag	[mm/h]	1	0
Windgeschwindigkeit	[m/s]	1,5	1,5
Emissionshöhe	[m]	100	100

## 7 Die Ermittlung der Strahlenbelastungen

Kommt es nach einem Reaktorunfall in Neckarwestheim 1 zu massiven radioaktiven Freisetzungen, können diese zu Strahlenexpositionen der Bevölkerung führen. Die freigesetzten radioaktiven Stoffe können auf unterschiedliche Weise zu einer Strahlenbelastung beitragen. Die wichtigsten Expositionspfade sind [BFS 1999]:

### Äußere Strahlenexposition durch:

- Strahlung aus der radioaktiven Wolke,
- Strahlung aufgrund der Bodenkontamination,
- Strahlung aufgrund der Kontamination von Haut, Kleidung oder Gegenständen.

### Innere Strahlenexposition durch:

- Inhalation von Radionukliden aus der radioaktiven Wolke oder von wieder von Böden und Oberflächen aufgewirbelten Radionukliden,
- Ingestion (Aufnahme der Radionuklide mit der Nahrung).

In dieser Studie wird zur Berechnung der potenziellen Strahlenbelastungen nur eine äußere Strahlenexposition durch Bodenstrahlung sowie eine innere Strahlenexposition durch Inhala-

<sup>1</sup> Diffusionsklassen sind ein Maß für Luftturbulenzen und damit für die atmosphärische Ausbreitung der radioaktiven Stoffe.

<sup>2</sup> Niederschlagsintensitäten bis 0,5 mm/h entsprechen einem leichten Niederschlag, von 0,5 bis 4,0 mm/h einem mittleren Niederschlag und ab 4,1 mm/h einem starken Niederschlag.

tion berücksichtigt. Dabei werden zudem nur die Nuklide betrachtet, von denen der größte Beitrag zur Strahlenexposition erwartet wird.

Eine Betrachtung der resultierenden Strahlenbelastungen aus allen denkbaren Expositionspfaden kann im Rahmen dieser Studie nicht erfolgen. Vielmehr soll hier in erster Linie geprüft werden, ob die so ermittelten Strahlenbelastungen Dosiswerte erreichen, die Katastrophenschutzmaßnahmen „Evakuierung“ und/oder „langfristige Umsiedlung“ erforderlich machen. Diese Maßnahmen (und die zugehörigen Eingreifrichtwerte) sind in den „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen“ und den „Radiologischen Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden“ veröffentlicht [BFS 1999].

## 7.1 Notfallschutzmaßnahmen und ihre Eingreifrichtwerte

Im Fall einer radioaktiven Freisetzung können Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung erforderlich werden. Handlungsbedarf besteht aus radiologischer Sicht dann, wenn eine für die Bevölkerung resultierende Strahlendosis die Höhe eines Eingreifrichtwerts erreicht [BFS 1999]. Die in dieser Studie betrachteten Maßnahmen sowie ihre Eingreifrichtwerte werden im Folgenden kurz erläutert.

### Evakuierung

Falls die berechnete Dosis für den Integrationszeitraum von sieben Tagen mehr als 100 mSv<sup>3</sup> beträgt, muss die Maßnahme „Evakuierung“ eingeleitet werden. Das Einleiten der Maßnahme „Evakuierung“ kennzeichnet die schnelle organisierte (oder zumindest durch Hilfskräfte unterstützte) Räumung eines Gebiets. Es ist keine Aussage darüber enthalten, ob die Bevölkerung in die Gebiete zurückkehren kann.

Um von den örtlich unterschiedlichen Schutzfaktoren unabhängig zu sein, wird bei der Anwendung der Eingreifrichtwerte ein ununterbrochener Aufenthalt im Freien von 24 Stunden pro Tag angenommen [BFS 1999].

Im Rahmen dieser Studie erfolgt ein Vergleich der zu erwartenden Strahlenbelastung mit diesem Eingreifrichtwert. Bei der Ermittlung der Strahlenbelastung werden jedoch nicht alle Nuklide berücksichtigt. Obendrein werden die Belastungen durch eine äußere Bestrahlung aus der radioaktiven Wolke nicht ermittelt.

### Langfristige Umsiedlung

Die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“, d.h. eine Umsiedlung über eine unbestimmt lange Zeit, ist dann erforderlich, wenn eine hohe Dosisleistung im betroffenen Gebiet durch langlebige Radionuklide nur langsam abnimmt.

Die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“ wird durchgeführt, wenn eine Strahlendosis von 100 mSv als Folge äußerer Exposition durch auf dem Erdboden und sonstigen Oberflächen abgelagerten Radionukliden in einem Jahr (Bodenstrahlung) erreicht wird. Für die Ermittlung der mit diesem Eingreifrichtwert zu vergleichenden Dosis werden Strahlenexpositionen durch Inhalation und Ingestion vernachlässigt, (1) da die Inhalationsdosis als Folge der Wiederaufwirbelung von abgelagerten Radionukliden gegenüber der äußeren Exposition der abgelagerten Radionuklide zu vernachlässigen ist, (2) da angenommen wird, dass ausreichend nicht kontaminierte Lebensmittel vorhanden sind [BFS 1999].

Im Rahmen dieser Studie erfolgt ein Vergleich der zu erwartenden Strahlenbelastung mit diesem Eingreifrichtwert. Bei der Ermittlung der Strahlenbelastung werden jedoch nicht alle Nuklide berücksichtigt.

---

<sup>3</sup> Nach der Strahlenschutzverordnung ist für die Allgemeinbevölkerung eine zusätzliche Dosis von 1 mSv pro Jahr maximal zulässig.

## 7.2 Mögliche Strahlenbelastungen nach sieben Tagen

In dieser Studie werden mithilfe der Ausbreitungsrechnungen Luft- und Bodenkontaminationen in der Umgebung des Atomkraftwerks Neckarwestheim 1 nach einem schweren Reaktorunfall ermittelt.

Daraus werden zunächst die potenziellen Strahlenbelastungen, die in einem Zeitraum von sieben Tagen aus Bodenstrahlung und Inhalation aus der radioaktiven Wolke resultieren können, berechnet. Die ermittelten Werte werden dem Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Evakuierung“ (100 mSv) gegenübergestellt. Die folgenden Tabellen fassen die Ergebnisse zusammen.

**Tabelle 2: Potenzielle Strahlendosis nach sieben Tagen (ohne Niederschlag)**

Entfernung [km]	2	5	10	15	20	30	50	75	100
Inhalationsdosis [mSv]	130.003	75.618	33.953	19.391	12.991	7.606	3.460	1.949	1.354
Dosis Bodenstrahlung [mSv]	41.491	23.375	10.089	5.492	3.547	1.965	868	479	317
Gesamtdosis [mSv]	171.495	98.992	44.042	24.884	16.538	9.571	4.328	2.428	1.671

**Tabelle 3: Potenzielle Strahlendosis nach sieben Tagen (mit Niederschlag)**

Entfernung [km]	2	5	10	15	20	30	50	75	100
Inhalationsdosis [mSv]	98.968	38.698	9.000	2.637	905	138	4	0	0
Dosis Bodenstrahlung [mSv]	632.138	182.464	49.334	16.828	6.935	1.308	57	1	0
Gesamtdosis [mSv]	731.105	221.162	58.334	19.464	7.841	1.446	61	2	0

Es errechnen sich demnach bis in große Entfernung Strahlendosen, die deutlich über dem Eingreifrichtwert (100 mSv) für die Maßnahme „Evakuierung“ liegen. Eine Evakuierung der in diesen Gebieten lebenden Bevölkerung ist daher aus Strahlenschutzgründen unbedingt erforderlich.

Im Freisetzungsszenario ohne Niederschlag wird die Gesamtdosis durch die Inhalationsdosis dominiert, im Niederschlagszenario hingegen ist die Dosis durch Bodenstrahlung wesentlich höher als die Inhalationsdosis.

Im Freisetzungsszenario ohne Niederschlag wird der Eingreifrichtwert bis in Entfernungen von über 100 km deutlich überschritten. Im Fall von Niederschlag wird der Eingreifrichtwert bis in Entfernungen von fast 50 km überschritten.

## 7.3 Mögliche Strahlenbelastungen nach einem Jahr

Weiterhin werden die Strahlenbelastungen berechnet, die in einem Zeitraum von einem Jahr aus Bodenstrahlung resultieren. Die ermittelten Werte werden dem Eingreifrichtwert für die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“ (100 mSv) gegenübergestellt. Die folgenden Tabellen fassen die Ergebnisse zusammen.

**Tabelle 4: Strahlendosis nach einem Jahr durch Bodenstrahlung (ohne Niederschlag)**

Entfernung [km]	2	5	10	15	20	30	50	75	100
Gesamtdosis [mSv]	142.755	84.902	39.751	23.265	16.235	9.651	4.797	2.807	1.947

**Tabelle 5: Strahlendosis nach einem Jahr durch Bodenstrahlung (mit Niederschlag)**

Entfernung [km]	2	5	10	15	20	30	50	75	100
Gesamtdosis [mSv]	3.375.072	996.437	279.800	98.849	41.193	7.894	356	9	0

Bis in große Entfernungen errechnen sich Strahlendosen, die deutlich über dem Eingreifrichtwert für die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“ liegen. Beim Freisetzungsszenario ohne Niederschlag wird der Eingreifrichtwert noch in mehr als 100 km Entfernung überschritten, beim Freisetzungsszenario mit Niederschlag bis in Entfernungen von rund 50 km.

## 8 Die gesundheitlichen Folgen

### 8.1 Akute Strahlenschäden

Eine Strahlenexposition mit einer Dosis über ca. 500 mSv verursacht bei Menschen in kurzer Zeit akute Strahlenschäden. Die Sterblichkeitsrate steigt mit der Strahlendosis an und beträgt bei einer Dosis von mehr als 7.000 mSv nahezu 100 Prozent [BFS 2008].

Akute Strahlenschädigung (deterministische Strahlenwirkung) ist in der Regel die Folge einer massiven Abtötung von Zellen in einem Organ- oder Gewebesystem. Überschreitet das Ausmaß der Zellabtötung in einem Gewebe oder Organ eine gewisse Höhe, so kommt es zur Funktionseinbuße des betroffenen Organs oder Gewebes.

Bei Dosen zwischen 1.000 und 5.000 mSv muss mit dem gastrointestinalen Strahlensyndrom gerechnet werden. Es ist durch das Auftreten von Übelkeit, Erbrechen, schweren Durchfällen und Störungen des Flüssigkeitshaushalts sowie Infektionen und Blutungen gekennzeichnet. Irreversible Schädigungen der Blutbildung kommen erschwerend hinzu. Bei Bestrahlungsdosen von mehr als 5.000 mSv ist die Überlebenschance nicht mehr sehr hoch, die Überlebenszeit beträgt meist nur noch wenige Stunden. Todesursache ist dann ein Versagen der zentralnervösen Regulationsmechanismen, die mit einem Schockzustand und Herz-Kreislauf-Störungen verbunden sind [BFS 2008].

In der folgenden Tabelle sind die Auswirkungen von kurzzeitig auf den Menschen einwirkender Strahlung mit hoher Dosis dargestellt:

**Tabelle 6: Auswirkungen von kurzzeitig hohen Strahlendosen**

effektive Dosis [mSv]	Auswirkung auf den Menschen
500 bis 1.000	Veränderungen des Blutbilds, Hautrötungen, vereinzelt Übelkeit, Erbrechen, sehr selten Todesfälle
1.000 bis 2.000	Nachteilige Wirkungen auf das Knochenmark, Erbrechen, Übelkeit, schlechtes Allgemeinbefinden, Sterblichkeit in etwa 20 Prozent der Fälle
ab 4.000	Schwere Einschränkungen des Allgemeinbefindens sowie schwere Störungen der Blutbildung, Infektionsbereitschaft stark erhöht, Sterblichkeit in etwa 50 Prozent der Fälle
ab 6.000	Überlebensrate nur noch sehr gering
über 7.000	Sterblichkeit bei nahezu 100 Prozent der Fälle

### 8.2 Risiko einer tödlichen Krebserkrankung

Bleibt die Strahlendosis unter einer Schwellendosis von ca. 500 mSv, tritt zwar kein akuter Fröhschaden auf, eine spätere tödliche Leukämie- oder Krebserkrankung (stochastische

Strahlenwirkung) ist jedoch nicht ausgeschlossen. Mithilfe eines sogenannten Risikofaktors kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer tödlichen Krebserkrankung angegeben werden. Der Risikofaktor ist aufgrund der Datenbasis mit Unsicherheiten behaftet.

Eine quantitative Erfassung der stochastischen Wirkung ist insgesamt nicht einfach. Es lässt sich bei dem heutigen Kenntnisstand nicht erkennen, ob sich ein Tumor aufgrund ionisierender Strahlung entwickelt hat. Daher wird mithilfe von Untersuchungen an strahlenexponierten Populationen (Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki) die Zahl von Krebstodesfällen ermittelt, die die Zahl der auch ohne Strahlung auftretenden Krebstodesfälle übersteigt. Diese Zahl kann in Beziehung gesetzt werden zu der Dosis einer vorausgegangenen Strahlenexposition. Aus beiden Daten lässt sich das Strahlenrisiko als Eintrittswahrscheinlichkeit pro Doseinheit mathematisch-statistisch ausdrücken. Die so berechneten Risikozahlen stellen keine unveränderliche Größe dar. Veränderungen in der Datenbasis können eine Änderung des berechneten Risikos bewirken [BFS 1999].

International anerkannt ist zurzeit ein numerisches individuelles tödliches Krebsrisiko nach International Commission on Radiological Protection (ICRP) Report Nr. 60 aus dem Jahr 1991. Dort wird von einem Risiko einer tödlichen Krebserkrankung in Höhe von fünf Prozent pro Sievert erhaltener Strahlendosis ausgegangen.<sup>4</sup> Andere Untersuchungen zur Strahleninduzierung von Krebs haben teils auch höhere Risiken ergeben.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) weist auf seiner Homepage statt auf den (veralteten) Risikofaktor der ICRP 60 (1991) auf einen Bericht des Wissenschaftlichen Komitees der Vereinten Nationen für die Wirkung der Atomstrahlung (UNSCEAR) aus dem Jahr 2000 hin. Auf Grundlage der verfügbaren epidemiologischen Daten beträgt das Risiko nach einer akuten Dosis von 10 mSv an Krebs zu sterben für Männer 0,09 Prozent und für Frauen 0,13 Prozent. Das entspräche Risikofaktoren von neun Prozent bzw. 13 Prozent pro Sievert [BFS 2008].

## 9 Potenzielle gesundheitliche Folgen

### 9.1 Betroffenheit durch akute Strahlenschäden

Im Rahmen dieser Studie soll auf Grundlage der ermittelten Strahlendosen eine Abschätzung der potenziellen gesundheitlichen Folgen für die Bevölkerung erfolgen. Eine quantitative Ermittlung ist mit großen Unsicherheiten behaftet, begründet vor allem in der Abschätzung der erhaltenen Strahlendosis, aber auch in der Beurteilung der stochastischen Wirkung dieser Strahlendosis.

Die Strahlenexpositionen hängen zudem von der genauen Situation nach einem derartigen Unfall ab, vor allem davon, wann die eingeleiteten Katastrophenschutzmaßnahmen greifen. Entscheidend ist insbesondere, wie rasch eine Evakuierung erfolgt.

Bei dem hier betrachteten Unfallszenario bleibt nur eine sehr kurze Zeitspanne zwischen Unfalleintritt und Freisetzung (einige Stunden). Daher ist davon auszugehen, dass vor der Freisetzung nur eine Evakuierung der Bevölkerung der Zentral- und Mittelzone um Neckarwestheim 1 (bis etwa 10 km) möglich ist und für die Bevölkerung der Außenzone (bis etwa 25 km) die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ eingeleitet wird.<sup>5</sup> Nur unter optimalen

---

<sup>4</sup> Noch 1977 (ICRP 26) wurde das Risiko an Krebs zu sterben mit einem Prozent pro Sievert angegeben, die Einschätzung dieses Risikos hatte sich 14 Jahre später verfünffacht.

<sup>5</sup> Die Umgebung einer kerntechnischen Anlage ist zur Abgrenzung vorbereitender Maßnahmen grundsätzlich in folgende drei Zonen unterteilt: Die Zentralzone umschließt unmittelbar die kerntechnische Anlage. Ihre Grenze ist den jeweils vorliegenden örtlichen Gegebenheiten angepasst und soll einen Abstand von 2 km von der Anlage nicht überschreiten. Die Mittelzone umschließt die Zentralzone. Ihre äußere Begrenzung soll durch einen Kreis mit einem Radius bis zu etwa 10 km festgelegt werden. Die Außenzone umschließt die Mittelzone. Ihre äußere Begrenzung soll durch einen Kreis mit einem Radius bis zu etwa 25 km festgelegt werden.

Randbedingungen kann auch die Außenzone (noch vor Durchzug der radioaktiven Wolke) evakuiert werden.

Aufgrund der über dem Eingreifrichtwert liegenden Dosiswerte wird auch die Evakuierung von mehr als 25 km entfernt liegenden Orten erforderlich werden. Für diese Gebiete liegen keine konkreten Katastrophenschutzpläne vor. Es wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass die Evakuierung der dort lebenden Bevölkerung aus logistischen Gründen (z.B. Bereitstellung von Strahlenschutzkräften und Fahrzeugen) und aus Strahlenschutzgründen (hohe Bodenkontaminationen) frühestens fünf Stunden nach Durchzug der Wolke erfolgen kann und spätestens nach drei Tagen abgeschlossen ist.

Für eine Abschätzung der potenziellen gesundheitlichen Folgen wird hier angenommen, dass sich die Bevölkerung ab einer Entfernung von 10 km aufgrund der angeordneten Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ in Gebäuden aufhalten. Es wird weiterhin angenommen, dass die Personen dort – für einen Zeitraum von mindestens fünf Stunden und höchstens drei Tagen – bis zur Evakuierung verbleiben. Für die Rechnungen wird von dem Mittelwert dieses Zeitraums ausgegangen (38,5 Stunden).

Der Schutzfaktor eines Gebäudes<sup>6</sup> hinsichtlich einer externen Exposition durch Bodenstrahlung ist sehr unterschiedlich und beträgt teilweise nur 10. Der Schutzfaktor eines Gebäudes hinsichtlich einer inneren Exposition durch Inhalation liegt bei geschlossenen Fenstern zwischen 2 und 5 [BFS 1999]. Insofern würde sich die mögliche Strahlenbelastung bei einem Aufenthalt im Gebäude gegenüber einem Aufenthalt im Freien um den Faktor 10 (Bodenstrahlung) bzw. 2 bis 5 (Inhalation) reduzieren. In dieser Studie werden für die Berechnung der potenziellen Strahlendosen ein mittlerer Schutzfaktor (3,5) für die Inhalation und ein Schutzfaktor von 10 hinsichtlich Bodenstrahlung zugrunde gelegt. Die so ermittelten Strahlendosen sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

**Tabelle 7: Potenzielle Strahlenbelastung bei Aufenthalt im Gebäude (ohne Niederschlag)**

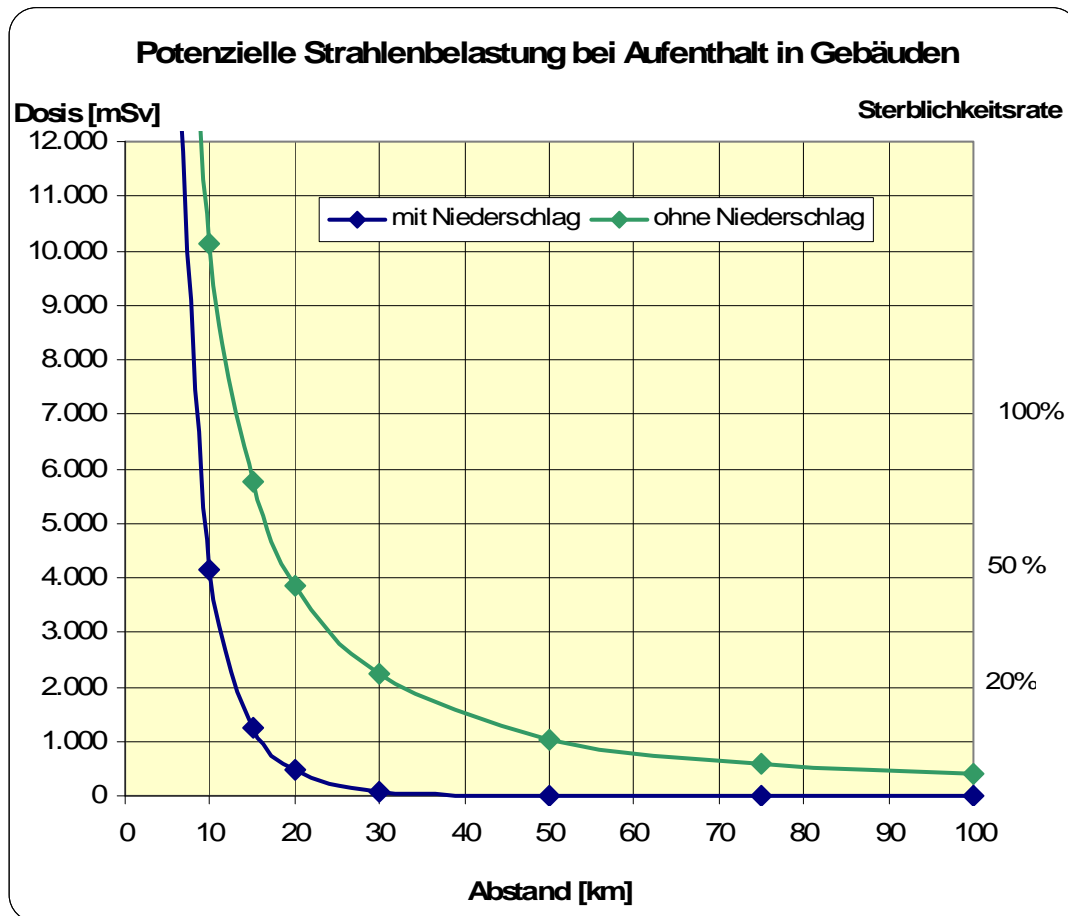
Entfernung [km]	(2)	(5)	10	15	20	30	50	75	100
Inhalationsdosis [mSv]	(37.144)	(21.605)	9.701	5.540	3.712	2.173	989	557	387
Dosis durch Bodenstrahlung [mSv]	(1.946)	(1.053)	426	218	134	69	27	14	9
<b>Gesamtdosis nach 38,5 h [mSv]</b>	<b>(39.090)</b>	<b>(22.658)</b>	<b>10.127</b>	<b>5.758</b>	<b>3.846</b>	<b>2.242</b>	<b>1.015</b>	<b>571</b>	<b>396</b>

**Tabelle 8: Potenzielle Strahlenbelastung bei Aufenthalt im Gebäude (mit Niederschlag)**

Entfernung [km]	(2)	(5)	10	15	20	30	50	75	100
Inhalationsdosis [mSv]	(28.276)	(11.057)	2.571	753	259	39	1	0	0
Dosis durch Bodenstrahlung [mSv]	(21.509)	(6.032)	1.563	512	205	38	2	0	0
<b>Gesamtdosis nach 38,5 h [mSv]</b>	<b>(49.785)</b>	<b>(17.089)</b>	<b>4.135</b>	<b>1.265</b>	<b>464</b>	<b>77</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

<sup>6</sup> Der Schutzfaktor quantifiziert den Unterschied zwischen der Exposition im Freien und bei einem Aufenthalt in Gebäuden.

Die folgende Grafik stellt die ermittelten Strahlenbelastungen und die entsprechende Sterblichkeitsrate dar.



**Abbildung 2: Potenzielle Strahlenbelastung bei Aufenthalt im Gebäude**

Für das niederschlagsfreie Szenario errechnen sich bis in eine Entfernung von 10 km (und für das Szenario mit Niederschlag bis in eine Entfernung von etwa 8 km) Strahlendosen, die in jedem Fall zum Tode führen würden. Allerdings ist davon auszugehen, dass die dort lebende Bevölkerung in der Vorfreisetzungsphase evakuiert wird und somit dieser tödlichen Strahlendosis nicht ausgesetzt ist.

In einer Entfernung von 10 bis 25 km (Außenzone) errechnen sich für das niederschlagsfreie Szenario Strahlendosen von etwa 10.000 bis 3.000 mSv. Bei Strahlendosen in dieser Höhe ist mit akuten Strahlenschäden zu rechnen, die zum Tode führen können. Die Überlebenswahrscheinlichkeit liegt zwischen etwa null und 65 Prozent. Bis in eine Entfernung von 50 km ist die errechnete Dosis noch so hoch, dass sie in einigen Fällen zum Tode führen kann.

Für das Szenario mit Niederschlag errechnet sich für die Außenzone in einer Entfernung von 10 km eine Strahlendosis von 4.000 mSv. Dieser Dosis ist eine Sterblichkeitsrate von 50 Prozent zuzuordnen. Bis in eine Entfernung von 20 km werden Strahlendosen von fast 500 mSv errechnet. Auch diese Strahlendosen führen zu akuten Strahlenschäden. Sie würden aber nicht bzw. nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit zum Tode führen. Da Niederschlag die radioaktiven Stoffe aus der Wolke auswäscht, sind in noch größerer Entfernung nur noch geringe Strahlendosen zu erwarten.

Aufgrund der raschen Freisetzung kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass sich Personen bei Durchzug der Wolke im Freien oder im Gebäude bei offenen Fenstern aufhalten, da sie eine Warnung nicht rechtzeitig erreicht hat.<sup>7</sup>

Für Personen, die sich an einem niederschlagsfreien Tag während des Durchzugs der radioaktiven Wolke im Freien aufhalten, wird bis in eine Entfernung von ca. 30 km eine tödliche Inhalationsdosis ermittelt. Im Fall von Niederschlag während des Durchzugs der Wolke errechnet sich bei einem Aufenthalt im Freien bis in eine Entfernung von ca. 11 km eine tödliche Inhalationsdosis von mehr als 7.000 mSv.

Die beschriebenen gesundheitlichen Folgen für die Bevölkerung nach einer massiven radioaktiven Freisetzung in Neckarwestheim 1 sind als grobe Abschätzungen zu verstehen. Aus diesen Abschätzungen wird aber insgesamt deutlich, dass die resultierenden Strahlenbelastungen nach einem schweren Unfall im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 lebensbedrohlich hoch sein werden. Das gilt insbesondere, da im Rahmen dieser Studie (1) nur die Strahlenbelastungen infolge einiger Nuklide und (2) nur durch die Belastungspfade Bodenstrahlung und Inhalation ermittelt werden. Die Strahlenbelastung durch alle freigesetzten Nuklide und über alle zu berücksichtigten Pfade läge etwas höher.

## 9.2 Betroffenheit durch eine tödliche Krebserkrankung

Auch für den Fall, dass eine Person nicht sofort eine tödliche Strahlendosis erhält, sind ihr Leben und ihre Gesundheit durch die Spätfolgen der radioaktiven Strahlung bedroht. Auf Grundlage der ermittelten Strahlendosen kann das Risiko abgeschätzt werden, dass jemand nach einem Unfall in Neckarwestheim 1 an Krebs mit tödlichem Ausgang erkrankt.

Wenn – wie oben begründet – von einem Aufenthalt im Gebäude von 38,5 Stunden ausgegangen wird, errechnet sich (unter Verwendung des Risikofaktors aus ICRP 60) zum Beispiel für das Szenario ohne Niederschlag in einer Entfernung von 25 bis 50 km ein zusätzliches Risiko an Krebs zu sterben in Höhe von fünf bis 15 Prozent. Erfolgt die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer tödlichen Krebserkrankung auf Basis der im UNSCEAR-Bericht angegebenen Risikofaktoren, errechnet sich hierfür ein Risiko in Höhe von 13 bis 39 Prozent für Frauen und von neun bis 27 Prozent für Männer. Hinzu kommt ein erhöhtes Risiko einer nichttödlichen Krebserkrankung<sup>8</sup> und eines Auftretens von Erbschäden [BFS 2008].

## 10 Gesamtbewertung und Diskussion der Ergebnisse

Der Absturz eines Verkehrsflugzeugs auf das Reaktorgebäude in Neckarwestheim 1 würde eine großflächige Zerstörung von Gebäude und Containment verursachen. Die Beherrschbarkeit eines solchen Unfalls ist grundsätzlich fraglich. Aufgrund der Auslegungsdefizite der älteren Atomkraftwerke wird dieses Ereignis im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit einen nicht beherrschbaren Verlauf nehmen und zu einem Kernschmelzunfall bei offenem Containment führen.

Nach den Ergebnissen dieser Studie kann die Bevölkerung durch die Auswirkungen eines derartigen schweren Unfalls im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 stark betroffen sein. In Windrichtung kommt es für die hier berechneten Freisetzungsszenarien zu hohen Kontaminationen. Die resultierenden Strahlenbelastungen überschreiten noch in großen Entfernungen die Eingreifrichtwerte für die Katastrophenschutzmaßnahmen „Evakuierung“ und „langfristige Umsiedlung“. Die Werte sind so hoch, dass auch bei meteorologischen Szenarien mit anderen Windstärken, Diffusionsklassen oder Niederschlagsintensitäten von einer Überschreitung der Eingreifrichtwerte ausgegangen werden muss.

---

<sup>7</sup> Im Falle eines nächtlichen Unfalls z.B. könnten sie sich schlafend bei einem geöffneten Fenster im Haus befinden.

<sup>8</sup> Die strahleninduzierte Wahrscheinlichkeit an Krebs zu erkranken, ist doppelt so hoch, wie an Krebs zu sterben.

Da die hier ermittelten potenziellen Strahlenbelastungen den Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Evakuierung“ in dem in Windrichtung liegenden Sektor weit überschreiten, wäre eine schnellstmögliche Evakuierung der dort lebenden Bevölkerung erforderlich. Es ist jedoch zu befürchten, dass aufgrund der raschen Freisetzung nur eine Evakuierung bis in eine Entfernung von 10 km erfolgen kann. In dem 10-km-Umkreis des Atomkraftwerks Neckarwestheim 1 leben insgesamt etwa 170.000 Menschen, von denen – je nach Windrichtung – einige Zehntausende evakuiert werden müssten [GKN 2001].

Die radioaktive Wolke hätte die im 10-km-Umkreis liegenden Orte innerhalb von zwei Stunden nach Freisetzungsbeginn erreicht. In der folgenden Tabelle ist die Zeitdauer zwischen Freisetzung und Ankunft der radioaktiven Wolke bei einer Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s dargestellt:

**Tabelle 9: Zeitdauer für die Ausbreitung der radioaktiven Wolke**

Entfernung [km]	5	10	15	20	30	50	75	100
Zeitdauer [h:min]	00:55	01:51	02:46	03:42	05:33	09:15	13:53	18:31

In dieser Studie wird angenommen, dass sich die (vor Durchzug der radioaktiven Wolke) nicht evakuierten Personen bis zu ihrer Evakuierung in Gebäuden aufhalten. Für das Szenario ohne Niederschlag errechnet sich dann bis in etwa 12 km Entfernung eine tödliche Dosis und bis in eine Entfernung von fast 20 km eine in 50 Prozent der Fälle tödliche Dosis. Für das Szenario mit Niederschlag errechnet sich in einer Entfernung von mehr als 10 km eine Strahlendosis, die höchst wahrscheinlich nicht zum Tode, aber zu akuten Strahlenschäden führen wird. Zudem besteht die Gefahr, an den Spätfolgen der Strahlenbelastung infolge einer Krebserkrankung zu sterben.

Die größten Ballungsgebiete liegen mit Stuttgart, Esslingen, Ludwigsburg und Sindelfingen in einer Entfernung von 20 bis 40 km südlich von Neckarwestheim. Die Wahrscheinlichkeit von Nordwind ist mit acht Prozent zwar nicht hoch, aber eine Gefährdung der dortigen Bevölkerung, das sind fast eine Millionen Menschen, ist nicht ausgeschlossen. Heilbronn, eine Stadt mit rund 120.000 Einwohnern, liegt in einer Entfernung von 12 bis 25 km im Norden und ist daher bei der zweithäufigsten Windrichtung (11 Prozent) betroffen.

Vermutlich hätten viele Personen zwar die Möglichkeit das Gebiet selbstständig zu verlassen, sie nutzen diese aber nicht zwangsläufig. Denn damit würden sie das Risiko eingehen, z.B. im Fall eines Verkehrsstaus, im Freien erheblichen und möglicherweise tödlichen Strahlenexpositionen ausgesetzt zu sein.

Angesichts der kurzen Vorwarnzeit kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die Bevölkerung in der näheren Umgebung rechtzeitig vor Durchzug der radioaktiven Wolke gewarnt wird. Die Personen die sich bei Durchzug der Wolke im Freien oder im Gebäude bei offenen Fenstern aufhalten, würden an einem niederschlagsfreien Tag bis in einer Entfernung von ca. 30 Kilometern eine in jedem Fall tödliche Dosis erhalten. Im Fall von Niederschlag errechnet sich bis in eine Entfernung von ca. 11 km eine tödliche Dosis.

Selbst wenn es gelänge, die Menschen durch eine sofortige Evakuierung vor Strahlenschäden zu bewahren, würden sie von den Auswirkungen eines schweren Reaktorunfalls in Neckarwestheim erheblich betroffen sein. Auch durch Katastrophenschutzmaßnahmen lassen sich die hohen Bodenkontaminationen großer Flächen nicht vermeiden. Von den dadurch resultierenden Strahlenbelastungen kann die dort lebende Bevölkerung nur durch eine langfristige Umsiedlung bewahrt werden.

Eine Umsiedlung über einen langen Zeitraum, gar für den Rest des Lebens, ist als schwerer Eingriff in die persönlichen Lebensumstände zu betrachten. Die betroffene Bevölkerung muss in anderen Gebieten neu angesiedelt und in das gesellschaftliche und wirtschaftliche Leben integriert werden. Dies bedeutet nicht nur das Schaffen neuen Wohnraums und neuer

Arbeitsplätze, sondern für die betroffenen Menschen auch die Bewältigung sozialer Probleme und psychischer Belastungen [BFS 1999].

In einer Studie im Auftrag der Vereinten Nationen, die die Auswirkungen der Umsiedlung auf die Menschen nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl untersuchte, werden die psychosozialen Effekte auf die betroffenen Menschen hervorgehoben. Sie spielen in Wechselwirkung mit den direkten Auswirkungen auf die Gesundheit eine sehr wichtige Rolle. Als mögliche Effekte wurden z.B. die physiologischen Folgen von Stress durch die Veränderung der Lebensumstände identifiziert. Zweifellos kann durch eine Umsiedlung die Strahlenbelastung deutlich reduziert werden, aber es können andere Beeinträchtigungen auftreten, die ebenfalls schwerwiegend sein können.

Die errechnete Cäsium-137-Kontamination wäre im Vergleich mit der Kontamination in der entsiedelten 30-km-Zone rund um den Reaktor in Tschernobyl hoch [EU 1998]. Das ist wenig überraschend. Denn während in Tschernobyl eine lang andauernde Freisetzung und eine wechselnde Wetterlage zu einer großräumigen Verteilung der radioaktiven Stoffe führte und somit die Kontamination – bis auf einige Ausnahmen – verhältnismäßig „gering“ blieb, kommt es in dem hier untersuchten Freisetzungsszenario zu räumlich begrenzten und damit wesentlich höheren Kontaminationen.

Die vorliegende Studie bestätigt die Resultate vorangegangener Studien. Diese zeigten, dass nach einem Kernschmelzunfall bei offenem Containment mit katastrophalen Folgen zu rechnen ist. Laut der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke treten dann in der Umgebung der Anlage akute Strahlenschäden mit Todesfolge auf [GRS 1989]. Es wären bis zu 15.000 Todesfälle zu erwarten. Dazu kämen etwa eine Millionen Tote durch Spätschäden (Krebs) sowie eine hohe Anzahl an nichttödlichen Krebserkrankungen und genetische Schäden. Es müssten Flächen von bis zu 10.000 km<sup>2</sup> evakuiert werden. Flächen von bis zu 100.000 km<sup>2</sup> wären derart kontaminiert, dass die dortige Bevölkerung langfristig umgesiedelt werden müsste [HAHN 1999].

Laut einer aktuellen Studie ist nach einem derartigen Unfall im AKW Neckarwestheim 1 die Evakuierung eines Gebiets bis in eine Entfernung von etwa 600 km erforderlich. Die maximale Breite des Gebiets würde senkrecht zur Ausbreitungsrichtung etwa 50 km betragen. Von einer langfristigen Umsiedlung wäre ein Gebiet bis in etwa 350 km Entfernung bei einer maximalen Breite von etwa 60 km betroffen [EUROSOLAR 2007].

Anzumerken ist, dass in Hinblick auf einen gezielten Absturz eines Verkehrsflugzeugs die in dieser Studie angenommenen Freisetzungsmengen (und damit auch die hier ermittelten Strahlenbelastungen) nicht den zu erwartenden Maximalwerten entsprechen. Zudem werden nicht alle Belastungspfade und Nuklide zur Ermittlung der potenziellen Strahlendosen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der GRS-Studie zum gezielten Flugzeugabsturz und die zu erwartenden Auswirkungen veranlassten die Bundesregierung, eine geeignete Nachrüstmaßnahme für Atomkraftwerke zu suchen. Im September 2005 einigten sich die Betreiber und das Bundesumweltministerium auf ein derartiges Schutzkonzept, das auf einer Vernebelung der Atomkraftwerke basiert. Eine Vernebelung der Atomkraftwerke verringert die Trefferwahrscheinlichkeit eines terroristischen Flugzeugangriffs nur unwesentlich und bringt daher – insbesondere bei älteren Atomkraftwerken – keinen Sicherheitsgewinn.

Das BMU bestritt zwar die Unzulänglichkeiten der Vernebelung nie, verwies jedoch darauf, dass diese nur Teil eines Gesamtkonzepts ist. Ein wesentlicher Teil dieses Gesamtkonzepts – der Abschuss eines gekaperten Verkehrsflugzeugs – musste aber nach einem Urteil des Bundesverfassungsgerichts (Februar 2006) aufgegeben werden. Eine weitere Komponente – die Störung des GPS-Systems – wird nicht umgesetzt. Das Gesamtkonzept ist offensichtlich gescheitert. Angesichts der katastrophalen Auswirkungen eines derartigen Terroranschlags geht ein hohes Risiko von Neckarwestheim 1 aus.

## 11 Zusammenfassung

In dieser Studie werden die Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 für die in einer Entfernung bis 100 km lebende Bevölkerung ermittelt.

Aufgrund des Terroranschlags am 11.09.2001 erstellte die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) eine Studie zu den potenziellen Auswirkungen terroristischer Flugzeugangriffe auf deutsche Atomkraftwerke. Ergebnis der Studie war, dass diese gegen den Absturz eines Verkehrsflugzeugs weder ausgelegt noch ausreichend geschützt sind. Besonders bei den älteren Anlagen, zu denen auch Neckarwestheim 1 gehört, besteht ein hohes Risiko.

Bei einem Absturz eines Verkehrsflugzeugs auf das Reaktorgebäude von Neckarwestheim 1 ist mit einer großflächigen Zerstörung des Gebäudes zu rechnen. Die Beherrschbarkeit dieses Ereignisses wird von der GRS als fraglich eingestuft. Eine Nichtbeherrschbarkeit bedeutet, dass ein Kernschmelzunfall mit massiven radioaktiven Freisetzungen resultieren würde.

Anlagenspezifische Untersuchungen, die die grundsätzlichen Ergebnisse der GRS-Studie hinsichtlich der Beherrschbarkeit eines Flugzeugabsturzes in Neckarwestheim 1 widerlegen, wurden bisher nicht durchgeführt. Anhand der bekannten Auslegungsdefizite muss die Beherrschbarkeit eines derartigen Ereignisses jedoch auch ohne detaillierte Analysen ausgeschlossen werden.

Neckarwestheim 1 zählt zu den im Rahmen von Terrorangriffen verwundbarsten deutschen Atomkraftwerken. Seine besondere Verwundbarkeit ist nicht nur durch die geringe Wandstärke des Reaktorgebäudes, sondern auch durch weitere Auslegungsdefizite gegeben.

Unfallabläufe und Folgen eines Terrorangriffs können (je nach Angriffsszenario) sehr unterschiedlich sein. Aufbauend auf den Ergebnissen früherer Studien wird als Unfallszenario ein Kernschmelzunfall mit offenem Containment gewählt. Ein gezielter Absturz eines Verkehrsflugzeugs kann einen solchen Reaktorunfall verursachen. Aber auch andere Terrorangriffe oder Unfallabläufe aufgrund interner Störfälle, die zu einer Kernschmelze mit einem frühen Versagen des Containments führen können, sind vorstellbar. Die radioaktiven Freisetzungen wären in diesem Fall besonders hoch (50 bis 90 Prozent der leicht flüchtigen Nuklide) und erfolgen zudem besonders schnell (innerhalb weniger Stunden) [GRS 1989; SSK 2004]. Für Maßnahmen des Katastrophenschutzes stünde damit sehr wenig Zeit zur Verfügung.

Für die Bestimmung der Unfallfolgen wird in dieser Studie ein Freisetzunganteil von 50 Prozent angesetzt. Dieser kann für einen Angriff mit einem Verkehrsflugzeug eher unterschätzend sein (aufgrund der großflächigen Zerstörung des Containments einerseits und einem die Freisetzung stark fördernden Treibstoffbrand andererseits).

Mithilfe eines Ausbreitungsprogramms werden die Boden- und Luftkontaminationen ermittelt, die in der Umgebung von Neckarwestheim 1 auftreten können. Die Ausbreitungsrechnungen werden für meteorologische Szenarien ohne Niederschlag und für solche mit einem kontinuierlichen Niederschlag (1 mm/h) durchgeführt. Als weitere Parameter der Ausbreitungsrechnungen werden die häufigste Diffusionsklasse (D) und die häufigste Windgeschwindigkeit (1,5 m/s) am Standort gewählt.

In dieser Studie wird zur Berechnung der potenziellen Strahlenbelastung nur (1) eine äußere Strahlenexposition durch Bodenstrahlung sowie (2) eine innere Strahlenexposition durch Inhalation berücksichtigt. Es werden zudem nur die Nuklide betrachtet, von denen der größte Beitrag zur Strahlenexposition erwartet wird.

Für das niederschlagsfreie Szenario errechnen sich dennoch bis in Entfernungen von mehr 100 km Strahlendosen, die deutlich über dem Eingreifrichtwert für die Maßnahme „Evakuierung“ liegen. Für das Szenario mit Niederschlag liegt die ermittelte Strahlendosis bis etwa 40 km über diesem Eingreifrichtwert.

Auch der Eingreifrichtwert für die Maßnahme „langfristige Umsiedlung“ wird für das niederschlagsfreie Szenario noch in einer Entfernung von 100 km erheblich überschritten. Die ermittelte Strahlendosis für das Szenario mit Niederschlag liegt bis etwa 60 km über diesem Eingreifrichtwert.

Anhand der für bestimmte Szenarien errechneten Strahlendosen ist davon auszugehen, dass im Fall eines schweren Reaktorunfalls in Neckarwestheim 1 die in Windrichtung lebende Bevölkerung bis in große Entfernung sowohl sofort evakuiert als auch langfristig umgesiedelt werden muss.

Die dominierenden Windrichtungen am Standort Neckarwestheim sind Westen und Süden. Im Fall eines Reaktorunfalls in Neckarwestheim 1 sind daher vor allem die im Osten bzw. Norden gelegenen Gebiete gefährdet. Im Norden liegt in einer Entfernung von 12 bis 25 km die Stadt Heilbronn mit etwa 120.000 Einwohnern. Aber auch die im Westen oder Süden lebende Bevölkerung kann – wenn auch mit geringerer Wahrscheinlichkeit – betroffen sein. Gerade im Süden liegen mehrere Ballungsgebiete, dort leben insgesamt fast eine Millionen Menschen. Ludwigsburg ist z.B. nur etwa 20 km, Stuttgart nur etwa 30 km entfernt.

Im Rahmen dieser Studie werden auf Grundlage der ermittelten Strahlendosen die potenziellen gesundheitlichen Folgen für die Bevölkerung abgeschätzt. Die Strahlenexpositionen hängen von der genauen Situation nach einem derartigen Unfall ab, vor allem davon, wie schnell die Katastrophenschutzmaßnahmen (insbesondere die Evakuierung) erfolgen.

Bei dem hier betrachteten Unfallszenario bleibt nur eine sehr kurze Zeitspanne zwischen Unfalleintritt und Freisetzung (wenige Stunden). Daher wird angenommen, dass vor der Freisetzung nur für die Bevölkerung der Zentral- und Mittelzone um das Atomkraftwerk (bis etwa 10 km) die Durchführung der Maßnahme „Evakuierung“ möglich ist. Die weiter entfernt lebende potenziell betroffene Bevölkerung hält sich aufgrund der angeordneten Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ in Gebäuden auf und verbleibt dort – für einen Zeitraum von mindestens fünf Stunden und höchstens drei Tagen – bis zur Evakuierung.

Für das niederschlagsfreie Szenario errechnen sich bis in eine Entfernung von 12 km Strahlendosen, die zum Tode führen. Noch für eine Entfernung von fast 20 km werden Strahlendosen ermittelt, die in 50 Prozent der Fälle zum Tode führen würden.

Für das Szenario mit Niederschlag errechnet sich in einer Entfernung von 10 km eine Strahlendosis von 4.000 mSv. Dieser Dosis ist eine Sterblichkeitsrate von 50 Prozent zuzuordnen. Bis in eine Entfernung von 20 km werden Strahlendosen über 500 mSv errechnet. Sie würden aber nicht (bzw. nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit) zum Tode durch akute Strahlenschäden führen.

Aber auch das Leben und die Gesundheit von den Personen, die nicht sofort eine tödliche Strahlendosis erhalten, sind durch die Spätfolgen der radioaktiven Strahlung bedroht, z.B. durch eine Krebserkrankung.

Aufgrund der raschen Freisetzung kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass sich Personen bei Durchzug der Wolke im Freien oder im Gebäude bei offenen Fenstern aufhalten, da sie nicht rechtzeitig erreicht gewarnt werden. Ihr Leben wäre stark bedroht. Für das niederschlagsfreie Szenario errechnet sich bis in eine Entfernung von ca. 30 km und für das Niederschlagsszenario bis in eine Entfernung von ca. 11 km eine tödliche Inhalationsdosis.

Die Umsetzung eines Schutzkonzeptes vor einem terroristisch motivierten Absturz eines Verkehrsflugzeugs ist gescheitert. Die Auswirkungen eines derartigen schweren Unfalls wären katastrophal. Die Gefahr, die hinsichtlich eines Flugszeugsabsturzes vom Atomkraftwerk Neckarwestheim 1 ausgeht, ist daher sehr hoch.

## 12 Literatur

- BFS 1999 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz: Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen; Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden; Stand 12/99
- BFS 2008 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Strahlenwirkungen; [www.bfs.de](http://www.bfs.de), eingesehen im August 2008
- BMU 2002 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. September 2001 – Ergebnisse der GRS-Untersuchungen aus dem Vorhaben „Gutachterliche Untersuchungen zu terroristischen Flugzeugabstürzen auf deutsche Kernkraftwerke“; Bonn; 27.11.2002
- BMU 2004 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Atom/Sicherheit – Schutzkonzept der Betreiber nicht ausreichend; BMU Pressedienst Nr. 52/04, Berlin; 01.03.2004
- EUROSOLAR 2007 Eurosolar: Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“ am Beispiel der Anlage Biblis-A; Studie; Chr. Pistner, Chr. Küppers; 20.11.2007
- GKN 2001 Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar (GKN): Sicherheitsbericht GKN-Zwischenlager (GKN-ZL); 18.05.2001
- GRS 1989 Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS): Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B: Eine zusammenfassende Darstellung; Köln; 1989
- HAHN 1999 L. Hahn: Kernkraftwerke der Welt – Bestand, Funktionsweise, Sicherheitsprobleme; in: Gefahren der Atomkraft; Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein, 2. aktualisierte Auflage, Kiel; Mai 1999
- LLNL 2008 Lawrence Livermore National Laboratory; arbeitet für das U.S. Department of Energy an der University of California; Livermore (Kalifornien), [www.llnl.gov](http://www.llnl.gov), eingesehen im August 2008
- NP 2010 Neue Presse: Terror-Kommando in Deutschland?, 18.11.2010
- SSK 2003 Strahlenschutzkommission (SSK): Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitel 4: Berechnung der Strahlenexposition, verabschiedet auf der 186. Sitzung der SSK am 11.09.2003
- SSK 2004 Strahlenschutzkommission (SSK): Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt-, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 37; 2004