

Hübner, Felix; Jung, Jennifer Jana; Schultmann, Frank

Working Paper

Auswirkungen nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt

Working Paper Series in Production and Energy, No. 21

Provided in Cooperation with:

Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Industrial Production (IIP)

Suggested Citation: Hübner, Felix; Jung, Jennifer Jana; Schultmann, Frank (2017) : Auswirkungen nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt, Working Paper Series in Production and Energy, No. 21, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Industrial Production (IIP), Karlsruhe, <https://doi.org/10.5445/IR/1000068411>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/176747>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Auswirkungen nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt

Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann

No. 21 | März 2017

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



Auswirkungen nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt

Felix Hübner, Jennifer Jana Jung and Frank Schultmann

Chair of Business Administration, Production and Operations Management,
Institute for Industrial Production (IIP),
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Hertzstr. 16, building 06.33, 76187 Karlsruhe,
Tel.: +49 721 608-44677, email: felix.huebner@kit.edu

In den 1950er und 1960er Jahren glaubten viele Länder, dass sie mit Hilfe der zivilen Nutzung der Kernenergie energieautark werden können. Unter anderem aus diesem Grund erlebte die Kernenergie in diesen Jahren international einen enormen Aufschwung. In den folgenden Jahrzehnten wurden viele Kernkraftwerke geplant und gebaut. Trotz einiger Kritiker, die auf die Gefahren der Kernenergienutzung aufmerksam machten, war ein Ende des Aufschwungs zunächst nicht in Sicht.

Als im Jahr 1979 der Reaktorunfall eines Kernkraftwerkes westlicher Bauart in Three Mile Island in Harrisburg (USA) auf internationaler Ebene für Aufsehen sorgte, wurde die Kritik an der Kernenergienutzung lauter. Allerdings wurde vielen Europäern die von Kernkraftwerken ausgehende Gefahr erst im Jahr 1986 bewusst, als es im ukrainischen Kernkraftwerk Tschernobyl zu einer Nuklearkatastrophe kam. Aufgrund der relativen Nähe zu Mitteleuropa waren Auswirkungen dieser Nuklearkatastrophe auch in diesen Gebieten spürbar. Zuletzt hat die Nuklearkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi dazu geführt, dass in Deutschland und weltweit ein beschleunigter Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie vorangetrieben wird.

In dieser Arbeit stehen nicht die politischen Auswirkungen der genannten nuklearen Unfälle, sondern vielmehr die Auswirkungen nuklearer Unfälle auf Menschen, Tiere und die Umwelt im Vordergrund. Dazu werden insbesondere Berichte über die Vorkommnisse in Tschernobyl und Fukushima sowie Studien über deren Auswirkungen analysiert und zusammengefasst.

Auswirkungen nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt

Felix Hübner • Jennifer Jana Jung • Frank Schultmann

Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Institute for Industrial Production (IIP)
Hertzstraße 16,
D-76187 Karlsruhe, Germany

felix.huebner@kit.edu

Vorbemerkung:

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Frau Jennifer Jana Jung in Zusammenarbeit mit ihrem Betreuer Herrn Felix Hübner im Frühjahr 2016 erarbeitet.

Kurzfassung

In den 1950er und 1960er Jahren glaubten viele Länder, dass sie mit Hilfe der zivilen Nutzung der Kernenergie energieautark werden können. Unter anderem aus diesem Grund erlebte die Kernenergie in diesen Jahren international einen enormen Aufschwung. In den folgenden Jahrzehnten wurden viele Kernkraftwerke geplant und gebaut. Trotz einiger Kritiker, die auf die Gefahren der Kernenergienutzung aufmerksam machten, war ein Ende des Aufschwungs zunächst nicht in Sicht.

Als im Jahr 1979 der Reaktorunfall eines Kernkraftwerkes westlicher Bauart in Three Mile Island in Harrisburg (USA) auf internationaler Ebene für Aufsehen sorgte, wurde die Kritik an der Kernenergienutzung lauter. Allerdings wurde vielen Europäern die von Kernkraftwerken ausgehende Gefahr erst im Jahr 1986 bewusst, als es im ukrainischen Kernkraftwerk Tschernobyl zu einer Nuklearkatastrophe kam. Aufgrund der relativen Nähe zu Mitteleuropa waren Auswirkungen dieser Nuklearkatastrophe auch in diesen Gebieten spürbar. Zuletzt hat die Nuklearkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi dazu geführt, dass in Deutschland und weltweit ein beschleunigter Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie vorangetrieben wird.

In dieser Arbeit stehen nicht die politischen Auswirkungen der genannten nuklearen Unfälle, sondern vielmehr die Auswirkungen nuklearer Unfälle auf Menschen, Tiere und die Umwelt im Vordergrund. Dazu werden insbesondere Berichte über die Vorkommnisse in Tschernobyl und Fukushima sowie Studien über deren Auswirkungen analysiert und zusammengefasst.

Abstract

In the 1950s and 1960s many countries believed that they could become energy self-efficient with the help of nuclear power plants. For this reason, nuclear energy experienced internationally an enormous upswing during these years. In the following decades, many nuclear power plants were planned and built. Despite a few critics, who drew attention to the dangers of nuclear power use, an end to the upturn was not foreseeable.

But in 1979, the nuclear accident in Three Mile Island in Harrisburg (USA) caused international attention and the critics of the nuclear power became stronger. However, many Europeans only were aware of the danger by nuclear power plants when in 1986 the nuclear disaster occurred in the Ukrainian nuclear power plant in Chernobyl. The effects of this nuclear disaster were also felt in Central Europe. Recently, the nuclear disaster at the Fukushima nuclear power plant has prompted a nuclear phase-out in Germany and the rest of the world.

This work focuses not on the political implications of these nuclear accidents, but rather on the impacts of nuclear accidents on human beings, animals and the environment. In particular, reports on the incidents in Chernobyl and Fukushima as well as studies on their effects are analysed and summarised.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Problemstellung	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	2
2 Auswirkungen von Nuklearunfällen auf Mensch und Umwelt.....	4
2.1 Tschernobyl	5
2.1.1 Ereignis	5
2.1.2 Folgen durch die Unfallbekämpfung	6
2.1.3 Folgen für die Bevölkerung	8
2.1.4 Folgen für die Umwelt und Tiere	11
2.2 Fukushima	13
2.2.1 Ereignis	13
2.2.2 Folgen durch die Unfallbekämpfung	14
2.2.3 Folgen für die Bevölkerung	15
2.2.4 Folgen für die Umwelt und Tiere	17
3 Fazit	19
3.1 Zusammenfassung.....	19
3.2 Kritische Würdigung und Ausblick	19
Literaturverzeichnis	21

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Menschen und die Umwelt sind sowohl natürlicher als auch zivilisatorischer Strahlenquellen ausgesetzt. Dazu zählen unter anderem die kosmische und terrestrische Strahlung aus der Natur, die nur bedingt beeinflussbar sind. Unter anderem hängt die natürliche Strahlenbelastung vom Aufenthaltsort und der Höhe ab (Kiefer, 2012, S. 146). Neben der natürlichen Strahlenexposition sind Menschen und die Umwelt auch zivilisatorischen Strahlenquellen ausgesetzt (vgl. Tabelle 1). Unter anderem in der Medizin, Forschung und Technik wird Radioaktivität genutzt. Anhand der effektiven Dosis (Ausführungen zu Strahlungsarten und deren Wirkungen auf den Menschen und die Umwelt sind in Hübner et al. (2017) zu finden) wird deutlich, dass der Anteil, der durch kerntechnische Anlagen in die Umwelt gelangt, im Vergleich zu anderen natürlichen und zivilisatorischen Strahlenquellen äußerst gering ist. Zudem setzt sich der Mensch wissentlich und freiwillig anderen Strahlungsquellen aus. Beispielsweise wirkt beim Röntgen von Zähnen und Brustkorb eine effektive Dosis von 0,01 mSv auf den Körper ein und durch einen Transatlantik-Flug von Frankfurt nach New York sogar 0,05 mSv (Zeeb et al., 2012). Bei einer Computertomographie-Untersuchung liegt die effektive Dosis sogar bei 10 mSv (UNSCEAR, 2011, S. 53).

Tabelle 1: Effektive Jahresdosis einer Person durch ionisierende Strahlung im Jahr 2013 gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands und aufgeschlüsselt nach Strahlenursprung (BMUB, 2015, S. 8).

		Mittlere Effektive in mSv pro Jahr
1. Natürliche Strahlenexposition		
1.1.	durch kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	ca. 0,3
1.2.	durch terrestrische Strahlung von außen davon bei Aufenthalt im Freien (5 Std./Tag) davon bei Aufenthalt in Häusern (19 Std./Tag)	ca. 0,4 ca. 0,1 ca. 0,3
1.3.	durch Inhalation von Radonfolgeprodukten davon bei Aufenthalt im Freien (5 Std./Tag) davon bei Aufenthalt in Häusern (19 Std./Tag)	ca. 1,1 ca. 0,2 ca. 0,9
1.4.	durch Ingestion von natürlich radioaktiven Stoffen	ca. 0,3
Summe der natürlichen Strahlenexposition		ca. 2,1
2. Zivilisatorische Strahlenexposition		
2.1.	durch Fallout von Kernwaffenversuchen	< 0,01
2.2.	Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	< 0,011
2.3.	durch kerntechnische Anlagen	< 0,01
2.4.	durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin (ohne Therapie) davon durch nuklearmedizinische Untersuchungen	ca. 1,9 ca. 0,1
Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition		ca. 1,9

Diese Tabelle muss jedoch kritisch betrachtet werden, da sie lediglich Durchschnittswerte angibt. Bei einer genaueren Betrachtung müssten neben weiteren Kriterien vor allem zwischen verschiedenen Altersstufen, dem Geschlecht sowie Wohnbedingungen unterschieden werden, da die Dosismengen variieren (Kiefer, 2012, S. 146 ff.). Wegen des recht hohen Anteils durch medizinische Untersuchungen können die Werte von Individuen stark von dem gemittelten Durchschnitt abweichen. Da bereits die Hintergrundstrahlung, vor allem bei Kindern, Krebs auslösen kann (Spycher et al., 2015, S. 622), sollte jede zusätzliche Dosis vermieden werden.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die zivilisatorische Strahlenexposition kann sich aufgrund nuklearer Unfälle erheblich erhöhen. Dies wird unter anderem bei den nuklearen Katastrophen in Tschernobyl und Fukushima deutlich. Ebenso können geplante Gegenmaßnahmen gefährlich sein, wie das folgende Beispiel verdeutlicht: Nach einer externen oder internen Kontamination des Menschen können verschiedene Maßnahmen¹ getroffen werden, um die Gefahr durch radioaktive Stoffe zu mindern. Diese Maßnahmen sind oft mit einem hohen Risiko verbunden und sollten daher nur angewandt werden, wenn der Nutzen das zusätzliche Risiko übersteigt. (Gloebe und Graf, 1996, S. 181) Nach nuklearen Unfällen werden beispielsweise Jod Tabletten verteilt. Durch die Einnahme wird die Schilddrüse gesättigt, so dass das radioaktive Jod-Isotop nur in geringen Mengen eingebaut wird. Dies ist eine präventive Maßnahme gegen Schilddrüsenkrebs. Bei einigen Personen können jedoch gefährliche Nebenwirkungen auftreten. Grundsätzlich sollte eine Einnahme nur nach Aufforderung durch eine vertrauenswürdige Behörde erfolgen. (WHO, 2013, S. 68)

Sofern radioaktive Stoffe in Folge eines nuklearen Unfalls aus einer kerntechnischen Anlage entweichen, können diese gesundheitliche Folgen für Menschen und die Umwelt auslösen. Auswirkungen ionisierender Strahlung auf Menschen und die Umwelt sind in Hübner et al. (2017) beschrieben. Hierbei werden deterministische und stochastische Strahlenschäden unterschieden. Während deterministische Schäden immer oberhalb eines individuellen Schwellenwertes auftreten, ist eine Identifikation von stochastischen Strahlenschäden aufgrund fehlender Nachweisbarkeit problematisch. Ursachen für Schädigungen des Organismus und Auslöser von Krankheiten können nicht eindeutig bestimmt werden. Um Werte für stochastische Schäden abschätzen zu können, werden Kohortenstudien durchgeführt. Ziel ist die

¹ Mittel gegen äußere Kontamination sind beispielsweise Waschen, Abtragen der Haut oder ein operativer Eingriff. Um die innere Belastung zu mindern, können Komplexbildner oder stabile Isotope verabreicht werden. (Gloebe und Graf, 1996, S. 181)

Dokumentation der Auswirkungen ionisierender Strahlung auf eine große Anzahl an betroffenen Personen. Auf diese Art können Häufigkeiten für stochastische Schäden annähernd ermittelt werden. Da es unverantwortlich wäre, Menschen oder Tiere für solche Studien wissentlich ionisierender Strahlung auszusetzen, finden solche Studien vor allem nach nuklearen Unfällen oder nach dem Abwurf von Atombomben statt, wobei jeweils größere Mengen radioaktiver Stoffe in die Umwelt entweicht.

In dieser Arbeit werden diesbezüglich Studien über die (gesundheitlichen) Auswirkungen der nuklearen Unfälle in Tschernobyl und Fukushima analysiert und beschrieben. Die Ergebnisse der Analyse unterstreichen die gesundheitlichen Gefahren, die von ionisierender Strahlung ausgehen.

2 Auswirkungen von Nuklearunfällen auf Mensch und Umwelt

Frühere Erkenntnisse über strahleninduzierte Erkrankungen beruhten vor allem auf Untersuchungen an den Atombombenüberlebenden, beruflich exponierten Personen in der Medizin und im Bergbau sowie Bewohnern von Regionen mit hoher natürlicher Strahlenbelastung (Kauffmann et al., 2013, S. 46). Eine erzwungene Strahlenexposition von Menschen für wissenschaftliche Zwecke wäre unverantwortlich. Trotz ihrer Tragik, bieten die Nuklearunfälle in Tschernobyl und Fukushima Wissenschaftlern die Möglichkeit, genetische, ökologische und evolutionäre Auswirkungen akuter und chronischer Strahlenbelastung in einer natürlichen Umgebung zu untersuchen (Mousseau und Møller, 2014, S. 708). Ungenaue und je nach Studie abweichende Dosis-Abschätzungen, auf denen die Untersuchungen beruhen, scheinen ein großes Problem darzustellen. Da verschiedene Messzeiträume, Messverfahren und Einheiten verwendet werden, ist ein aufschlussreicher Vergleich nahezu unmöglich. Im Folgenden werden daher zwei verschiedene Einheiten verwendet, da eine Umrechnung zur besseren Vergleichbarkeit nicht ohne genaue Kenntnis der Bedingungen möglich ist. Die absorbierte Dosis wird in der Einheit Gy angegeben, die effektive Dosis weiterhin in Sv. Diese Unterscheidung bietet sich an, wenn die biologische Wirksamkeit der Strahlungsarten und die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe berücksichtigt werden sollen (detailliertere Erklärungen zu den Einheiten, zur absorbierten Dosis und der biologischen Wirksamkeit sind Hübner et al. (2017) zu entnehmen).

Um die Studien besser auswerten und einschätzen zu können, werden die Ereignisse zunächst kurz geschildert. Eine Wertung der Geschehnisse und die Ausarbeitung der Unfallursachen werden vernachlässigt. Hierzu liegt umfangreiche Literatur vor. Für dieses Kapitel wurden Berichte aus verschiedenen Ländern und von unterschiedlichen Organisationen herangezogen, ausgewertet und verglichen. Es kann nicht gewährleistet werden, dass alle Verfasser ohne politische Absichten nur die Fakten schildern. Dadurch könnten die Folgen verharmlost oder im umgekehrten Fall überschätzt werden. Die gefundenen Erkenntnisse sind demnach kritisch zu prüfen. Deshalb wurden für diese Arbeit ebenfalls Veröffentlichungen der atomkritischen Organisation International Physicians for the Prevention of Nuclear War (IPPNW)

herangezogen, die Berichte anderer Organisationen kritisch beurteilt². Ziel dieses Kapitels ist es, eine differenzierte Auflistung der Folgen durch die Unfälle in einem angemessenen Umfang darzustellen und den Leser dabei für die unterschiedlichen Ergebnisse der Organisationen zu sensibilisieren.

Um einen differenzierten Gesamtüberblick über die Auswirkungen zu erhalten, werden sie in verschiedene Kategorien eingeteilt. Zum einen werden die Folgen für Personen, die direkt am Unfallort gearbeitet haben, separat behandelt. Hierzu zählen u.a. Mitarbeiter der Kernkraftwerke, Feuerwehrleute und Personen, die an den Aufräumarbeiten beteiligt waren. Zum anderen wird im Text zwischen den stärker betroffenen Regionen und sonstigen Gebieten unterschieden, da sich die empfangenen Dosen deutlich unterscheiden. Zuletzt wird eine Untersuchung der Auswirkungen auf Umwelt und Tiere durchgeführt. (GRS, 1996, S. 91 f.)

2.1 Tschernobyl

2.1.1 EREIGNIS

Bei einer Sicherheitsüberprüfung im Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl kam es am 26. April 1986 aufgrund einer Verkettung verschiedener Vorfälle zu einer Katastrophe. Ausschlaggebend waren mangelnde Sicherheitsvorkehrungen der RBMK-Anlage³ sowie menschliches Versagen. Gegen 1:23 Uhr kam es zu einem ungeplanten Leistungsanstieg. Die freigesetzte Energiemenge in den Brennelementen zerstörte den Reaktorkern. Daraufhin verdampfte das Kühlmittel und der vorherrschende Druck löste eine Explosion des Reaktors aus. Einige Brände entstanden in der näheren Umgebung, die gegen 5:00 Uhr von der Feuerwehr gelöscht werden konnten. Große Mengen an radioaktiven Spaltprodukten wurden freigesetzt, von denen die langlebigen heute noch strahlen. Mit verschiedenen Materialien wurde in den folgenden Tagen versucht, den Reaktor mit dem brennenden Graphit abzudecken. Eine direkte Strahlenbelastung konnte auf diese Weise reduziert werden. Das Ende der Freisetzung großer Mengen radioaktiver Stoffe wurde auf den 6. Mai 1986 datiert. (GRS, 1996, S. 39 ff.)

Durch die Explosion und die anschließenden Brände wurden Spaltprodukte bis in eine Höhe von 1500 m geschleudert (Schütz et al., 1987, S. 12). Am stärksten beeinträchtigt waren die Länder Ukraine, Weißrussland und Russland (GRS, 1996, S.

² Einigen UN-Organisationen wird vorgeworfen, die Gefahr von Atomkraft herunterzuspielen und die Folgen ionisierender Strahlung zu verharmlosen (IPPNW, 2016, S. 7).

³ Hierbei handelt es sich um einen Siedewasser-Druckröhrenreaktor. Als Moderator diente Graphit. (GRS, 1996, S. 3 f.)

91). 36% der gesamten freigesetzten Radioaktivität verteilen sich über diese drei Gebiete, weitere 53% in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen über andere Länder in Europa (USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, 1986), wobei Skandinavien am stärksten betroffen war. Auch in Deutschland konnten erhöhte Aktivitäten durch den Vorfall in Tschernobyl gemessen werden. (Schütz et al., 1987, S. 12) Verschiedene Radioisotope wurden nachgewiesen, von denen ^{131}I und ^{137}Cs am bedeutendsten sind (UNSCEAR, 2011, S. 47).

2.1.2 FOLGEN DURCH DIE UNFALLBEKÄMPFUNG

Das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation verdeutlicht in einem Bericht aus dem Jahr 2008, dass die Personen am Unfallort Ganzkörperbestrahlungen mit hohen Energiedosen ausgesetzt waren. β -Strahlen schädigten die ungeschützte Haut. Eine Bestrahlung von innen sowie Neutronenstrahlung waren nicht von großer Bedeutung. (UNSCEAR, 2011, S. 58) Da die Gefahren ionisierender Strahlung im Vordergrund stehen, werden die Folgen durch die Explosion und Brände vernachlässigt. Es sei jedoch angemerkt, dass zwei Arbeiter an den unmittelbaren Folgen starben (GRS, 1996, S. 93). 134 weitere Personen, darunter Arbeiter des Kernkraftwerkes und Rettungspersonal, erkrankten an dem Akuten Strahlensyndrom (ARS), das für 28 von ihnen tödlich endete (UNSCEAR, 2011, S. 58). In 95% der Todesfälle lag die empfangene Ganzkörperdosis bei über 6,5 Gy (UNSCEAR, 2011, S. 149). Zweifelsfrei kann ionisierende Strahlung als Ursache genannt werden. Schäden am Knochenmark stellten die Hauptursache für einen Tod innerhalb der ersten zwei Monate nach der Exposition bei allen Betroffenen dar. Schwere Hautschäden verschlechterten die Heilungschancen des Akuten Strahlensyndroms. Durch schwere Verbrennungen an der Hautoberfläche konnten gravierende Infektionen ausgelöst werden. Bei einigen Patienten waren Hauttransplantationen erforderlich, einem der Betroffenen musste das Bein amputiert werden. 15 Patienten erlitten Schäden des Verdauungstraktes und an einer Strahlenpneumopathie erkrankten 8 Personen. (UNSCEAR, 2011, S. 59)

Nach einer Erkrankung an dem Akuten Strahlensyndrom entwickelte sich bei vielen der Betroffenen wenige Jahre nach dem Unfall Katarakte, deren Ausmaß von dem Schweregrad des ARS abhing. Narben und Geschwüre waren ebenfalls Begleiterscheinungen. Bei den Überlebenden des ARS regenerierten sich das blutbildende System und das Nervensystem nach einigen Monaten wieder. Die vollständige Genesung dauerte mehrere Jahre. Eine weitere Auswirkung für die Mehrzahl der Überlebenden waren Funktionsstörungen der Geschlechtsorgane. Das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation weist auf 14

gesunde Kinder der ARS-Erkrankten hin, die in den fünf Jahren nach dem Unglück auf die Welt kamen. Ob es zu Fehlbildungen oder sonstigen Störungen bei Neugeborenen kam, wird nicht erwähnt. (UNSCEAR, 2011, S. 59 f.) Nach Angaben der IPPNW sind in den Jahren 1987 und 1988 unter den Neugeborenen 117 von 1.000 Fällen mit Fehlbildungen beobachtet worden (Stepanova et al., 2004). Die Rate nahm mit der Zeit ab. Bei Kindern, die nach dem Unfall gezeugt wurden und deren Väter Dosen zwischen 50 mSv und 200 mSv erhalten haben, wurden Genmutationen festgestellt, die um ein Vielfaches höher waren als bei ihren älteren Geschwistern. (IPPNW, 2016, S. 28) Wenige Fälle von aufgetretenen Leukämie-Erkrankungen unter den ARS-Überlebenden sind bekannt. Das vermehrte Auftreten anderer Krankheiten (Kreislauf, Verdauungstrakt, Nervensystem) soll dem UNSCEAR-Bericht zu Folge von anderen Faktoren abhängen. (UNSCEAR, 2011, S. 59 f.)

Einige hunderttausend Personen arbeiteten direkt nach dem Unfall bzw. in den Jahren danach an dem Unglücksort. Ein Sarkophag musste gebaut werden, um den zerstörten Reaktorkern einzuschließen. Des Weiteren musste die Umgebung aufgeräumt und dekontaminiert werden. Die hierfür verantwortlichen Personen, auch Liquidatoren genannt, waren sowohl äußerer als auch innerer Strahlenbelastung ausgesetzt. In den Jahren 1986-1990 erhielten sie eine effektive Dosis mit einem Durchschnittswert von 120 mSv. Aufgrund fehlender Informationen können keine Aussagen über die Schilddrüsendosen der 530.000 Arbeiter getroffen werden. (UNSCEAR, 2011, S. 47 ff.) Veröffentlichungen der IPPNW weisen darauf hin, dass für die Liquidatoren ein erhöhtes Risiko besteht, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken (IPPNW, 2016, S. 25).

Aufgrund der relativ kurzen Latenzzeit von Leukämie⁴ existieren einige Untersuchungen an den Betroffenen. In mehreren Veröffentlichungen wird als Ergebnis ein Anstieg der Neuerkrankungen unter den Liquidatoren geschildert. In dem UNSCEAR-Bericht wird die Schwierigkeit eines eindeutigen Nachweises der Ursache hervorgehoben. Kritisiert werden die unzureichende statistische Aussagekraft der Untersuchungen, die problematischen Dosis-Abschätzungen sowie mögliche Störfaktoren. Da das Risiko einer strahleninduzierten Leukämieerkrankung mit der Zeit abnimmt, werden spät angesetzte Studien wohl keine neuen Erkenntnisse bringen. Mögliche Erkrankungen hängen dann höchstwahrscheinlich von anderen Faktoren ab. Über eine Abhängigkeit zwischen Dosis und Auftreten solider Tumore liegen heterogene Erkenntnisse verschiedener Studien vor, auf die nicht weiter eingegangen wurde. Ihre Ergebnisse werden durch das UNSCEAR angefochten. Es existieren Hinweise, dass Arbeiter mit einer Gesamtdosis über 150 mSv Hirngefäßerkrankungen

⁴ Die Latenzzeit von Leukämie beträgt etwa 5 bis 10 Jahre (Blettner et al., 2012, 13.e1).

erlitten. (UNSCEAR, 2011, S. 61 ff.) Ebenso soll ein Zusammenhang mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen bestehen (SSK, 2006, S. 9). Durch Vernachlässigung verschiedener Faktoren bedarf es für schlüssige Erkenntnisse weiterer Untersuchungen (UNSCEAR, 2011, S. 63).

Durch die Berichte der internationalen Ärzteorganisation IPPNW können die oben getroffenen Aussagen bestätigt werden. Zudem werden weitere, bisher vernachlässigte Erkrankungen aufgeführt. Die Verfasser gehen von insgesamt etwa 830.000 Liquidatoren aus. (IPPNW, 2016, S. 24 ff.) Bis zum Jahr 2005 wurden bereits 112.000 bis 125.000 Todesfälle registriert und es besteht die Annahme, dass die Opferzahl in den nächsten Generationen zunimmt (Yablokov, 2009, S. 192). Die Ergebnisse mehrerer Studien belegen eine höhere Krebsrate unter den Liquidatoren als bei einer weniger belasteten Vergleichspopulation. Diese Auffälligkeit konnte insbesondere bei Nierenkrebs, Blasenkrebs sowie Schilddrüsenkrebs beobachtet werden. Nichtkrebserkrankungen sind von ebenso großer Bedeutung. (IPPNW, 2016, S. 24 ff.) Basierend auf Untersuchungen von Ivanov et al. (1999) und Lazyuk (2005) konnten die Folgen für Herz-Kreislauf-Erkrankungen zusammengefasst werden. Das zusätzliche Risiko liegt bei etwa 40%. Im Vergleich zur restlichen Bevölkerung wurden ca. 20% mehr Inzidenzfälle beobachtet. Des Weiteren herrscht unter den Liquidatoren ein gestiegenes Risiko für Schlaganfälle. Psychische Erkrankungen und verfrühte Alterungsprozesse der Liquidatoren können durch ionisierende Strahlung ausgelöst werden und lassen sich mit den Vorgängen im menschlichen Körper erklären. (IPPNW, 2016, S. 24 ff.)

2.1.3 FOLGEN FÜR DIE BEVÖLKERUNG

Kurze Zeit nach der Freisetzung gelangte radioaktives Jod vor allem durch den Konsum von Milch in den Körper, lagerte sich in der Schilddrüse ab und bestrahlte den Organismus von innen. Es ist kein Fall einer ARS-Erkrankung in der Bevölkerung bekannt geworden. Der Dosiswellenwert des Akuten Strahlensyndroms liegt oberhalb der Dosis, der die allgemeine Bevölkerung ausgesetzt war. (UNSCEAR, 2011, S. 53 ff.) Obwohl keine akuten Strahlenschäden auftraten, lohnt sich eine Untersuchung der Spätfolgen. Yablokov (2009) stellt fest, dass die Folgen von Tschernobyl die Ursache für etwa 4% der Todesfälle in den Jahren 1990 bis 2004 in den kontaminierten Gebieten der Ukraine und Russlands waren (Yablokov, 2009, S. 192).

Der geschätzte Wert für die Schilddrüsendosis in den evakuierten Regionen im Jahr 1986 liegt bei 500 mGy, für die kontaminierten Gebiete⁵ bei 100 mGy. Die individuellen Werte schwanken hierbei sehr stark. Eindeutig nachgewiesen wurde, dass Kinder davon besonders gefährdet sind. Ihre durchschnittliche Dosis liegt um ein Vielfaches über dem Bevölkerungsdurchschnitt. Werden die weniger kontaminierten Gebiete der Ukraine, Weißrusslands und Russlands mit einbezogen, so verringert sich der Durchschnittswert auf 20 mGy. In anderen europäischen Ländern betrug er lediglich 1,3 mGy. (UNSCEAR, 2011, S. 53 f.)

Falls Kinder einige Jahre nach einer Bestrahlung mit relativ hohen Dosen an Schilddrüsenkrebs erkranken, ist ein Zusammenhang mit ionisierender Strahlung ziemlich wahrscheinlich. Diese Tumorart kommt bei Kindern natürlicherweise recht selten vor. Zwischen 1991 und 2005 wurden bei 5.127 Kindern aus der Ukraine, Weißrussland und Gebieten Russlands, die zum Zeitpunkt der Bestrahlung jünger als 14 Jahre waren, Schilddrüsenkrebs identifiziert. Untersuchungen aus Weißrussland weisen das höchste Vorkommen dieser Erkrankung bei Kindern unter 10 Jahren zwischen 1991 und 1995 auf. Die Latenzzeit beträgt demnach etwa 5 Jahre. In diesem Zeitraum liegt die jährliche Inzidenzrate bei 50 Fällen pro 1 Million. Natürlicherweise treten lediglich 2-4 Fälle pro Jahr auf. Deutlich abzulesen ist das erhöhte Risiko für Mädchen gegenüber gleichaltrigen Jungen. Eine gestiegene Erkrankungsrate konnte bei Kindern, die nach 1986 geboren wurden, nicht beobachtet werden. Die Schilddrüse von Erwachsenen scheint resistenter zu sein. Wird Schilddrüsenkrebs lediglich wenige Monate nach einer Bestrahlung nachgewiesen, so scheint der Einfluss ionisierender Strahlung gering zu sein. Dafür spricht vor allem die zu kurze Latenzzeit bis zum Auftreten der Krankheit. Jedoch besteht auch hier die Annahme, dass sich die Zahl der Neuerkrankungen durch ionisierende Strahlung erhöht hat. (UNSCEAR, 2011, S. 57 ff.)

In den Jahren nach dem Unglück war die Bevölkerung in den kontaminierten Gebieten durch ionisierende Strahlung des instabilen Cäsiumisotops gefährdet. Die resultierende Dosis in diesen Regionen, der die Menschen in den Jahren 1986 bis 2005 ausgesetzt waren, ist vergleichbar mit der Dosis während einer Computertomographie-Untersuchung⁶. Dieser Wert ist relativ gering, weshalb sich gesundheitliche Auswirkungen nicht uneingeschränkt auf die Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten zurückführen lassen. Für den Rest der Bevölkerung der Ukraine,

⁵ In diesen Gebieten ist die Bodenaktivität durch ¹³⁷Cs größer als 37 kBq/m² (UNSCEAR, 2011, S. 53). 1 kBq = 10³ Bq. Zur Messung der Kernprozesse (=spontane Vorgänge in den Atomkernen, die für das Aussenden ionisierender Strahlung verantwortlich sind) in den Strahlungsquellen dient die *Aktivität*. Um sie zu ermitteln, muss die durchschnittliche Anzahl dieser Vorgänge durch die Zeit geteilt werden: 1 Bq (Becquerel) = 1 Kernprozess pro Sekunde. (Vogt und Schultz, 2011, S. 11)).

⁶ Die effektive Dosis einer CT Untersuchung liegt bei 10 mSv (UNSCEAR, 2011, S. 53).

Russlands und Weißrusslands wird eine effektive Ganzkörperdosis in den 20 Jahren nach dem Unglück von 1,3 mSv angenommen. Der größte Teil der Energiedosis wirkte von außen auf den Körper ein, nur ein Viertel gelangte über die Luft und Nahrung in den Organismus. (UNSCEAR, 2011, S. 47 ff.)

Bei Kindern und Neugeborenen, die der Strahlung im Mutterleib ausgesetzt waren, wurde kein vermehrtes Aufkommen an Leukämieerkrankungen beobachtet (UNSCEAR, 2011, S. 61 f.). Diese Erkenntnis lässt sich mit den geringen Energiedosen der Bevölkerung gut nachvollziehen. Bisher konnte in den kontaminierten Gebieten keine erhöhte Sterberate beobachtet werden (SSK, 2006, S. 7). Obwohl keine eindeutigen Untersuchungen über die Häufigkeit von Brustkrebs vorliegen, bezweifeln die Mitglieder des UNSCEAR einen Zusammenhang mit ionisierender Strahlung. Aus Untersuchungen der Atombomben-Überlebenden wird gefolgert, dass die Dosen für die allgemeine Bevölkerung durch Tschernobyl zu gering waren, um eine erhöhte Inzidenzrate für solide Tumore feststellen zu können. (UNSCEAR, 2011, S. 61 f.) Die Strahlenschutzkommission weist darauf hin, dass in Zukunft weitere Untersuchungen bestimmter empfindlicher Organe durchgeführt werden müssen, um genauere Aussagen treffen zu können. Aufgrund der langen Latenzzeiten liegen lediglich Vermutungen über Spätfolgen vor. (SSK, 2006, S. 7)

Ein erhöhtes Krebsrisiko durch den Nuklearunfall in Tschernobyl besteht in Deutschland nicht. Das theoretisch gestiegene Risiko ist im Vergleich zur natürlichen Krebsrate sehr gering. Die in Südbayern gemessenen Werte beliefen sich auf zusätzliche 1,5 mSv durch äußere und innere Bestrahlung. Das ist weniger als die jährliche Dosis durch natürliche Strahlungsquellen. (GRS, 1996, S. 98) Die Strahlenschutzkommission hält einen Verdacht über den Zusammenhang zwischen in Deutschland beobachteten Erkrankungen⁷ und ionisierender Strahlung durch Tschernobyl für unplausibel (SSK, 2006, S. 10). Die in Tschernobyl freigesetzten Nuklide emittieren bis heute auch in Deutschland ionisierende Strahlung. Den größten Anteil stellt die Bodenstrahlung des radioaktiven Isotops ¹³⁷Cs dar. Die ursprüngliche Aktivität ist bis zum Jahr 2013 auf etwa 53% zurückgegangen. Durch ein überwachendes Messsystem des Radioaktivitätsniveaus in Lebensmitteln konnte eine geringe Belastung der Grundnahrungsmittel Milch, Gemüse, Getreide, Obst und Fleisch bestätigt werden. Im Speziellen wurden bei Pilzen und Fischen erhöhte Werte verzeichnet. Ebenso lieferten Untersuchungen von Wildschweinen Werte, die die Obergrenze der Aktivitätskonzentration überschritten. (BMUB, 2015, S. 31)

⁷ Die Erkrankungen waren u.a. Down Syndrom, Säuglingssterblichkeit, Leukämie, Neuroblastome und Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten (SSK, 2006, S. 10).

2.1.4 FOLGEN FÜR DIE UMWELT UND TIERE

Ein in der Nähe von Tschernobyl gelegener Wald wurde schätzungsweise mit Energiedosen von 10 Gy bestrahlt. Dies hatte vor allem Auswirkungen auf Kiefern, die in kürzester Zeit abstarben. (GRS, 1996, S. 98 f.) Die zerstörte Fläche betrug etwa 400 Hektar (Kröger und Chakraborty, 1989, S. 114). In entfernteren Gebieten mit Dosen zwischen 3-10 Gy konnten ebenfalls Schäden dieser Baumart nachgewiesen werden. Espen, Birken und Eichen reagierten auf ionisierende Strahlung relativ resistent. (GRS, 1996, S. 98 f.) Laubbäume können im Vergleich zu Nadelbäumen für denselben Effekt der zehnfachen Dosis ausgesetzt sein (Kröger und Chakraborty, 1989, S. 125). Bei einigen Pflanzen, die kaum sichtbare Schäden aufwiesen, konnten Veränderungen des Erbgutes beobachtet werden. Ebenfalls verringerte sich die Anzahl der am und im Boden lebenden Tiere, wie beispielsweise Insekten und Larven. Eine Störung des ökologischen Gleichgewichts war die Folge. Bei dort lebenden Mäusen verursachte die Strahlung ein verändertes Blutbild, Schäden an Organen sowie Einschränkung der Fortpflanzung. (GRS, 1996, S. 98 f.) Für die ersten fünf Monate nach dem Unfall wurde die Dosis für kleine Nagetieren in den stark belasteten Gebieten durch γ -Strahlung auf 12-110 Gy und durch β -Strahlung auf 580-4.500 Gy geschätzt (IAEA, 2006, S. 32). Dies hatte einen starken Rückgang der Tierbevölkerung zur Folge. Jedoch siedelten sich Tiere aus weniger belasteten Regionen in dem Gebiet an. Seit 1989 herrscht wieder ein normales Verhältnis. Menschen vermeiden vernünftigerweise die kontaminierten Gebiete. (GRS, 1996, S. 98 f.)

Säugetiere reagieren empfindlicher als wirbellose Tiere und einfache Organismen auf ionisierende Strahlung (Beresford und Copplestone, 2011). Eine akute Strahlendosis von mehr als 3 Gy endet für sie meist tödlich (IAEA, 2006, S. 125 f.). Folgen für den Menschen lassen sich deswegen am ehesten durch Untersuchungen an Säugetieren einschätzen. Aus mehreren Studien, die Maklyuk et al. (2007) zusammenfassend analysieren, lässt sich das Ergebnis herleiten, dass die radioaktive Belastung kleiner Säugetiere in den kontaminierten Gebieten mit der Zeit nicht stetig gefallen ist, sondern Schwankungen unterlag. Diese hingen vor allem mit den Zerfallsvorgängen von ^{137}Cs und ^{90}Sr zusammen. (Maklyuk et al., 2007) Da sich die Studien deutlich unterscheiden, zogen Maklyuk et al. (2007) die Daten von Rozhdestvenskaya (1999) heran, um Ergebnisse abzuleiten. Gegenstand der Studie waren Waldwühlmäuse, die in der Umgebung von Tschernobyl lebten. In den ersten beiden Jahren nach der Katastrophe in Tschernobyl konnte ein Rückgang der Radioaktivität durch ^{137}Cs beobachtet werden. Dies lag vorwiegend an den Zerfällen radioaktiver Nuklide mit kurzen Halbwertszeiten. Zudem gelangten die gefährlichen Atome in tiefere Bodenschichten und ihre direkte

Einwirkung auf die Tiere nahm ab. Dennoch konnten sie über die Nahrungskette in den Organismus gelangen. In den Jahren 1989 und 1990 erhöhte sich die Belastung durch γ -Strahlung wieder und erreichte dabei etwa das Niveau, das im Unglücksjahr 1986 gemessen wurde. Grund dafür war eine erhöhte Verfügbarkeit an radioaktiven Brennstoffelementen des Reaktors (Ivanov und Kashparov, 2003). Ebenso nahmen krautige Pflanzen, die als Nahrung für kleine Säugetiere dienen, die Nuklide über die Wurzeln auf. Der daraufhin folgende Rückgang der Belastung kann durch die Bindung radioaktiver Isotope in den Bodenschichten erklärt werden. Des Weiteren konnten saisonale und ortsabhängige Unterschiede festgestellt werden. (Maklyuk et al., 2007) Bei einer Langzeituntersuchung der Waldwühlmäuse mit geringen Dosen ionisierender Strahlung von 1986 bis 1996 wurden 22 Generationen beobachtet (Ryabokon und Goncharova, 2006, S. 169). Festgestellt wurde eine Abhängigkeit der Chromosomenaberrationen in Knochenmarkzellen mit der empfangenen Dosis an radioaktiven Nukliden. Diese Chromosomenaberrationen traten bei Nachkommen trotz abnehmender Ganzkörperdosis in demselben Umfang auf. Eine erhöhte embryonale Sterberate konnte ebenfalls beobachtet werden. (Ryabokon und Goncharova, 2006)

Nach dem Unglück wurden nicht alle Tiere sofort evakuiert. Von den Lebewesen, die in den stärker kontaminierten Gebieten zurückblieben, starben etliche innerhalb weniger Monate. Einige wiesen geschwächte Immunreaktionen, geringere Körpertemperaturen und Herz-Kreislauf-Störungen auf. Bei Rindern konnte eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit der Schilddrüse beobachtet werden, deren Schweregrad von der empfangenen Dosis abhing. In der Ukraine wurden durch Untersuchungen Tiere ohne Schilddrüsengewebe identifiziert. Zuchtvieh, das eine Schilddrüsendosis von mehr als 180 Gy ertragen musste, wies Schilddrüsenunterfunktionen auf, die möglicherweise Probleme bei der Fortpflanzung verursachten (Ilyazov et al., 2002). Die Nachkommen litten an Untergewicht, verringerter Gewichtszunahme und Kleinwüchsigkeit. Chronische Strahlenschäden machten sich auch in Schafen und Pferden bemerkbar. Vögel schienen die Strahlung besser zu verkraftet. Laut dem Bericht der IAEA wurden weder tote Vögel gefunden noch konnten Beeinträchtigungen ihrer Nachkommen bewiesen werden. (IAEA, 2006, S. 131 f.) Jedoch beweisen andere Untersuchungen einen Rückgang des Vogelreichtums in den kontaminierten Gebieten (Møller et al., 2012). Sowohl bei Hunden als auch bei Hühnern existieren Fälle mit chronischer Strahlenkrankheit. Symptome waren u. a. ein geringeres Körpergewicht im Vergleich zu gesunden Tieren und reduzierte Fettreserven. Zudem schwellen Lymphknoten, Leber und Milz an. Ein auffälliges Zeichen bei den Hühnern waren nicht vorhandene Eier in den Nestern und Ovarien. Eine erhöhte Sterberate in den frühesten Anfängen der Schwangerschaft sowie eine Abnahme der Embryonenanzahl wurden 1986 und

1987 bei Nagetieren nachgewiesen. (IAEA, 2006, S. 131 f.) Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ionisierende Strahlung bei wildlebenden Tieren für bedeutende genetische und physiologische Auswirkungen sowie Entwicklungs- und Fitness-Effekte verantwortlich waren. Grundsätzlich ist die Anzahl an genetischen Schäden und Mutationsraten gestiegen und ein Populationsrückgang verschiedener Tierarten konnte nachgewiesen werden. (Mousseau und Møller, 2014, S. 704).

Die höchste Belastung der Wasserorganismen fand durch Isotope mit kurzen Halbwertszeiten, vor allem ^{131}I , in den ersten zwei Wochen statt. Ihr Anteil an der Gesamtbelastung lag bei 60-80 %. Fische nahmen über die Nahrung langlebige Nuklide in den Organismus auf. Karpfen, Goldfische und Ukelei waren im Jahr 1986 maximal 3 mGy am Tag durch innere Bestrahlung exponiert. Im folgenden Jahr nahm die Belastung deutlich ab. Die höchste Gesamtdosis wirkte auf die Fische ein, die 1986 und im darauffolgenden Jahr geboren wurden. Für einige Fischarten wird die Dosis der ionisierender Strahlung, die vorwiegend von Sedimenten am Boden emittiert wird, auf 10 Gy geschätzt. (IAEA, 2006, S. 132 f.)

2.2 Fukushima

2.2.1 EREIGNIS

25 Jahre nach Tschernobyl kam es zu einem weiteren Nuklearunfall. Am 11. März 2011 wurde in Japan ein Erdbeben der Stärke 9,0 gemessen. Diese gewaltige Erschütterung löste einen Tsunami aus, der eine Fläche von mehr als 500 Quadratkilometer überflutete. Über 20.000 Menschen verloren auf diese Weise ihr Leben. Die fehlende Elektrizitätsversorgung und Beeinträchtigungen des Sicherheitssystems im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi führten zu schweren Schäden und folgenden Kernschmelzen an drei der sechs Kernreaktoren. Über einen längeren Zeitraum wurden große Mengen an radioaktiven Nukliden freigesetzt. Sofort nach dem Unfall wurde eine Evakuierungszone mit einem Radius von 20 km festgelegt und 78.000 Menschen in sichere Regionen gebracht. Die Bewohner zwischen der 20-30 km Zone wurden aufgefordert, in ihren Häusern zu bleiben, um sich vor der ionisierenden Strahlung zu schützen. (UNSCEAR, 2014, S. 6)

Das Hauptaugenmerk lag wiederum auf der Freisetzung der radioaktiven Isotope ^{131}I und ^{137}Cs . Zu Beginn der Untersuchungen wurden die Aktivitäten von Jod auf 100-500 PBq⁸ und von Cäsium auf 6-20 PBq geschätzt (Diese Angaben beziehen sich nur auf die Freisetzung radioaktiven Materials in die Atmosphäre). Diese Werte wurden im

⁸ 1 PBq = 10^{15} Bq.

weiteren Verlauf um ein Vielfaches reduziert. Durch die vorherrschende Windrichtung wurden große Mengen radioaktiven Materials in Richtung Pazifik getragen. Zusätzlich gelangten gefährliche Stoffe auf direktem Weg in umliegende Gewässer. Verschiedenen Messungen zufolge nimmt die Belastung für das Festland mit der Entfernung ab. (UNSCEAR, 2014, S. 6 ff.)

Während für Tschernobyl bereits Langzeit-Studien vorliegen, an denen anfängliche Vermutungen durch tatsächliche Beobachtungen überprüft werden können, basieren die Auswirkungen für Fukushima wegen der kurzen Zeitspanne vor allem auf Schätzungen über die Folgen ionisierender Strahlungen. In beiden Fällen sind Experten angehalten, weitere wissenschaftliche Studien durchzuführen, insbesondere um Rückschlüsse auf die Langzeitfolgen mit geringen Dosen ionisierender Strahlung ziehen zu können.

2.2.2 FOLGEN DURCH DIE UNFALLBEKÄMPFUNG

Für Aufräumarbeiten und andere Tätigkeiten, die die Folgen der Katastrophe mindern sollten, waren bis zum Ende des Jahres 2012 etwa 25.000 Arbeiter in der Nähe des Kernkraftwerks beschäftigt. In den ersten 19 Monaten nach dem Unfall erhielten sie durchschnittlich eine effektive Dosis von etwa 12 mSv, 1% der Arbeiter sogar mehr als 100 mSv⁹. Durch die Inhalation des Jod-Isotops wurde die Schilddrüse der Betroffenen zum Teil mit Dosen zwischen 2-12 Gy bestrahlt. Diese Werte stammen aus Messungen von zwölf Arbeitern, für die ein Zusammenhang zwischen der Bestrahlung und dem Auftreten von Erkrankungen der Schilddrüse abgeleitet werden kann. (UNSCEAR, 2014, S. 10 f.)

Von den sieben bekannten Todesfällen unter den Arbeitern ließ sich bis zum Jahr 2013 kein Todesfall auf die Exposition ionisierender Strahlung zurückzuführen (WHO, 2013, S. 93). Des Weiteren konnten bei keiner betroffenen Person Akute Strahlenkrankheiten nachgewiesen werden. Bekräftigt wurde dies mit der Annahme, dass der Schwellenwert für deterministische Schäden nicht überschritten wurde (UNSCEAR, 2014, S. 77). Die Zukunftserwartungen für 16 Arbeiter, deren Dosis mehr als 100 mSv betrug, zeigen eine erhöhte Krebsrate. Ein eindeutiger Nachweis ist aufgrund der natürlichen Schwankungen an Krebsfällen problematisch. (UNSCEAR, 2014, S. 10 f.)

Bis auf Schilddrüsenfehlfunktionen durch eine Inhalation von radioaktivem Jod erwartet die WHO keine deterministischen Strahlenschäden. Durch eine Kalkulation über verschiedene Altersstufen wurde ein erhöhtes Krebsrisiko für jüngere Arbeiter deutlich. Um circa 20 % steigt das relative Risiko von Schilddrüsenkrebs für die Jüngeren der Betroffenen, die relevanten Schilddrüsen-Dosen und weiterer, jedoch geringer

⁹ Diese Werte stimmen mit Angaben der WHO überein (WHO, 2013, S. 49).

Ganzkörperbestrahlung exponiert waren. Die Anzahl der Arbeiter, die höheren Strahlungsdosen ausgesetzt waren, legt die WHO auf wenige Prozent fest. Leukämie- und Schilddrüsenkrebs-Erkrankungen können für diese Gruppe mit höherer Wahrscheinlichkeit angenommen werden. Unter ihnen sind in einem geringen Maße ebenso Kreislauferkrankungen möglich. Von erblich bedingten Störungen und Auswirkungen auf die Nachkommen geht die Weltgesundheitsorganisation nicht aus. (WHO, 2013, S. 93)

2.2.3 FOLGEN FÜR DIE BEVÖLKERUNG

Die höchsten Dosiswerte wurden für die Bevölkerung der evakuierten Zone erwartet. Für Erwachsene wurde eine Obergrenze von 10 mSv festgestellt, der sie nach dem Unglück bis zum Zeitpunkt ihrer Evakuierung ausgesetzt waren. Auf die Schilddrüse wirkte im Durchschnitt eine absorbierte Dosis von etwa 35 mGy ein. Da Kinder weniger strahlenresistent sind als Erwachsene, wurde für Einjährige eine doppelt so hohe effektive Dosis angenommen. Die Schilddrüsendosis erreichte Werte von etwa 80 mGy. Die Belastung entstand größtenteils durch radioaktive Nuklide, die über den Nahrungsweg in den menschlichen Körper gelangten. Je nach Ort und Ernährungsgewohnheiten wichen die Werte deutlich voneinander ab. Bewohner des Stadtzentrums von Fukushima erhielten innerhalb eines Jahres Dosen von etwa 4 mSv. Diese Werte wurden nach Angaben des UNSCEAR in anderen Stadtteilen nicht überschritten. (UNSCEAR, 2014, S. 9)

Eine veröffentlichte Tabelle der WHO verdeutlicht, dass der Stadtkern von Fukushima nicht die am stärksten belastete Region war. Deswegen können die oben aufgeführten Werte der UNSCEAR nicht als Obergrenze angenommen werden. Schätzungen der WHO zu Folge liegt der Wert für die effektive Dosis im ersten Jahr in den am stärksten betroffenen Gebieten zwischen 10 mSv und 50 mSv. Die Tabelle liefert eine gute Übersicht über die Organdosen in verschiedenen Regionen Japans für das erste Jahr und ist in einem Bericht der WHO (2013, S. 42 f.) zu finden. (WHO, 2013, S. 39 ff.)

Da die effektive Dosis in den Stadtteilen circa 10 mSv¹⁰ beträgt, verdeutlicht das UNSCEAR-Komitee, dass keine Sanierungsmaßnahmen in diesen Regionen notwendig sind. Die Schätzungen für den Rest des Landes sowie andere Länder liegen deutlich unter den oben genannten. Deswegen besteht für die Menschen in den Nachbarländern kein gesundheitliches Risiko aufgrund des Nuklearunfalls in Fukushima. (UNSCEAR, 2014, S. 9)

¹⁰ Die WHO schätzt diesen Wert bereits für das erste Jahr nach dem Unfall ab (WHO, 2013, S. 39).

Bei Urin-Untersuchungen von 1.500 Kindern aus der Stadt Minamisoma konnten Konzentration von radioaktivem Cäsium festgestellt werden, welches über den Atemweg oder über die Nahrung in den Körper gelangt sein muss. (Rosen, 2012, S. 8) Da die Dosiswerte der Bevölkerung relativ gering waren, wurden keine gravierenden gesundheitlichen Auswirkungen für die Betroffenen und ihre Nachkommen erwartet. Das Geschehene hatte jedoch sehr wohl Auswirkungen auf den mentalen Zustand der Menschen und ihr Wohlbefinden. In der Bevölkerung verbreiteten sich Angstzustände, die durch Freisetzung radioaktiven Materials ausgelöst wurden. Ein gestiegenes Krebsrisiko durch ionisierende Strahlung wird für Erwachsene nicht angenommen. Jedoch lässt sich ein erhöhtes Risiko für Schilddrüsenkrebs bei Kindern ableiten. (UNSCEAR, 2014, S. 10 f.) Die WHO schätzt dieses Risiko für Mädchen, die im Kindesalter bestrahlt wurden, am höchsten ein. Da diese Erkrankung bei Kindern sehr selten vorkommt, wird ein relativer Anstieg des Lebenszeitriskos von maximal 70% angenommen. Das gestiegene absolute Risiko ist jedoch gering. Eine Leukämie-Erkrankung aufgrund ionisierender Strahlung ist für Jungen in den stark kontaminierten Gebieten am wahrscheinlichsten. Für Mädchen gilt eine ähnliche Beziehung für Brustkrebs. (WHO, 2013, S. 92 f.) Durch Ultraschalluntersuchungen bei etwa 300.000 Kindern und Jugendlichen konnte ein Anstieg der Schilddrüsenkrebsrate nachgewiesen werden. Die Latenzzeit betrug vier Jahre. Unter 2.251 Verdachtsfällen wurden bis zum Ende des Jahres 2014 bei 110 Patienten Schilddrüsenkrebs festgestellt. Diese Zahl ist 30 Mal höher als die natürliche Entstehungsrate. (Tsuda et al., 2015) In einem Bericht des UNSCEAR wird diese Auffälligkeit mit einer verbesserten Technologie der Geräte und einer effizienteren Detektion von Krankheiten begründet (UNSCEAR, 2014, S. 11). Tsuda et al. (2015) weisen explizit darauf hin, dass diese Erklärung unwahrscheinlich ist. Die Abweichungen sind zu deutlich, um lediglich mit Mess- Ungenauigkeiten begründet zu werden. (Tsuda et al., 2015, S. 5)

In einer kritischen Analyse des UNSCEAR-Reports wird eine Übereinstimmung mit den Annahmen über die weniger belasteten Gebiete hervorgehoben. Kritikpunkte umfassen vor allem die eingeschränkte Beachtung verschiedener, möglicher Auswirkungen. So werden beispielsweise die interne Strahlenbelastung, Auswirkungen auf Tiere und Umwelt, Nicht-Krebs-Erkrankungen sowie vererbare Defekte weitestgehend außer Acht gelassen. Zudem werden Dosis-Abschätzungen für die Mitarbeiter in Frage gestellt. Ähnliche Bedenken über die unvoreingenommene und richtige Darstellung der Risiken gibt es über die Veröffentlichungen der WHO (Rosen, 2013). (IPPNW, 2014, S. 6 ff.) Paulitz et al. (2015) verdeutlichen, dass die Ergebnisse über Krebserkrankungen

der japanischen Bevölkerung je nach angewandtem Rechnungsansatz voneinander abweichen (Paulitz et al., 2015, S. 8 ff.).

Kurz nach dem Unglück in Fukushima konnten erhöhte Aktivitäten durch radioaktive Nuklide mithilfe von Messungen bei Schauinsland, dem Hausberg von Freiburg, festgestellt werden. Bereits ab Ende des Jahres 2011 normalisierte sich der Zustand. Die Kontamination in Deutschland war durch den Unfall in Tschernobyl weitaus größer als durch die Katastrophe in Fukushima. (BMUB, 2015, S. 32 f.) Grund dafür scheint die Distanz zum Unglücksort zu sein. Die Belastung in Deutschland über die Pfade Luft und Niederschlag stellen oben genannten Messungen zufolge kein lang anhaltendes Risiko dar, da bereits in der zweiten Hälfte des Jahres 2011 keine erhöhten Werte mehr gemessen werden konnten (BMUB, 2015, S. 32 f.). Eine Belastung über die Nahrung findet in diesem Zusammenhang keinen Anklang. Jedoch könnten erhöhte Aktivitätskonzentrationen in Lebensmitteln nach Deutschland eingeführt worden sein. Eine Kontrolle ist in solchen Fällen zum Schutz der Bevölkerung dringend erforderlich.

2.2.4 FOLGEN FÜR DIE UMWELT UND TIERE

Durch den Nuklearunfall in Fukushima wurden große Mengen des freigesetzten, radioaktiven Materials in Richtung Pazifik getragen. Die anfangs von dem Energieversorgungsunternehmen TEPCO veröffentlichte Angabe über die Kontamination des Ozeans lag bei 4,7 PBq. Untersuchungen anderer Organisationen lieferten weitaus höhere Werte. (IPPNW, 2014, S. 5) Das französische Institute for Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN) gibt eine Kontamination durch ^{137}Cs von 27 PBq an (IRSN, 2011). Zusätzlich wird es eine Belastung durch das radioaktive Jod-Isotop gegeben haben.

Wasser, das zur Kühlung der Kernreaktoren eingesetzt wurde, gelangte in Gewässer und den Boden, so dass auch das Grundwasser belastet wurde. Durch Verdampfung gelangte radioaktives Material teilweise in die Atmosphäre. Somit wiesen Nahrungsmittel in Japan eine hohe Kontamination auf. Auffällig war die erhöhte spezifische Aktivität von Gemüse und Obst, darunter Spinat, Petersilie und Pilze. (Rosen, 2012, S. 4 ff.) Weniger belastet waren Salat, Zwiebeln, Tomaten, Erdbeeren, Weizen und Gerste (Ibaraki Prefectural Government, 2011). Unter Kontrolle standen weitere Lebensmittel wie Milch, Fleisch, Reis sowie Trinkwasser. Des Weiteren waren Fische und andere maritime Lebewesen durch die freigesetzte Radioaktivität gefährdet. Durch Ingestion können die Radionuklide über die Nahrungskette in den menschlichen Körper gelangen. (Rosen, 2012, S. 4 ff.)

Mousseau und Møller veröffentlichten in verschiedenen Zeitschriften Artikel über die biologischen Folgen nach Nuklearunfällen. Dabei schlussfolgerten sie einen negativen Zusammenhang zwischen der Populationsgröße von Vögeln, Schmetterlingen sowie Zikaden und der Belastung durch Radioaktivität. Diese Abhängigkeit konnte im ersten Jahr nach dem Unfall bei Libellen, Grashüpfern, Bienen und Spinnen nicht bestätigt werden. (Mousseau und Møller, 2014, S. 704) Bei einer Untersuchung mit 14 brütenden Vogelarten in den kontaminierten Gebieten von Tschernobyl und Fukushima stellte sich ein negativer Zusammenhang zwischen der Hintergrundstrahlung und einer an diesen Orten vorherrschenden Tiervielfalt heraus. Je höher die Strahlung desto kleiner ist im Allgemeinen die Anzahl der Population. Die Ergebnisse unterschieden sich zwischen den Vogelarten deutlich. Ebenso konnte ein Unterschied zwischen den zwei kontaminierten Gebieten festgestellt werden. In Fukushima waren die Auswirkungen für dieselben Vogelarten deutlicher zu erkennen. (Møller et al., 2012)

Nach der Katastrophe wurde eine hämatologische Studie bei wilden Affen durchgeführt. Die zu untersuchenden Tiere bewohnten einen Wald, der 70 km von dem Unglücksort entfernt war. Als Vergleichspopulation dienten Affen, die etwa 400 km von dem Kernkraftwerk Fukushima Daiichi angesiedelt waren. In den Muskeln der untersuchten Affen um Fukushima konnten Cäsium-Konzentrationen zwischen 78-1.778 Bq/kg beobachtet werden. Die Vergleichswerte der Kontrollgruppe waren so niedrig, dass sie nicht gemessen werden konnten. In Abhängigkeit mit der Cäsium-Konzentration, nahm die Anzahl an weißen und roten Blutkörperchen bei den Fukushima Affen ab. (Ochiai et al., 2014, S. 1)

3 Fazit

3.1 Zusammenfassung

Durch Untersuchungen von Studien über die Nuklearunfälle in Tschernobyl und Fukushima konnten bestimmte Gefahren ionisierender Strahlung, vor allem aufgrund hoher Dosen, bestätigt werden. Dabei erhielten die Wissenschaftler aufschlussreiche Erkenntnisse über den Verlauf des Akuten Strahlensyndroms mit seinen Begleiterscheinungen. Betroffene Organe waren dabei Knochenmark, Haut, Lunge und Verdauungstrakt. Ebenso konnten Funktionsstörungen der Geschlechtsorgane beobachtet werden. Die Folgen für Nachkommen durch genetische Strahlenschäden werden von den Organisationen unterschiedlich dargestellt. Es existieren Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Fehlbildungen oder Störungen bei Neugeborenen und einer Bestrahlung mit ionisierender Strahlung bei Exposition mit hohen Dosen. Für die allgemeine Bevölkerung können diese Aussagen nicht bestätigt werden. In den meisten Veröffentlichungen werden strahleninduzierte Krebserkrankung, z.B. Schilddrüsenkrebs bei Kindern, sowie die Entstehung von Leukämie untersucht. Obwohl die Studien häufig kritisiert werden, existieren verschiedene Ergebnisse, die auf einen Zusammenhang zwischen Neuerkrankungen und einer Bestrahlung hindeuten. Auch wenn ein eindeutiger Nachweis, vor allem bei stochastischen Strahlenschäden, sehr schwer ist, kann ein Zusammenhang ebenso wenig ausgeschlossen werden.

Die Unfälle in Tschernobyl und Fukushima zeigen, dass durch nukleare Unfälle weite Gebiete kontaminiert werden können und somit eine länderübergreifende Verseuchung von Gebieten stattfinden kann. Somit verursacht ein solches Ereignis weitreichende, internationale Folgen, deren Ausmaße nicht abzuschätzen sind. Erhöhte Aktivitäten konnten durch beide Ereignisse auch in Deutschland nachgewiesen werden. Durch Tschernobyl können auch heutzutage noch erhöhte Aktivitätskonzentrationen in Pilzen und Wildschweinen gemessen werden.

3.2 Kritische Würdigung und Ausblick

Die verschiedenen Organisationen beziehen sich in ihren Veröffentlichungen auf geeignete, wissenschaftliche Paper. Bei Untersuchungen detaillierter Studien muss

insbesondere die unterschiedliche Herangehensweise, die Verfügbarkeit von Vergleichsdaten sowie die Interessen der Verfasser beachtet werden. Diese Problematik wurde vor allem bei Literaturrecherchen über Nuklearunfälle deutlich. Für diese Arbeit wurden Veröffentlichungen verschiedener Organisationen herangezogen. Eine kritische Gegenüberstellung soll den Leser für die unterschiedlichen Interessen und Standpunkte sensibilisieren. Die Einschätzungen weichen vor allem bei Dosisabschätzungen sowie dadurch verursachten potenziellen Auswirkungen für Menschen, Tiere und Umwelt voneinander ab. Vertuschungen und Verharmlosungen nach Störfällen oder Katastrophen erschwerten die Untersuchungen und führten zu ungenauen Schätzungen. Trotz dieser Beeinträchtigung für eine lückenlose Aufklärung, kann das Gefahrenpotenzial durch radioaktive Nuklide und ionisierende Strahlung bestätigt werden.

In einem kurzen Abriss wurde dargestellt, dass Nuklearkatastrophen nicht nur gesundheitliche Auswirkungen auf Menschen haben. Betroffene erleiden oftmals ein Trauma, weil sie Familie und Heimat verloren haben. Dies führt auch zu Angstzuständen. Um die Gefahren, die von Kernkraftwerken ausgehen, zu beurteilen, sollte dieser Aspekt nicht außer Acht gelassen werden.

Literaturverzeichnis

- Beresford, Nicholas A.; Copplestone, David (2011): Effects of ionizing radiation on wildlife: What knowledge have we gained between the Chernobyl and Fukushima accidents? In: *Integr Environ Assess Manag* 7 (3), S. 371–373. DOI: 10.1002/ieam.238.
- Blettner, Maria; Wicke, Henryk; Schlehofer, Brigitte (2012): Strahlenepidemiologie. In: *Public Health Forum* 20 (3). DOI: 10.1016/j.phf.2012.06.002.
- BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2015): *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2013*.
- Gloebel, Beowulf; Graf, Christiane (1996): Inkorporationsverminderung für radioaktive Stoffe im Katastrophenfall. In: *Bundesamt für Zivilschutz (Hrsg.): Zivilschutzforschung Bd. 22*. 1996.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Hrsg.) (1996): *Tschernobyl - Zehn Jahre danach: Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen*. 1996. – URL http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-121_Deut.pdf.
- Hagen, Ulrich (1994): Strahlungen. In: Marquardt, Hans (Hrsg.); Schäfer, Siegfried G. (Hrsg.): *Lehrbuch der Toxikologie*. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: BI-Wiss.-Verl., 1994, S. 630–649. – ISBN 3-411-16321-6.
- Hübner, Felix; Jung, Jennifer Jana; Schultmann, Frank (2017): *Gefahren ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf kerntechnische Anlagen*. Working Paper, Working Paper Series in Production and Energy, ISSN 2196-7296.
- IAEA - International Atomic Energy Agency (2006): *Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience: Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'*. Vienna, 2006 (RADIOLOGICAL ASSESSMENT REPORTS SERIES).
- Ilyazov, R.G. et al., (2002): *Ecological and Radiobiological Consequences of the Chernobyl Catastrophe for Stock-breeding and Ways of its Overcoming* (ILYAZOV, R.G., Ed.), Fan, Kazan (2002) (in Russian). Zitiert nach IAEA (2006, S. 131).
- IPPNW - International Physicians for the Prevention of Nuclear War (2014): *Critical Analysis of the UNSCEAR Report "Levels and effects of radiation exposure due to*

the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and tsunami". 2014.

IPPNW - International Physicians for the Prevention of Nuclear War (2016): 30 Jahre Leben mit Tschernobyl 5 Jahre Leben mit Fukushima: Gesundheitliche Folgen der Atomkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima. 2016. – URL http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/IPPNW_Report_T30_F5_Folgen_web.pdf.

Ibaraki Prefectural Government (2011): Ibaraki Prefecture Agricultural Products Test Results, , August 8th. Zitiert nach: Rosen (2012, S.5).

IRSN (2011) : Synthèse actualisée des connaissances relatives à l'impact sur le milieu marin des rejets radioactifs du site nucléaire accidenté de Fukushima Dai-ichi. October 26th, 2011. Zitiert nach: IPPNW (2014, S. 5).

Ivanov, V. K. et al. (1999): Radiation-epidemiological analysis of the incidence of non-cancer diseases among Chernobyl liquidators, in: Radiation & Risk, Issue 11. Zitiert nach: IPPNW (2016, S.25).

Ivanov, Yu. A.; Kashparov, V.A. (2003): Long-Term Dynamics of the Radiological Situation in Terrestrial Ecosystems of the Chernobyl Exclusion Zone, Environ. Sci. Pollut. Res., 2003, Special Issue, no. 1, pp. 1320. Zitiert nach: Maklyuk et al. (2007, S.184).

Kauffmann, Günter; Sauer, Rolf; Weber, Wolfgang: Radiologie (2013): Bildgebende Verfahren, Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Strahlenschutz. 4., völlig überarb. Aufl. München: Urban & Fischer Verlag - Lehrbücher, 2013. – ISBN 978-3-437-41417-6.

Kiefer, Jürgen (2012): Strahlen und Gesundheit: Nutzen und Risiken. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. – ISBN 978-3-527-41099-6.

Kröger, Wolfgang; Chakraborty, Sabyasachi (1989): Tschernobyl und weltweite Konsequenzen. Köln: Verl. TÜV Rheinland, 1989. – ISBN 3-88585-423-6.

Lazyuk, D. (2005): Cardiovascular Diseases among Liquidators and Populations; PSR/IPPNW-Schweiz-Kongress Gesundheit der Liquidatoren in Bern. Zitiert nach: IPPNW (2016, S. 25).

Maklyuk, Yu. A.; Maksimenko, A. M.; Gashchak, S. P.; Bondarkov, M. D.; Chizhevskii, I. V. (2007): Long-Term Dynamics of Radioactive ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs Contamination

- of Small Mammals in the Chernobyl Zone. In: Russian Journal of Ecology 38 (2007), Nr. 3, S. 181–189.
- Møller, Anders P.; Hagiwara, Atsushi; Matsui, Shin; Kasahara, Satoe; Kawatsu, Kencho; Nishiumi, Isao; Suzuki, Hiroyuki; Ueda, Keisuke; Mousseau, Timothy A. (2012): Abundance of birds in Fukushima as judged from Chernobyl. In: Environmental Pollution 164 (2012), S. 36–39.
- Mousseau, Timothy A.; Møller, Anders P. (2014): Genetic and Ecological Studies of Animals in Chernobyl and Fukushima. In: Journal of Heredity 105 (2014), Nr. 5, S. 704–709.
- Neles, Julia M. (2012): Rückblick – Von den Anfängen bis heute. In: Neles, Julia M. (Hrsg.); Pistner, Christoph (Hrsg.): Kernenergie. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012 (Technik im Fokus), S. 1–19. – ISBN 978-3-642-24328-8.
- Ochiai, Kazuhiko; Hayama, Shinichi; Nakiri, Sachie; Nakanishi, Setsuko; Ishii, Naomi; Uno, Taiki; Kato, Takuya; Konno, Fumiharu; Kawamoto, Yoshi; Tsuchida, Shuichi; Omi, Toshinori (2014): Low blood cell counts in wild Japanese monkeys after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. In: Scientific Reports 4, 5793 (2014).
- Paulitz, Henrik; Eisenberg, Winfried; Thiel, Reinhold (2015): Atomkatastrophe in Japan: Gesundheitliche Folgen von Fukushima. 2015. – URL https://www.ipnwd.de/commonFiles/pdfs/Info/Gesundheitliche_Folgen_von_Fukushima_Update_2015.pdf.
- Rosen, Alex (2013): Critical Analysis of the WHO's health risk assessment of the Fukushima nuclear catastrophe. URL: https://www.ipnwd.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Fukushima/WHO_Fukushima_Report2013_Criticism_en.pdf.
- Rosen, Alex (2012): Effects of the Fukushima nuclear meltdowns on environment and health. 2012. – URL <http://www.ipnwd.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/FukushimaBackgroundPaper.pdf>.
- Rozhdestvenskaya, A.S. (1999): Reproduction of Bank Vole after Contamination of the Environment with Radioactive Cesium in Belarus, in Bioindikatsiya radioaktivnykh zagryaznenii (Bioindication of Radioactive Contamination), Moscow: Nauka, 1999, pp. 226–231. Zitiert nach: Maklyuk et al. (2007, S. 184).

- Ryabokon, Nadezhda I.; Goncharova, R. I. (2006): Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout. In: *Radiation and Environmental Biophysics* 45 (2006), Nr. 3, S. 167–177.
- Schütz, Jürgen (Hrsg.); Börner, Wilhelm (Hrsg.); Messerschmidt, Otfried (Hrsg.) (1987): *Jahrestagung der Vereinigung Deutscher Strahlenschutzärzte e.V. Bd. 27: Strahlenschutz nach Tschernobyl: Ionisierende Strahlen: Erkenntnisse, Konzepte, Regelungen.* Stuttgart: Thieme, 1987. – ISBN 3-13-452801-0.
- Spycher, B. D.; Lupatsch, J. E.; Zwahlen, M.; Rössli, M.; Niggli, F.; Grotzer, M. A.; Rischewski, J. (2015): Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study: for the Swiss Pediatric Oncology Group and the Swiss National Cohort. In: *Environ Health Perspect* 123 (2015), Nr. 6, S. 622–628.
- SSK - Strahlenschutzkommission (Hrsg.) (2006): 20 Jahre nach Tschernobyl - Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes: Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. 2006. – URL http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/20Jahre_Tschernobyl.pdf?__blob=publicationFile.
- Stepanova, E. I., Skvarkaya, E. A., Vdovenko, V. J. and Kondrashova, V. G. (2004). Genetic consequences of the Chernobyl accident in children born to parents exposed to radiation. *Probl. Ecol. Med. Genetic. Clinic. Immunol. (Kiev)* 7(60): 312320 (in Russian). Zitiert nach: IPPNW (2016, S.28).
- Tsuda, Toshihide; Tokinobu, Akiko; Yamamoto, Eiji; Suzuki, Etsuji (2015): Thyroid Cancer Detection by Ultrasound Among Residents Ages 18 Years and Younger in Fukushima, Japan: 2011 to 2014. In: *Epidemiology* (2015), S. 1–7.
- UNSCEAR - United Nations Commission on the Effects of Atomic Radioation (2011): Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes: Volume II: Effects. 2011. – URL http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf.
- UNSCEAR - United Nations Commission on the Effects of Atomic Radioation (2014): Sources, effects and risks of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes: Volume I. 2014. – URL http://www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418_Report_2013_Annex_A.pdf.

- USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy (1986): The accident at the Chernobyl nuclear power plant and its consequences: information compiled for the IAEA Experts Meeting, 1986 August 259, Vienna. Part II, Annexes 2, 7, Draft, 1986 August. Zitiert nach: IPPNW (2016, S. 10).
- Vogt, Hans-Gerrit; Schultz, Heinrich (2011): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. 6., überarb. Aufl. München: Hanser, 2011. – ISBN 978-3-446-42593-4 .
- WHO – World Health Organization (2013): Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami: Based on a preliminary dose estimation. Geneva: WHO, 2013. – ISBN 978-92-4-150513-0.
- Yablokov, Alexey V. (2009): Mortality after the Chernobyl Catastrophe. In: Chapter II. Consequences of the Chernobyl Catastrophe for Public Health Bd. 1181. 2009, S. 192–216.
- Zeeb H, Merzenich H, Wicke H, Blettner M. (2012) Radiation Epidemiology. In: Ahrens W, Pigeot I (Hrsg.) Handbook of Epidemiology. 3rd Edition, Springer Verlag. Zitiert nach: Blettner et al. (2012).

Working Paper Series in Production and Energy

recent issues

- No. 9** Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im
Wettbewerb Energieeffiziente Stadt
- No. 10** Hannes Schwarz, Valentin Bertsch, Wolf Fichtner:
Two-stage stochastic, large-scale optimization of a decentralized
energy system – a residential quarter as case study
- No. 11** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:
Development of a multi-energy residential service demand model for
evaluation of prosumers' effects on current and future residential load
profiles for heat and electricity
- No. 12** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:
Energy autonomy in residential buildings: a techno-economic
model-based analysis of the scale effects
- No. 13** Johannes Schäuble, Silvia Balaban, Peter Krasselt, Patrick Jochem,
Mahmut Özkan, Friederike Schellhas-Mende, Wolf Fichtner, Thomas
Leibfried, Oliver Raabe:
Vergleichsstudie von Systemansätzen für das Schnellladen von
Elektrofahrzeugen
- No. 14** Marian Hayn, Valentin Bertsch, Anne Zander, Stefan Nickel, Wolf Fichtner:
The impact of electricity tariffs on residential demand side flexibility
- No. 15** Erik Merkel, Robert Kunze, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Modellgestützte Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2016
anhand ausgewählter Anwendungsfälle in Wohngebäuden
- No. 16** Russell McKenna, Valentin Bertsch, Kai Mainzer, Wolf Fichtner:
Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear
optimisation to develop feasible energy concepts in small communities
- No. 17** Tilman Apitzsch, Christian Klöffler, Patrick Jochem, Martin Doppelbauer,
Wolf Fichtner:
Metaheuristics for online drive train efficiency optimization in electric
vehicles
- No. 18** Felix Hübner, Georg von Grone, Frank Schultmann: Technologien zur
Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen
- No. 19** Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann: Gefahren
ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf
kerntechnische Anlagen
- No. 20** Juri Lüth, Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner: Photovoltaik auf
Gebäuden: eine GIS-gestützte Ermittlung des Potenzials in Baden-
Württemberg

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16
D-76187 Karlsruhe

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy
No. 21, März 2017

ISSN 2196-7296