



**Fachverband für Strahlenschutz e. V.**

Mitgliedsgesellschaft der  
International Radiation  
Protection Association  
(IRPA)  
für Deutschland  
und die Schweiz

**STRAHLUNG – NATÜRLICH!**

---

**NATÜRLICH MIT  
STRAHLENSCHUTZ**

**Jahrestagung 2025**

**28.09. – 02.10.2025  
Chemnitz**



Bandherausgeber:  
Klaus Flesch  
Martina Froning

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://gnb.d-nb.de> abrufbar.

Die Inhalte dieses Werkes werden von Verlag, Herausgebern und Autoren nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und zusammengestellt. Eine rechtliche Gewähr für die Richtigkeit der einzelnen Angaben kann jedoch nicht übernommen werden. Gleiches gilt auch für die Websites, auf die über Hyperlink verwiesen wird. Es wird betont, dass wir keinerlei Einfluss auf die Inhalte und Formulierungen dieser Seiten haben und auch keine Verantwortung für sie übernehmen.

Grundsätzlich gelten die Wortlaute der Gesetzestexte und Richtlinien sowie die einschlägige Rechtsprechung.

ISSN 1013-4506

ISBN: 978-3-7406-0943-6

© by TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln 2025  
TÜV, TUEV und TUV sind eingetragene Marken der TÜV Rheinland Group. Eine Nutzung und Verwendung bedarf der vorherigen Zustimmung durch das Unternehmen.

Gesamtherstellung: TÜV Media GmbH, Köln 2025



**Fachverband für Strahlenschutz e. V.**

Mitgliedsgesellschaft der  
International Radiation  
Protection Association  
(IRPA)  
für Deutschland  
und die Schweiz

**STRAHLUNG – NATÜRLICH!**

---

**NATÜRLICH MIT  
STRAHLENSCHUTZ**

**Jahrestagung 2025**

**28.09. – 02.10.2025  
Chemnitz**



**Bandherausgeber:  
Klaus Flesch  
Martina Froning**



## Grußworte des Tagungspräsidenten

Liebe Strahlenschützerinnen und Strahlenschützer,

im Jahr 2025 ist Chemnitz die Kulturhauptstadt Europas und unser Ort für die 56. Jahrestagung. Mit seiner Lage nahe dem Erzgebirge befinden wir uns in der Nähe des größten „Radonvorsorgegebietes“ in Deutschland und in einer Region, in der sich in einer großen Dichte die Hinterlassenschaften des bis 1990 betriebenen Uranerzbergbaus befinden.



Damit steht die natürlich vorkommende Radioaktivität im Fokus, die durch das im Jahr 2018 in Kraft getretene Strahlenschutzgesetz mit neuen Regelungen zu Radon an Arbeitsplätzen und in Aufenthaltsräumen sowie zur Sanierung von radioaktiven Altlasten eine größere Bedeutung erlangt hat. Diesen Themen und auch für Tätigkeiten mit NORM oder im Zusammenhang mit kosmischer Strahlung werden wir in Chemnitz einen Schwerpunkttag widmen.

Aber auch die anderen Strahlenschutzthemen, mit denen wir uns im Fachverband bzw. in den Arbeitskreisen befassen, mit all seinen normativen, aber auch gesellschaftlichen Aspekten sind natürlich ein wesentlicher Bestandteil dieser Jahrestagung.

Bei der Jahrestagung 2024 stand die Frage „Welche gesellschaftlichen Herausforderungen ergeben sich für die praktischen Umsetzungen von strahlenschutzfachlichen Anforderungen?“ im Mittelpunkt. Die Suche nach den Antworten ist auch im Jahr 2025 weiterhin aktuell.

Im Jahr 2025 plant das BMUV außerdem, das Strahlenschutzgesetz zu überarbeiten. Was kommt Neues auf uns zu bzw. welche neuen Herausforderungen ergeben sich für die praktischen Umsetzungen?

Wir sehen uns in Chemnitz.

**Klaus Flesch**

*Tagungspräsident 2025*

## **Grußworte der Abteilungsleiterin Wasser und Technischer Umweltschutz des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft**

Sehr geehrte Damen und Herren,

herzlich willkommen in Sachsen zur Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. Der Titel „Strahlung – natürlich! Natürlich mit Strahlenschutz“ betont das Schwerpunktthema dieser Tagung. Und es ist sehr passend, dass diese Tagung in Sachsen stattfindet, denn hier gibt es geologisch und dadurch auch bergbaulich bedingt umfangreiche Erfahrungen im Bereich der natürlichen Radioaktivität und mit den damit verbundenen Themen des Strahlenschutzes.

Die Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus beschäftigen uns in Sachsen schon lange. Vieles wurde bereits zur Beseitigung der bestehenden Schäden und Gefahren unternommen, Weiteres muss noch getan werden. Auch auf dem Weg der Ausgestaltung des Schutzes vor Radon ist Sachsen schon viele Schritte gegangen: die Festlegung der Radonvorsorgegebiete auf der Grundlage umfangreicher Daten, der Aufbau einer Radonberatungsstelle für Bürger, Arbeitsplatzverantwortliche, Planer und Handwerker, die Etablierung einer Ausbildung für Radonfachpersonen und auch die Umsetzung eines Förderprogramms unter Verwendung von Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung zur Unterstützung von Maßnahmen zum Schutz vor Radon in Gebäuden.

Das Programm der Tagung umfasst weitere Themen, wie Aspekte des Strahlenschutzes in der Medizin, in Schulen, in der Messtechnik, bei der Beförderung, bei der Entsorgung und im Notfallmanagement. Darüber hinaus werden aktuelle und zukünftige rechtliche Regelungen und Empfehlungen sowohl Deutschlands als auch der Schweiz und Österreich vorgestellt und diskutiert. Neben den Fachvorträgen und Diskussionen sowie Posterbeiträgen gibt es Gelegenheit mit den Industrieausstellern ins Gespräch zu kommen und an Exkursionen teilzunehmen.

Das weit gefasste Tagungsprogramm entspricht dem breiten Spektrum der Arbeit des Fachverbandes. In den einzelnen Arbeitskreisen des Fachverbandes zu den verschiedenen Bereichen des Strahlenschutzes finden sich jeweils Fachleute aus den Behörden, der Industrie und der Wissenschaft zusammen, um den aktuellen Stand der Kenntnisse für die Fachwelt und die Öffentlichkeit zusammenzutragen und in kompakter Form bereitzustellen. Darüber hinaus werden Fragen, die sich aus der praktischen Arbeit ergeben aufgegriffen und Lösungsvorschläge erarbeitet. Zu vielen Themen des Strahlenschutzes hat der Fachverband bereits Empfehlungen gegeben oder Stellungnahmen erarbeitet, die für die fachliche Arbeit herangezogen werden können.

Der enge Austausch zwischen Erfahrungsträgern aus der Praxis, den auf diesem Gebiet Forschenden und den Strahlenschutzbehörden ist wichtig und notwendig zur Erreichung eines optimalen Strahlenschutzes. Die Aktivitäten des Fachverbandes, die Bemühungen um diesen Austausch und auch die Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses werden durch die Strahlenschutzbehörden in Sachsen hochgeschätzt.

Diese Jahrestagung ist eine weitere Gelegenheit den fachlichen Austausch und die Kontakte zu vertiefen. Ich wünsche Ihnen eine rundum zufriedenstellende Veranstaltung mit interessanten Gesprächen und vielen Anregungen für Ihre weitere Arbeit. Nutzen Sie nebenher die Gelegenheit, Chemnitz, die aktuelle Kulturhauptstadt Europas, und den Freistaat Sachsen, auch über die strahlenschutzfachlichen Aspekte hinaus kennenzulernen.

**Dr. Regina Heinecke-Schmitt**

*Abteilungsleiterin Wasser und Technischer Umweltschutz*

*Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft*



## Komitees

### **Tagungspräsident:**

**Klaus Flesch**

*Vorsitzender des Arbeitskreises natürliche Radioaktivität (AKNAT),  
Nuclear Control & Consulting GmbH*

### **Programmkomitee:**

**Leitung Klaus Flesch**

*Vorsitzender des Arbeitskreises natürliche Radioaktivität (AKNAT),  
Nuclear Control & Consulting GmbH*

Rainer G. Gellermann

*Nuclear Control & Consulting GmbH*

Christian Katzlberger

*Präsident des Österreichischen Verbandes für Strahlenschutz (ÖVS),  
Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH  
(AGES)*

Johanna Pehlivan

*Vertreter der Young Professionals, Karlsruher Institut für Technologie  
(KIT)*

Peter Schmidt

*Ehem. Wismut GmbH, im Ruhestand*

Clemens Walther

*Präsident des Fachverbandes für Strahlenschutz, Institut für Radioökologie  
und Strahlenschutz (IRS) Hannover*

### **Organisationskomitee:**

**Leitung Volker Grimm**

*Stellvertr. Vorsitzender des Arbeitskreises natürliche Radioaktivität  
(AKNAT), Technische Hochschule Mittelhessen*

Mandy Alisch-Mark

*Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (Sachsen)*

Kristina Brottko

*Wismut GmbH*

Martina Froning

*Vizepräsidentin des Fachverbandes für Strahlenschutz, Forschungszentrum  
Jülich GmbH*

Regina Gutmann

*Endress+Hauser GmbH+Co. KG, Deutschland*

Sebastian Keppler

*Tagungsorganisation mit Unterstützung von congress & more, Klaus Link  
GmbH*

Sven Nagels

*Schatzmeister, Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH*

Joel Piechotka

*Sprecher der Young Professionals, Bundeswehr Zentralkrankenhaus  
Koblenz*

Jens Regner

*Wismut GmbH*

Florian Szillat

*Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz*

## Inhaltsverzeichnis

Grußworte des Tagungspräsidenten.....	3
Grußworte der Abteilungsleiterin Wasser und Technischer Umweltschutz des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.....	4
Inhaltsverzeichnis.....	2
<b>Session 1 Strahlenschutz hier und jetzt .....</b>	<b>5</b>
<b>GAMMASTRAHLUNG: AM RAND DER GESCHICHTE – IM ZENTRUM DES STRAHLENSCHUTZES.....</b>	<b>7</b>
<i>Birkhan Jonny<sup>1</sup>, Bothe Matthias<sup>2</sup>, Collatz Rüdiger<sup>8</sup>, Feinhals Jörg<sup>2</sup>, Funke Lukas<sup>3</sup>, Gellermann Rainer<sup>4</sup>, Kaden Thomas<sup>5</sup>, Lange Hans-Jürgen<sup>6</sup>, Rabung Thomas<sup>7</sup>, Wilhelm C.<sup>2</sup>.....</i>	
WOVOR WILL UNS DER STRAHLENSCHUTZ SCHÜTZEN? .....	11
<i>Breckow Joachim .....</i>	
<b>Session 2 Strahlenschutz in der Medizin .....</b>	<b>13</b>
OPTIMIERUNG DER STRAHLENEXPOSITION BEI ANWENDUNG VON RÖNTGENSTRAHLUNG AM BEISPIEL EINER IN DER GASTROENTEROLOGIE GENUTZTEN RÖNTGENANLAGEN .....	15
<i>Szermerski Bastian, Frank Rudolf, Döker Rolf, Komorowski Karlo, Geworski Lilli,.....</i>	
EIN BLICK HINTER DIE KULISSEN: ERFAHRUNGEN AUS NEUBAU UND BETRIEB DES STUTTGART CANCER CENTERS .....	21
<i>Poetsch Maria<sup>1</sup>, Staubus Sebastian<sup>2</sup>.....</i>	
IN-SITU-GAMMAMESSUNGEN IM BUNKER EINES MEDIZINISCHEN LINEARBECHLEUNIGERS .....	25
<i>Wanke Carsten<sup>1</sup>, Döker Rolf<sup>1</sup>, Geworski Lilli<sup>1</sup>, Lange Hans-Jürgen<sup>2</sup>.....</i>	
WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN RADIONUKLIDEN UND DEM MENSCHLICHEN ORGANISMUS: <sup>226/228</sup> RA-AUSSCHIEDUNGS-ANALYTIK SOWIE INTERAKTION VON <sup>243</sup> AM MIT NIERENZELLEN IN VITRO .....	29
<i>Senwitz Christian<sup>1,2,3</sup>, Walther Diana<sup>1</sup>, Taut Steffen<sup>3</sup>, Acker Margret<sup>3</sup>, Kahle Pia<sup>4</sup>, Kormoll Thomas<sup>4</sup>, Drobot Björn<sup>5</sup>, Heller Anne<sup>2,3</sup>.....</i>	
<b>Session 4 Ausbildung zum Thema Strahlenschutz in Schulen.....</b>	<b>31</b>
AUSBILDUNG ZUM THEMA STRAHLENSCHUTZ IN SCHULEN .....	33
<i>Vahlbruch Jan-Willem<sup>1</sup>, Lange Astrid<sup>2</sup>, Neunzig Michael<sup>3</sup>.....</i>	
<b>Session 5 Strahlenschutzrecht .....</b>	<b>35</b>
FÜNF JAHRE NEUES STRAHLENSCHUTZRECHT IN ÖSTERREICH - ERFAHRUNGEN AUS DEM VOLLZUG MIT SCHWERPUNKT RADONSCHUTZ .....	37
<i>Zöchling Roman .....</i>	
<b>Session 6 Diskussionsrunden zu strahlenschutzrechtlichen Themen.....</b>	<b>39</b>
STRAHLENSCHUTZRECHTLICHE THEMEN .....	41
<i>Koletzko Gerd<sup>1</sup>, Bothe Matthias<sup>2</sup>, Hellhammer Rolf<sup>3</sup>, Pehlivan Johanna<sup>4</sup>, Schlösser Dietmar<sup>5</sup>, Trautmannsheimer Markus<sup>5</sup>, Gruber Valeria<sup>6</sup>.....</i>	
<b>Session 7 Radon.....</b>	<b>43</b>
UNSCEAR REPORT 2025: EVALUATION OF PUBLIC EXPOSURE TO IONIZING RADIATION - ERGEBNISSE FÜR RADON UND THORON .....	45
<i>Ringer Wolfgang<sup>1</sup>, Antignani Sara<sup>2</sup>, Bochicchio Francesco<sup>2</sup>, Carpentieri Carmela<sup>2</sup>, Di Carlo Christian<sup>2</sup>, Gaskin Janet<sup>3</sup>, Gruber Valeria<sup>1</sup>, Hosoda Masahiro<sup>4</sup>, Ielsch Geraldine<sup>5</sup>, Janik Miroslaw<sup>6</sup>, Petermann Eric<sup>7</sup>, Sahoo Bijay Kumar<sup>8</sup>, Sedigheh Sina<sup>9</sup>, Tate Brendan<sup>10</sup>, Balonov, Mikhail<sup>11</sup>.....</i>	

RADON AUS SICHT DES ARBEITSSCHUTZES .....	46
<i>Hofmann Robert, Fleischhammer Meike</i> .....	
RADON-PERSONENDOSIMETRIE ZUR ÜBERWACHUNG VON BERGLEUTEN UND BERGFÜHRERN IM ERZGEBIRGE UND IM VOGTLAND .....	50
<i>Dehnert Jörg<sup>1</sup>, Engelhardt Jörg<sup>2</sup>, Guhr Andreas<sup>3</sup></i> .....	
MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN VON RADON 222-KURZZEIT-MESSUNGEN ZUR ABSCHÄTZUNG DES JAHRESMITTEL WERTS .....	56
<i>Maringer Franz Josef<sup>1,2,3</sup></i> .....	
<b>Session 8 Radon .....</b>	<b>63</b>
RADON IN HESSEN – GEMESSEN, NICHT GESCHÄTZT .....	65
<i>Kraft-Bermuth Saskia, Bauer Melanie, Grimm Volker, Kalmbach Paul, Kerker Steffen, Kwasseu Alisson, Moubea Charlotte, Zapata Krystof</i> .....	
ÜBERPRÜFUNG DER AUSWEISUNG DER RADONVORSORGE GEBIETE IN SACHSEN – EIN ZWISCHENSTAND .....	72
<i>Alisch-Mark Mandy, Pezenka Janett, Friedemann Stefan, Pianski Jacqueline, Geib Tobias, Heinrich Thomas.</i>	
RADON AUßERHALB DER VORSORGE GEBIETE ANHAND DES FALLBEISPIELS PROSEKTUR CHEMNITZ .....	73
<i>Kieschnick Michael<sup>1</sup>, Jankuhn Steffen<sup>2</sup>, Schulz Simone<sup>3</sup></i> .....	
AKTIVITÄTEN ZU AUS- UND FORTBILDUNGEN UND KOOPERATIONEN IM RADONSCHUTZ IN ÖSTERREICH .....	79
<i>Gruber Valeria, Ringer Wolfgang, Wurm Gernot, Kunte Angelika, Götzendorfer Andrea, Himmelbauer Klara, Baumann Sebastian, Gräser Joachim</i> .....	
<b>Session 9 Radioaktive Altlasten .....</b>	<b>81</b>
RECYCLING UND ENTSORUNG VON KONTAMINIERTEN BÖDEN IN FUKUUSHIMA .....	83
<i>Feinhals Jörg</i> .....	
SANIERUNG HISTORISCHER DEPONIEREN MIT RADIOLOGISCHEN ALTLASTEN IN DER SCHWEIZ .....	89
<i>Linder Reto, Senn A.-C.</i> .....	
RADIOLOGISCHE ALTLASTEN IN ÖSTERREICH .....	95
<i>Kabrt Franz, Rechenberger Fabian, Dangl Verena, Katzberger Christian</i> .....	
VERBESSERUNG DER STRAHLENSCHUTZSITUATION DURCH DIE SANIERUNGSTÄTIGKEITEN DER WISMUT GMBH ANHAND DER FALLBEISPIELE SCHLEMA-ALBERODA UND CROSSEN .....	96
<i>Regner Jens, Hiller Axel, Barnekov Ulf</i> .....	
<b>Session 10 Messtechnik, Beförderung, Notfallmanagement .....</b>	<b>97</b>
FORTSCHRITTLICHE SENSORLÖSUNGEN ZUR NEUTRONEN- UND GAMMASTRAHLUNGSDETEKTION VON ARKTIS RADIATION DETECTORS .....	99
<i>Gendotti Ulisse, Tancioni Paolo</i> .....	
KRITISCHE DISKUSSION VON “WIEDERHOLT ZÄHLENDE MESSUNGEN MIT ZUFÄLLIGEN EINFLÜSSEN“ GEMÄß DIN ISO 11929-1 .....	100
<i>Kraut Wolfgang</i> .....	
SICHERER TRANSPORT RADIOAKTIVER STOFFE: WAS BEI DER SCO UND LSA KLASSIFIZIERUNG ZU BEACHTEN IST .....	104
<i>Theinert Myriam<sup>1</sup>, Heinrichs Christina<sup>2</sup></i> .....	
VERBESSERUNG DER ZUSAMMENARBEIT ÖSTERREICHISCHER NOTFALLEINSATZKRÄFTE DURCH ABHALTUNG VON STRAHLENSCHUTZ -WORKSHOPS .....	105
<i>Bayer Thomas</i> .....	
URANANREICHERUNG IN DEUTSCHLAND UND DIE ZUKUNFT DES STRAHLENSCHUTZES .....	106
<i>Buttig Felix</i> .....	

## **Session 11 Entsorgung/ Abfallmanagement..... 108**

MONTE-CARLO-SIMULATIONEN VON STRAHLUNGSFELDERN IN TIEFENGEOLOGISCHEN ENDLAGERN FÜR ABGEBRANNTRE BRENNELEMENTE UND ZUGEHÖRIGE DOSIMETRISCHE ASPEKTE .....	110
<i>Becker Frank<sup>1</sup>, Biswas Sushant<sup>2</sup>, Dagan Ron<sup>1</sup>.....</i>	
STRAHLENSCHUTZ UND ABFALLBEWIRTSCHAFTUNG BEI DER MB-MICROTEC AG .....	114
<i>Dubios Maxime .....</i>	
FREIGABE VON BODEN – DIE FLUR VON ERDREICH, BODENFLÄCHEN UND BAUWERKEN .....	115
<i>Harstrick Alexander, Baschke M. ....</i>	
BESONDERHEITEN BEI AUSBREITUNGSBERECHNUNGEN ÜBER DEN LUFTPFAD BEI STÖRFÄLLEN AM BEISPIEL DER SCHACHTANLAGE ASSE II .....	121
<i>Bosco Hauke, Mandel Marcus, Voigts Florian, Gärtner Grit.....</i>	
DER STRAHLENSCHUTZ UND DIE ASSE .....	122
<i>Gellermann Rainer .....</i>	

## **Posterbeiträge..... 130**

P1: KONTINUIERLICHE, ZEITAUFGELÖSTE RADONMESSUNG MIT DEM ALPHA-GUARD PQ2000 PRO .....	132
<i>Bauer Lara, Hoffmann Anna.....</i>	
P2: BEWERTUNG VON STRAHLENFELDERN IN TIEFENGEOLOGISCHEN ENDLAGERN FÜR ABGEBRANNTRE BRENNELEMENTE IM HINBLICK AUF VERSCHIEDENE NEUTRONENSTREUUNGSFORMALISMEN .....	135
<i>Becker Frank<sup>1</sup>, Biswas Sushanta<sup>2</sup>, Dagan Ron<sup>1</sup>.....</i>	
P3: Entwicklung eines Messaufbaus für Flash-Effekt-Untersuchungen am Elektronenbeschleuniger FLUTE ...	139
<i>Pehlivan Johanna<sup>1</sup>, Nasse Michael J.<sup>2</sup>, Borkowski Till<sup>2</sup>, Leichtle Dieter<sup>1</sup>, Nordmeyer Hans<sup>2</sup>, Ruprecht Robert<sup>2</sup>, Serikov Arkady<sup>1</sup>, Smale Nigel J.<sup>2</sup>, Jäkel Oliver<sup>3,4</sup>, Holzappel Bernhard<sup>5</sup>.....</i>	
P4: METHODENENTWICKLUNG FÜR DIE INKORPORATIONSÜBERWACHUNG VON BERUFLICH EXPONIERTE PERSONEN IM ZUGE DER ZIELGERICHTETE ALPHATHERAPIE .....	140
<i>Ulakanathan-Thavarajah Raashina<sup>1</sup>, Wanke Carsten<sup>2</sup>, , Geworski Lilli<sup>2</sup>, Hartmann Sven<sup>1</sup>.....</i>	
P5: BEWERTUNG DER BERÄUMTE AUFSTANDSFLÄCHE DER LOKHALDE AM STANDORT SEELINGSTÄDT DER WISMUT GMBH.....	144
<i>Brottka Kristina, Kohlhepp Bernd .....</i>	
P6: WE'RE OPEN! DIE NEUE RADON / THORON KALIBRIERKAMMER BEIM BFS - VOR AUSSETZUNGEN FÜR RÜCKFÜHRBARE THORON-FOLGEPRODUKT-MESSUNGEN .....	148
<i>Feige Sebastian, Tugnoli Francesca .....</i>	
P7: UNTERSUCHUNG DER RADONEXPOSITION VON BESCHÄFTIGTE IN VERSCHIEDENE UNTERTÄGIGE ARBEITSBEREICHEN IN ÖSTERREICH .....	149
<i>Kunte Angelika, Gruber Valeria, Gräser Joachim.....</i>	
P8: NORMs and beyond.....	150
<i>Stroncik Nicole .....</i>	
PRÄSENTATION: VIRTUAL REALITY TRAINING FÜR DIE STRAHLENSCHUTZAUSBILDUNG .....	151
<i>Koslowski David<sup>1,2</sup> .....</i>	
Autorenindex.....	154

**Session 1**  
**Strahlenschutz hier und jetzt**



# GAMMASTRAHLUNG: AM RAND DER GESCHICHTE – IM ZENTRUM DES STRAHLENSCHUTZES

## GAMMA RADIATION: ON THE MARGINS OF HISTORY – AT THE CENTER OF RADIATION PROTECTION

Birkhan Jonny<sup>1</sup>, Bothe Matthias<sup>2</sup>, Collatz Rüdiger<sup>8</sup>, Feinhals Jörg<sup>2</sup>, Funke Lukas<sup>3</sup>, Gellermann Rainer G.<sup>4</sup>, Kaden Thomas<sup>5</sup>, Lange Hans-Jürgen<sup>6</sup>, Rabung Thomas<sup>7</sup>, Wilhelm C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Darmstadt, Deutschland, <sup>2</sup>Deutsch-Schweizer Fachverband für Strahlenschutz, <sup>3</sup>NUVIA Instruments GmbH, Dülmen, Deutschland, <sup>4</sup>Nuclear Control & Consulting GmbH, Braunschweig, Deutschland, <sup>5</sup>VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e. V., Deutschland, <sup>6</sup>Mirion Technologies, (Canberra) GmbH, Rüsselsheim, Deutschland, <sup>7</sup>Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt, Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland, <sup>8</sup>Berthold Technologies GmbH & Co.KG, Bad Wildbad, Deutschland

### **Zusammenfassung**

Aus Anlass des 125. Jahrestages der Entdeckung wurde die Gamma-Strahlung vom Fachverband für Strahlenschutz als Strahlung des Jahres 2025 benannt. Der folgende Text ist eine gekürzte und teilweise ergänzte Fassung mehrerer Artikel zum gleichen Thema aus der StrahlenschutzPRAXIS Heft 1 sowie weiteren Artikeln, die in Heft 4 (2025) erscheinen werden.

**Schlüsselwörter** Gamma-Strahlung; Geschichte, Radioaktivität, Strahlung des Jahres

## **1. Villard – Der fast vergessene Entdecker**

Die Jahrhundertwende vom 19. zum 20. Jahrhundert markierte einen Umbruch in den Naturwissenschaften. Während Persönlichkeiten wie Röntgen, Becquerel und die Curies durch fundamentale Beiträge zur Erforschung der Radioaktivität zu Berühmtheiten wurden, geriet ein wichtiger Entdecker beinahe in Vergessenheit: Im Jahr 1900 identifizierte der französische Physiker Paul Ulrich Villard (Abb. 1) einen Anteil der vom Radium ausgesandten Strahlung, der weder durch Magnetfelder ablenkbar war, noch von dünnen Bleiplatten gestoppt werden konnte – die Gamma-Strahlung. Obwohl Villard seine Ergebnisse korrekt interpretierte, blieb seine Entdeckung zunächst weitgehend unbeachtet und wurde erst 1903 durch Ernest Rutherford als „Gamma-Strahlung“ benannt.



Abb. 1: Paul Ulrich Villard (1908), Quelle [1]

## **2. Physik der Gammastrahlung**

Gamma-Strahlung ( $\gamma$ -Strahlung) ist elektromagnetischer Natur und entsteht primär bei nuklearen Umwandlungen. Quantenphysikalisch handelt es sich um Photonen ohne Ruhemasse, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Ihre Quantenenergie liegt weit über der des sichtbaren Lichts und beginnt bei einigen Kiloelektronenvolt (keV). Spektakuläre

kosmische Ereignisse wie der Gamma-Ray Burst GRB 190114C erzeugten Gammastrahlen mit Quantenenergien bis zu Teraelektronenvolt (TeV).

### **3. Wechselwirkung von Gamma-Strahlung mit Materie**

Die Gamma-Strahlung wechselwirkt mit Materie hauptsächlich mit drei Prozessen: Photoeffekt, Compton-Effekt oder Paarbildung. Jeder dieser Prozesse führt zur Ionisation von Atomen. Die Wahrscheinlichkeit solcher Wechselwirkungen nimmt mit zunehmender Quantenenergie ab und verleiht der Gamma-Strahlung eine hohe Durchdringungsfähigkeit von Materie – eine Eigenschaft, die sie sowohl für technische Anwendungen als auch für den Strahlenschutz relevant macht.

### **4. Exposition durch natürliche Strahlung**

Ein bedeutender Anteil der natürlichen Exposition des Menschen stammt von Gamma-Strahlung der Radionuklide Uran-238, Thorium-232 und deren Zerfallsprodukte sowie durch Kalium-40. Auch durch kosmische Strahlung und die davon ausgelösten Prozesse in der Atmosphäre kommt es zu einer Exposition durch Gamma-Strahlung. Während kosmische Strahlung eine Jahresdosis von etwa 0,3 mSv verursacht, trägt die Strahlung des Bodens und von Baustoffen als terrestrische Quelle ca. 0,4 mSv pro Jahr bei. Über die Nahrung nimmt der Mensch ebenfalls Radionuklide auf, von denen der Gammastrahler Kalium-40 mit ca. 0,15 mSv im Jahr etwa die Hälfte der inneren Exposition durch die Nahrung verursacht. Diese natürliche Exposition ist durch Schutzmaßnahmen praktisch nicht begrenzbare und daher von regulatorischen Vorgaben weitgehend ausgenommen.

### **5. Anwendung der Gammastrahlung**

Technisch und in der Medizin wird Gamma-Strahlung vielseitig eingesetzt: In der Industrie dient sie der zerstörungsfreien Prüfung von Materialien, etwa bei Schweißnähten oder Gussteilen, der radiometrischen Füllstands-, Dichte- und Schichtdickenmessung (siehe Abb. 2) sowie zur Prozessüberwachung. In der Medizin kommt sie zur Diagnostik und Therapie (Gammaknife, Teletherapie) zum Einsatz. Radionuklid- und chemische Elementanalytik (z.B. nach Neutronenaktivierung) mittels Gammaskpektrometrie sind etablierte Verfahren. Sie funktionieren auch auf dem Mars, wo mittels Germanium-Detektoren Gesteine analysiert wurden.

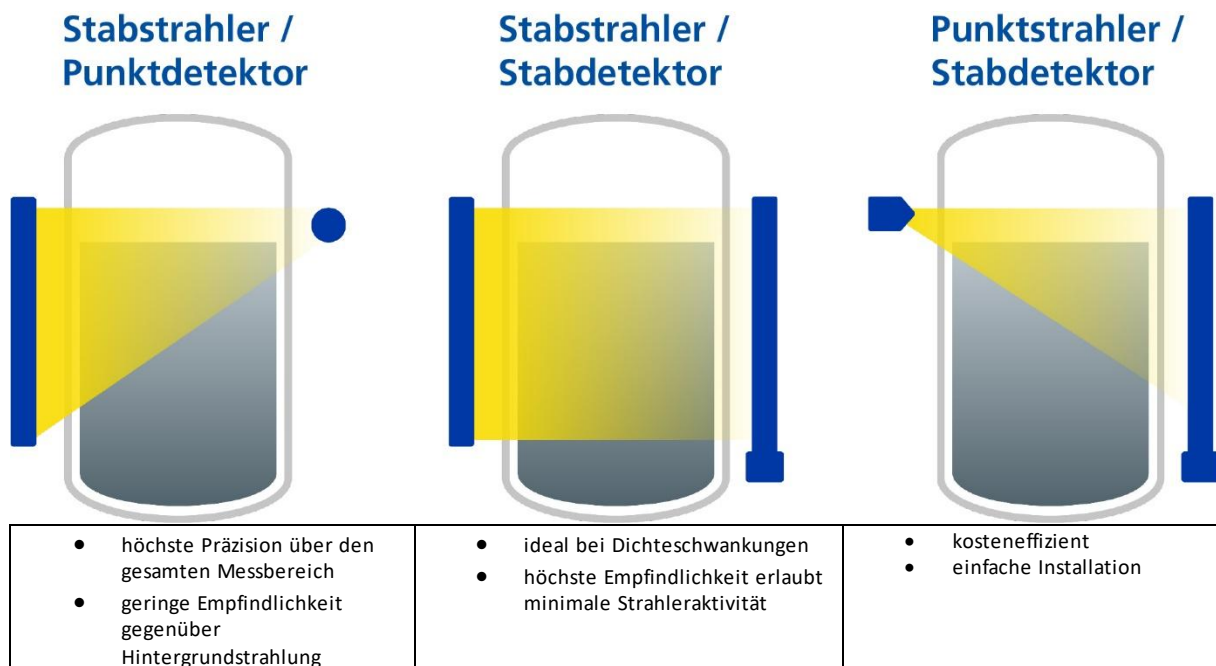


Abb. 2: Kontinuierliche Füllstandsmessung mit den verschiedenen Techniken: Stabstrahler/Punktdetektor, Stabstrahler/Stabdetektor und Punktstrahler/Stabdetektor (Bild: Berthold Technologies)

## 6. Strahlenschutz und Gamma-Strahlung

Im Strahlenschutz ist Gamma-Strahlung ein zentrales Thema. Betriebe, die mit Gammastrahlern arbeiten oder in denen Tätigkeiten ausgeübt werden, bei denen durch natürliche Radionuklide eine erhöhte Strahlung auftritt, unterliegen den Vorschriften des Strahlenschutzgesetzes und der Strahlenschutzverordnung. Genehmigungs- und Anmeldepflichten, sichere Lagerung, Bestellung von Strahlenschutzbeauftragten sowie die Einrichtung von Strahlenschutzbereichen sind relevante Themen für den sicheren Betrieb. Zur Kontrolle der tatsächlichen Exposition von beruflich tätigen Personen ist eine Personen-Dosimetrie erforderlich.

Die hohe Durchdringungsfähigkeit der Gammastrahlen erfordert bei technischen Strahlenquellen effektive Abschirmmaßnahmen, vielfach mit Blei oder Beton. Messgeräte wie Geiger-Müller-Zählrohre oder Germanium-Detektoren ermöglichen sowohl einfache Dosisleistungsmessungen als auch detaillierte spektrometrische Analysen zur Nuklididentifikation in der Umweltüberwachung oder bei der Freigabe radioaktiver Stoffe. Moderne Gammakameras revolutionieren die Lokalisierung und Identifikation von Strahlenquellen durch kombinierte Bildgebung via Coded-Mask- und Compton-Effekt. Sie erlauben Echtzeit-Aufnahmen und erleichtern Einsätze, wie in Abb. 3 dargestellt, unter radiologischen Bedingungen entscheidend.



*Abb. 3: Lokalisierung einer über 80m entfernten Quelle mit TBq Aktivität. Die Reduktion der Dosisleistung bei der Lokalisierung ist enorm: Wenige  $\mu\text{Sv/h}$  am Ort der Kamera und mehrere  $\text{mSv/h}$  im Nahbereich der Quelle bei Messungen mit Handdetektoren*

## **7. Zusammenfassung**

Die „Strahlung des Jahres 2025“ – die Gamma-Strahlung – ist mehr als nur ein physikalisches Phänomen. Sie ist ein vielseitiges Werkzeug, ein kritischer Risikofaktor und ein Anlass für weitreichende regulatorische Maßnahmen. Ihre kontrollierte Anwendung ermöglicht Fortschritt und Sicherheit gleichermaßen. Durch umfassende Fortbildung, moderne Messtechnik und verantwortungsvollen Umgang wird ein nachhaltiger und rechtskonformer Strahlenschutz gewährleistet – zum Schutz von Mensch und Umwelt.

## **8. Literaturverzeichnis**

- [1] Wikipedia Commons, Paul\_Villard.jpg, Abfrage 21.11.2024  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paul\\_Villard.jpg?uselang=en#Licensing](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paul_Villard.jpg?uselang=en#Licensing)

## WOVOR WILL UNS DER STRAHLENSCHUTZ SCHÜTZEN?

Breckow Joachim

*Technische Hochschule Mittelhessen (THM), Deutschland*

Eines der wichtigsten Ziele im Strahlenschutz ist die Begrenzung des durch ionisierende Strahlung verursachten Risikos bezüglich stochastischer Wirkungen. Risiken – individuell als auch kollektiv – sind einer Messung bzw. einer messtechnischen Überwachung jedoch nicht unmittelbar zugänglich. Daher wird im gegenwärtig praktizierten Strahlenschutz eine Risikobegrenzung durch die Begrenzung der (messtechnisch erfassbaren oder berechenbaren) Dosis und die Festlegung von Dosisgrenzwerten umgesetzt. Dabei wird unterstellt, dass die verschiedenen Dosisdefinitionen für spezifische Anwendungszwecke ein jeweils sinnvolles Maß für das Strahlenrisiko darstellen. In diesem Sinne praktiziert der Strahlenschutz das Prinzip der Risikobegrenzung durch das Konzept der Dosisbegrenzung.

Dieses Konzept hat sich zwar bewährt, beruht jedoch auf einer Reihe von Annahmen und Modellen, die nicht immer offensichtlich und bisweilen recht subtil in Strahlenschutzkonzepte einfließen. Als Folge davon rückt die Dosis, häufig mit nur ungenügender Berücksichtigung ihrer diversen Einflussgrößen, in den Vordergrund von Maßnahmen und Kriterien, während das eigentlich zu begrenzende Risiko in einigen Fällen zu wenig Beachtung findet.

In der Regel ist die im Strahlenschutz der Beurteilung des Risikos zugrundegelegte Größe das Detriment. Die effektive Dosis stellt in dieser Überlegung ein Maß für das Detriment dar und bildet als Schutzgröße im Strahlenschutz die hauptsächliche Basis zur Beschreibung des stochastischen Risikos. Nicht immer jedoch bildet die effektive Dosis das geeignete Maß für das Detriment bzw. das Risiko.



**Session 2**  
**Strahlenschutz in der Medizin**



# OPTIMIERUNG DER STRAHLENEXPOSITION BEI ANWENDUNG VON RÖNTGENSTRAHLUNG AM BEISPIEL EINER IN DER GASTROENTEROLOGIE GENUTZTEN RÖNTGENANLAGEN

## OPTIMIZATION OF RADIATION EXPOSURE BASED ON THE EXAMPLE OF AN X-RAY UNIT USED IN GASTROENTEROLOGY

Szermerski Bastian, Frank Rudolf, Döker Rolf, Komorowski Karlo, Geworski Lilli,

*Medizinische Hochschule Hannover, Deutschland*

### **Zusammenfassung**

*Bei der Anwendung von Röntgenstrahlung am Menschen sind Medizinphysik-Experten entsprechend § 131 StrlSchV zur Mitarbeit hinzuzuziehen. Eine wichtige Aufgabe ist die Festlegung von Geräteparametern um das Optimum aus Bildqualität und Strahlenexposition zu finden. Dieses ist abhängig von der geplanten Anwendung und den anwenderspezifischen Anforderungen und wird gemeinsam mit dem ärztlichen Personal ermittelt.*

*Dieser Beitrag zeigt die Optimierung an einer stationären Röntgenanlage mit Flachdetektor (Artis zee multi-purpose, Fa. Siemens Healthineers) für die Durchführung der endoskopisch retrograden Cholangiopankreatikographien (ERCP) und perkutanen transhepatischen Cholangiographien (PTCD).*

### **Summary**

*When using X-rays on human beings, medical physics experts must be consulted in accordance with § 131 StrlSchV. An important task is dose optimization by setting device parameters in order to find the optimum balance between image quality and radiation exposure. The optimal parameters depends on the planned application and on user-specific requirements and are determined together with the medical staff.*

*This article shows the optimization on a stationary X-ray system with a flat-panel detector (Artis zee multi-purpose, Siemens Healthineers) for endoscopic retrograde cholangiopancreatography (ERCP) and percutaneous transhepatic cholangiography (PTCD).*

**Schlüsselwörter** Radiologie, Intervention, Strahlenexposition, Bildqualität

**Keywords** radiology, intervention, radiation exposure, image quality

## **1. Einleitung**

Die endoskopisch retrograde Cholangiopankreatikographie (ERPC) und die perkutane transhepatische Cholangiographie (PTCD) zählen zu den Verfahren in der Gastroenterologie, bei denen Röntgenstrahlung im Rahmen einer Intervention am Verdauungssystem des Menschen eingesetzt wird. Dazu werden mobile oder stationäre C-Bogen-Röntgenanlagen verwendet. Die hier betrachtete Röntgenanlage verfügt über eine Belichtungsautomatik hinsichtlich verschiedener Parameter für die Betriebsweisen Durchleuchtung und Aufnahme. Bei der Durchleuchtung handelt es sich um das Erstellen einer Serie von Bildern um dynamische Prozesse darzustellen. Eine Aufnahme wird zur statischen Darstellung als Einzelbild mit höherer Bildqualität verwendet. Herstellerseitig wird die Anlage mit einer Vielzahl von vordefinierten Protokollen für verschiedene medizinische Fragestellungen ausgeliefert. In jedem Protokoll werden passend zum jeweiligen Bestimmungszweck passende

Parameter für die Röntgenquelle (z. B. Röhrenspannung, Pulsfrequenz, Pulslänge) und Bildverarbeitung (z. B. Kantenanhebung, Fensterung) verwendet. Diese können vom Nutzer konfiguriert und auf die konkreten Anwendungsfälle angepasst werden. Das Erreichen der jeweils erforderlichen Bildqualität ist zwingende Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung der Prozeduren.

Herstellerseitig wurde für die ERCP und PTCD jeweils ein Protokoll angelegt, welches an der Bedienkonsole in drei verschiedene Betriebsmodi für die Durchleuchtung, FL(-) mit geringerer, FL mit mittlerer und FL(+) mit höherer Exposition, versetzt werden kann. Für jeden Modus sind individuelle Parameter für die Dosisautomatik in Form von Kennlinien hinterlegt, die das Zusammenspiel z. B. von Röhrenspannung und -strom festlegen. Zweck ist, dass während einer Intervention jederzeit durch Wechsel des Modus auf Knopfdruck Einstellungen mit verschiedener Exposition und damit einhergehender Bildqualität genutzt werden können. Zusätzlich ist in jedem Modus als zweite Funktion die Aufnahme von statischen Einzelbildern (DR ACQ) mit hoher Bildqualität hinterlegt.

Die Belichtungsautomatik steuert die Röntgenröhre entsprechend den im jeweiligen Protokoll festgelegten Parametern. Dazu gehören z. B. die Wahl der Röhrenspannung, welche abhängig vom Gewicht des Patienten möglichst lange konstant gehalten werden soll und erst nachrangig automatisch erhöht wird, die Pulsrate, die Pulsbreite, die Röhrenspannung ab der die Pulsbreite erhöht wird statt die Spannung weiter zu erhöhen und die Fokuswahl (Brennfleckgröße). Die Automatik sorgt für eine Abschaltung der Strahlung bei Erreichen des eingestellten Nominalwerts für die Dosis am Detektor.

Die Anpassung von Protokollen ist ein iterativer Optimierungsprozess und bedarf der Zusammenarbeit von ärztlichem Personal und Medizinphysik-Experten.

Darüber hinaus besteht weiteres Optimierungspotential bei der technischen Durchführung. Optimale Röhrenposition, Winkelstellung, Tischhöhe, Detektorabstand und günstige Aufenthaltsorte des Personals müssen unter Berücksichtigung der klinischen Arbeitsweise ermittelt werden.

## **2. Anwendung von Röntgenstrahlung bei ERCP und PTCD**

### **2.1 ERCP**

Die ERCP dient der diagnostischen Darstellung der Gallenwege mit Kontrastmittel (Iod) bei gleichzeitiger Möglichkeit einer unmittelbaren therapeutischen Intervention. Hierzu wird ein Endoskop oral bis zur Mündung des Gallengangs im Zwölffingerdarm eingeführt. Von dort werden verschiedene Werkzeuge unter Röntgendurchleuchtung in den Gallengang eingebracht und wird Kontrastmittel appliziert. Als Hilfsmittel werden dabei Führungsdrähte für die Navigation und Positionierung verwendet. Bei gestörtem Abfluss können therapeutische Maßnahmen ergriffen werden, wie z. B. die Entfernung eines Gallensteins, die Anlage einer Drainage oder Implantation eines Stents bei tumorbedingter Verengung.

Für die Durchführung wird der Patient auf der linken Körperseite gelagert um die der C-Bogen um ca. 70° rotiert (siehe Abb. 1). Nachdem das Kontrastmittel in den Gallengang appliziert wurde, erfolgt eine kurze Durchleuchtung. Anschließend wird die Tischposition bei Bedarf korrigiert und das Strahlenfeld wird mit Tiefenblenden enger begrenzt. Zusätzlich wird der Bereich der Lunge nach Möglichkeit mit einem Keilfilter verschattet. Hiernach wird eine statische Einzelaufnahme angefertigt, welche als Referenzbild für die weitere Navigation unter Durchleuchtung dient.

## 2.2 PTCD

Bei der PTCD wird die Leber von außen durch die Haut hindurch punktiert und wird Röntgenkontrastmittel (Iod) in die Gallenwege appliziert. Bei einer Stauung von Gallenflüssigkeit kann über diesen Zugang eine Drainage zur Ableitung der Galle angelegt werden. Hierbei werden die Gallenwege mit einem Draht wiedereröffnet und nach Möglichkeit eine Drainage nach innen in den Darm angelegt oder, sofern erforderlich, ein künstlicher Ausgang.

Dieses Verfahren stellt eine Alternative zur ERCP dar und wird angewendet, wenn z. B. die endoskopische Drainage nicht sinnvoll möglich erscheint.

Bei der PTCD liegt der Patient auf dem Rücken und der Detektor wird mit etwas Arbeitsabstand über der Leber positioniert.

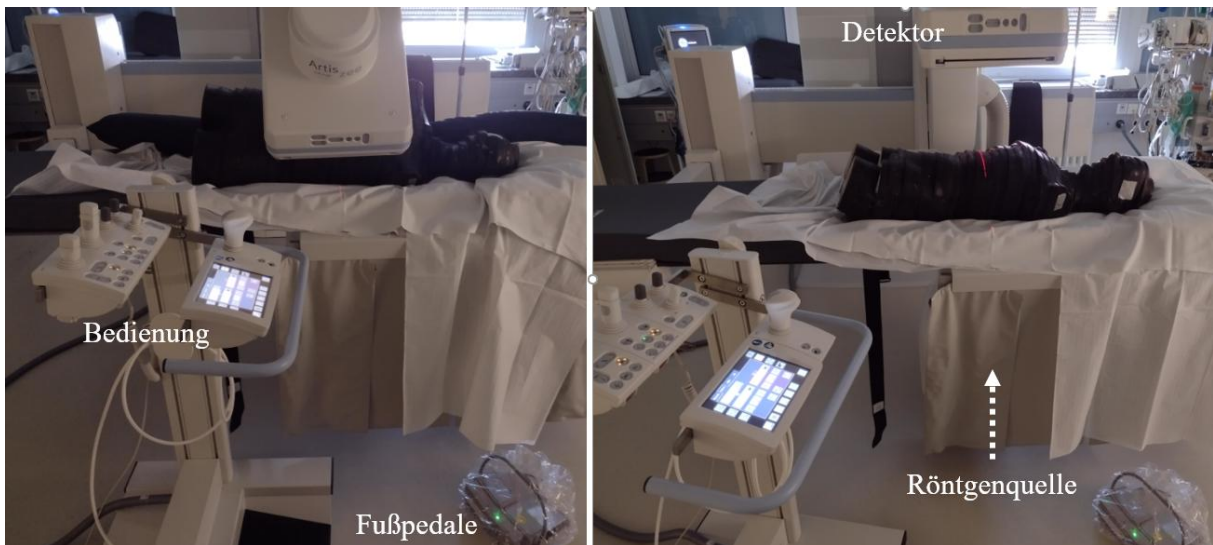


Abb. 1: Nachstellung der ERCP (links) und PTCD (rechts) mit einem Alderson-Phantom, Quelle: MHH

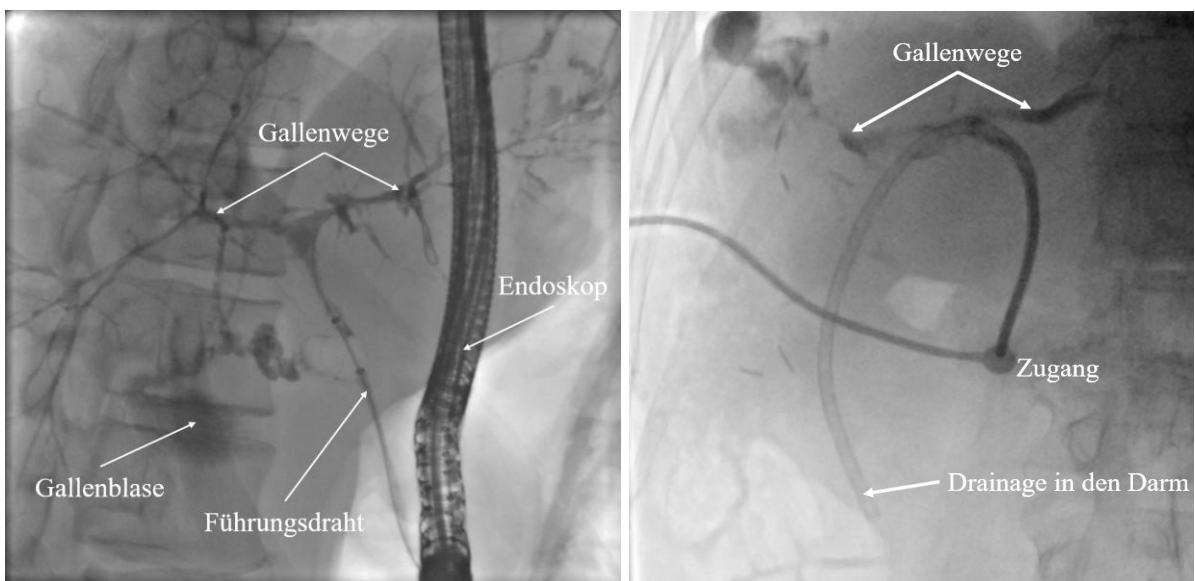


Abb. 2: Beispielaufnahmen ERCP (links) und PTCD (rechts), Quelle: MHH

### **3. Zu berücksichtigende klinische Aspekte**

Bei der ERCP und PTCD werden Drähte mit einem Durchmesser von 0,018“, 0,025“ oder 0,032“ in den Körper eingebracht. Unter Röntgendurchleuchtung müssen diese sowohl statisch als auch bewegt gut sichtbar sein. Daher darf die Pulsrate der Röntgenstrahlung nicht zu gering gewählt werden. Bei der Verwendung von Iod als Kontrastmittel ist zu beachten, dass eine Erhöhung der Röhrenspannung zu einer Verringerung des Iod-Kontrasts führen kann. Auch ist bei der Wahl des Bereichs der von der Dosisautomatik eingesetzten Zusatzfilterung (bis zu 0,9 mm Cu) die damit verbundene Aufhärtung des Spektrums zu berücksichtigen. Anhand der Darstellung des Kontrastmittels in den Gallengängen können Verengungen und auch das Vorhandensein von Gallensteinen nachgewiesen werden, da das Kontrastmittel um die Steine herum strömt. Die Gallenwege selbst sind ohne Kontrastmittel nicht geeignet darstellbar, ebenso wenig die meisten Gallensteine. Da immer mit Kontrastmittel gearbeitet wird, bestehen keine Anforderungen an einen hohen Weichteilkontrast und die Organe müssen nicht zur Befundung anatomisch dargestellt werden.

Bei den Patienten handelt es sich um ein Kollektiv jeden Alters, einschließlich sehr junger Kinder. Diese sind als besonders strahlensensibel zu betrachten. Die Latenzzeit für das Auftreten stochastischer Strahlenschäden liegt in der Regel innerhalb der verbleibenden Lebenszeit. Deterministische Strahleneffekte treten im Regelfall nicht auf, auch wenn während der gesamten Prozedur weitgehend durch dieselbe Hautfläche gestrahlt wird.

### **4. Optimierungsansatz und Ergebnis**

Als Optimierung wird die Anpassung der Aufnahmeparameter zum Erreichen einer hinreichend guten Bildqualität bei möglichst geringer Strahlenexposition verstanden. Vorgabe des ärztlichen Personals ist hierbei, dass nach Gabe des Kontrastmittels anatomische Strukturen der Gallengänge sowie Führungsdrähte gut sichtbar sein müssen. Ein Rauschen oder ein insgesamt körniger Bildeindruck kann in Kauf genommen werden. Weiterhin sollen nicht zu viele verschiedene Protokolle mit wiederum noch vielen wählbaren Optionen eingerichtet werden, da hierbei Fehler bei der jeweils vorgesehenen Auswahl des Protokolls auftreten könnten. Explizit wurde ein separates Protokoll für kleine Kinder ab Geburt mit deutlicher Dosisreduktion gegenüber der Verwendung von Protokollen für Erwachsene gewünscht. In Zusammenarbeit von Medizinphysik-Experten und Ärzten wurde also das Ziel verfolgt, optimierte Protokolle für die ERCP, PTCD und pädiatrische Patienten anzulegen.

Ausgangspunkt für die Optimierung sind grundsätzlich die vom Hersteller vorgegebenen Parameter, welche – soweit konfigurierbar – sukzessiv angepasst wurden. Ebenso wurde festgelegt, bei Durchleuchtung ausschließlich den Betriebsmodus FL(-) mit der geringsten Exposition zu verwenden. Der Modus ermöglicht eine akzeptable Bildqualität und mit bis zu 0,9 mm Cu-Zusatzfilter eine weitere Reduktion der Hautdosis. Die Parameter wurden insgesamt so gewählt, dass unabhängig von der Statur der Patienten noch eine akzeptable Bildqualität resultiert.

Zusätzlich zur Konfiguration von Protokollen wurden weitere Möglichkeiten zur Reduktion der Strahlenexposition für Patienten und Personal evaluiert: So wurden im Patientenbetrieb die technischen Möglichkeiten der Anlage weitgehend ausgeschöpft, wie z. B. die bestmögliche Verwendung von Tiefen- und Keilfiltern und die Wahl des Abstands von Röhre und Detektor. Die Pulsrate wurde auf das niedrigste Maß gesetzt, bei welchem aus ärztlicher Sicht gerade noch mit einem Führungsdraht in den Gallengängen navigiert werden kann. Im Nachgang wurde die Pulsbreite soweit reduziert, dass der Draht noch hinreichend gut sichtbar bleibt. Auch

wurde die optimale Tisch- und Röhrenposition ermittelt, bei welcher ergonomisches Arbeiten möglich ist, ohne dass Penumbra-Artefakte durch einen zu großen Abstand zwischen Patient und Detektor relevant werden.

Für pädiatrische Patienten wird zur Reduktion der Exposition das Streustrahlenraster entfernt und ein maximaler Abstand zwischen Röntgenquelle und Detektor gewählt, wobei das Kind etwa mittig dazwischen gelagert wird. Hier wird der Effekt ausgenutzt, dass bei Kindern wegen des relativ geringen durchstrahlten Volumens deutlich weniger Streustrahlung entsteht und das fehlende Streustrahlenraster durch einen größeren Detektorabstand kompensiert wird. Für die pädiatrischen Patienten wird der Herstellerempfehlung gefolgt, die Maßnahmen unterhalb von 20 kg Körpergewicht zu ergreifen und das entsprechende Protokoll zu nutzen.

Für die Durchführung der ERCP und PTCD wurden die in Tab. 1 aufgeführten Parameter zur Steuerung der Röntgenquelle festgelegt.

Tab. 1: Optimierte Protokollparameter

Parameter	FL(-)	DR ACQ	< 20 kg FL(-)	< 20 kg DR ACQ
Röhrenspannung	73 kV	77 kV	66 kV	73 kV
Pulsbreite	10 ms	25 ms	6,4 ms	10,0 ms
Pulsrate	7,5 s <sup>-1</sup>	Einzelbild	4,0 s <sup>-1</sup>	Einzelbild
Dosis pro Puls	45 nGy	1.200 nGy	18 nGy	540 nGy
min. Cu-Filter	0,3 mm	0,0 mm	0,3 mm	0,1 mm
max. Cu-Filter	0,9 mm	0,0 mm	0,9 mm	0,1 mm

Nach der Anpassung wurde eine Evaluation vorgenommen und eine Statistik für die Dosisflächenprodukte aus einem Dosismanagementsystem entnommen (Tab. 2).

Tab. 2: Dosisflächenprodukte nach Anwendung der optimierten Parameter

Verfahren	Anzahl	Max. (cGy·cm <sup>2</sup> )	Mittelwert (cGy·cm <sup>2</sup> )	Median (cGy·cm <sup>2</sup> )	75. Perzentil (cGy·cm <sup>2</sup> )	DRW (cGy·cm <sup>2</sup> )
ERCP	81	11564	1621	1095	2082	2000
PTCD	4	1726	498	132	1345	-

Die Dosisflächenprodukte liegen bei der ERCP im Mittel und Median unterhalb des Diagnostischen Referenzwertes (DRW). Dabei kann das Dosisflächenprodukt je nach Aufwand der Prozedur auch höher ausfallen. So kann sich eine Gallensteinentfernung in ihrer Komplexität deutlich von einer tumorbedingten Verengung und Implantation eines Stents unterscheiden.

Des Weiteren wurde unter Verwendung der vom Hersteller hinsichtlich des Streustrahlenfeldes zur Verfügung gestellten Informationen evaluiert, welche Aufenthaltsbereiche für das Personal günstig erscheinen, und die Arbeitsumgebung im Rahmen der Möglichkeiten angepasst. Die vorhandenen Gerätschaften etwa wurden so angeordnet, dass der Abstand zum Streumedium, dem durchstrahlten Teil des Patienten, vergrößert wurde und ein ergonomisches Arbeiten am Patienten weiterhin möglich ist.

## 5. Zusammenfassung

Für die ERCP und PTCD wurden Untersuchungsprotokolle erstellt, die auf modifizierte Durchleuchtungs- und Aufnahmeparameter zurückgreifen. Für Kinder unter 20 kg Gewicht wurde ein Protokoll so angepasst, dass mit reduzierter Dosis eine gute Bildqualität erreicht wird. Dies beinhaltet den Verzicht auf die Verwendung eines Streustrahlenrasters.

Durch die Anpassung von Parametern für die Steuerung der Röntgenröhre, vgl. Tabelle 1, und solchen für die Bildnachverarbeitung kann die Darstellbarkeit von in den Körper eingebrachten Drähten verbessert und zugleich die Strahlenexposition niedrig gehalten werden. Diese liegt bei der ERCP im Median unterhalb des diagnostischen Referenzwertes (DRW) von  $2000 \text{ cGy}\cdot\text{cm}^2$  [1], bei der PTCD niedriger.

Die Anpassung von Protokollen und die Art und Weise der technischen Durchführung als Optimierungsmaßnahmen stellt einen iterativen Prozess in Zusammenarbeit von Ärzten und Medizinphysik-Experten dar.

## **6. Literaturverzeichnis**

- [1] Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenanwendungen vom 17. November 2022, BAnz AT 11.01.2023 B11

# EIN BLICK HINTER DIE KULISSEN: ERFAHRUNGEN AUS NEUBAU UND BETRIEB DES STUTTGART CANCER CENTERS

Poetsch Maria<sup>1</sup>, Staubus Sebastian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg, <sup>2</sup>Klinikum der Landeshauptstadt Stuttgart gKAöR, Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie / MVZ, Deutschland

## **Zusammenfassung**

*Der Neubau des Cancer Centers am Klinikum Stuttgart wurde mit dem Ziel realisiert, die onkologische Versorgung durch eine enge räumliche Verzahnung von Diagnostik, Therapie und unterstützenden Einheiten wesentlich zu verbessern. Der Beitrag beschreibt die grundlegenden planerischen und regulatorischen Anforderungen im Bereich der Strahlentherapie und Nuklearmedizin, darunter der bauliche Strahlenschutz, gesetzliche Vorgaben sowie normbasierte Umsetzungsrichtlinien. Besonderes Augenmerk lag auf der Errichtung strahlenschutztechnischer Einrichtungen, moderner Abkling- und Abfallanlagen sowie der Umsetzung eines umfassenden Prüf- und Kommunikationskonzepts. Der Artikel hebt die Bedeutung frühzeitiger Abstimmung mit Behörden und Sachverständigen sowie die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Beteiligten als zentrale Erfolgsfaktoren hervor. Das Projekt dient als Beispiel für gelungene technische, organisatorische und medizinische Integration in einem hochspezialisierten Versorgungsbau.*

**Schlüsselwörter** Strahlenschutz, Nuklearmedizin, Krankenhausplanung, Interdisziplinäre Zusammenarbeit

**Key words** Radiation protection, Nuclear medicine, Hospital planning, Interdisciplinary collaboration

## **1. Einleitung**

Die onkologische Versorgung unterliegt einem kontinuierlichen Wandel, sowohl in technologischer als auch in struktureller Hinsicht. Mit dem Ziel einer verbesserten Patientenversorgung, einer engeren interdisziplinären Zusammenarbeit und der Optimierung logistischer Abläufe wurde am Klinikum Stuttgart der Neubau eines Cancer Centers realisiert. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die architektonisch-funktionalen Anforderungen, den baulichen Strahlenschutz sowie die interdisziplinäre Projektabwicklung unter Einbindung verschiedenster Akteure.

## **2. Von der langen Achse zur engen Verzahnung – Strukturwandel in der Krankenhausplanung**

Die Strukturen des Altbaus waren durch das „Prinzip der langen Wege“ geprägt: Funktionsbereiche lagen teils weit voneinander entfernt, was sich negativ auf Prozesszeiten und Zusammenarbeit auswirkte. Der Neubau folgt stattdessen dem „Prinzip der engen Verzahnung“ – diagnostische, therapeutische und unterstützende Einheiten wurden räumlich konzentriert geplant. In der konkreten Umsetzung grenzt das Planungs-CT direkt an den Bereich der Brachytherapie, die zentrale Bestrahlungsplanung erfolgt im selben Gebäudekomplex und auch ein GMP-Bereich wurde in die diagnostische Infrastruktur integriert. Vom Nuklearmediziner über Onkologen, Chirurgen, Strahlentherapeuten, Psychologen, Physiotherapeuten bis zum

Molekulargenetikern sollen alle Fachbereiche die Patienten besser behandeln können, um Wegzeiten zu verkürzen und Zusammenarbeit sowie Kommunikation zwischen den Experten zu vereinfachen. Ein Vorteil für die Patienten ist die gebündelte Kompetenz im Kampf gegen den Krebs in großen, lichtdurchfluteten Räumen mit neuester Technik.

### **3. Strahlentherapie – Anforderungen an Planung und Umsetzung**

Die Planung der Strahlentherapie unterliegt umfassenden regulatorischen und technischen Anforderungen:

- Gesetzliche Grundlagen: darunter das Strahlenschutzgesetz und -verordnung, Baurecht, Brandschutz und Vorgaben der Aufsichtsbehörden.
- Normative Vorgaben an die Bauausführung: wie unter anderem DIN 6847-2 (baulicher Strahlenschutz), DIN 1946-4 (Raumlufttechnik) oder die DIN 25422-1 (Aufbewahrung und Lagerung sonstiger radioaktiver Stoffe).
- Gerätespezifische Vorgaben: Spezifikationen der Hersteller, DIN 6847-5 (Konstanzprüfung von Kennmerkmalen bei medizinischen Elektronenbeschleuniger-Anlagen) oder DIN 6846-2 (Strahlenschutzregeln für die Errichtung medizinischer Gammabestrahlungsanlagen).

Hinzu kommen behördliche Auflagen, weitere Spezifikationen und Erkenntnisse aus dem Erfahrungsrückfluss im Dialog mit Behörden und Sachverständigen.

Ein besonderes Augenmerk beim Bau des Cancer Centers lag unter anderem auf der Vereinheitlichung der Strahlenschutzttore, der Integration unabhängiger Messsysteme und der transparenten Visualisierung von Betriebszuständen wie „Durchleuchtung an“ oder „Sperrbereich aktiv“.

### **4. Nuklearmedizin – Diagnostik, Therapie und Abfallmanagement**

Der Bereich Nuklearmedizin im Neubau vereint Diagnostik (z. B. PET-CT, SPECT-CT, Gammakamera oder Myokardszintigraphie), ein Radionuklidlabor und Therapie mit einer eigenen Bettenstation (8 Betten) und umfassendem Strahlenschutzkonzept. Es wurden unter anderem folgende Komponenten geplant und umgesetzt:

- Bauliche Schutzmaßnahmen Nuklearmedizin Station: für Normal- und Hochdosispatienten, raumplanerische Ausgestaltung mit Berücksichtigung von Aufenthaltsfaktoren, Verweilzeiten sowie notwendige Sichtachsen und Zugänge oder Installation von Bleiglasfenster und Strahlenschutz Türen.
- Festmülllagerung: Auf Grundlage rechtlicher Vorgaben (Atomgesetz, Strahlenschutzgesetz und -verordnung, atomrechtliche Entsorgungsverordnung), geltender Richtlinien, industrieller Normen sowie der Annahmebedingungen der Landessammelstelle erfolgt die Ausgestaltung unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen wie Lagervolumen, Protokollierungsstandards und Messplatzorganisation.
- Abklinganlagen für Abwässer: mit Komponenten wie doppelte Verrohrung, Pufferbehälter, Umkehrosmose, Aktivkohlefilter, Hebeanlagen und Notfallkonzept. Die zuvor eingesetzte Abklinganlage war störanfällig und verfügte über ein deutlich geringeres Fassungsvermögen.

### **5. Integration von Strahlenschutz und Prüfprozessen**

Der bauliche Strahlenschutz wurde auf mehreren Ebenen geplant und überprüft:

1. Theorie: Berechnungen im Vorfeld auf Basis normativer Vorgaben und Strahlenschutzgutachten.
2. Überprüfung: Plausibilitätsprüfung und technische Abstimmung mit Herstellern, Behörden und Sachverständigen.
3. Messung: Vor-Ort-Prüfungen, z. B. Dichtheitsprüfungen, Prüfungen der Geräte, Messungen zur Verifikation des umgesetzten baulichen Strahlenschutzes, Messungen im laufenden Betrieb.

Die frühzeitige Abstimmung mit den Behörden (RP), klare Ablaufszenarien und eine enge Zeit- und Personalplanung waren essenziell. Einzelne Messphasen erforderten gezielte Sperrungen ganzer Ebenen für eine Woche und einen erhöhten Personalaufwand unter Beachtung des individuellen Strahlenschutzes.

## 6. Kommunikation als Erfolgsfaktor

Ein Projekt dieser Größenordnung erfordert die enge Kooperation aller beteiligten Parteien – von Planungsbüros, Lieferanten und Sachverständigen über die Betreiberin bis hin zu den Aufsichtsbehörden. Die Umsetzung hat gezeigt, dass parallele, einander bedingende Prüfprozesse, Dokumente und Genehmigungen nur durch offene Kommunikation und flexible Abstimmungsprozesse effizient zu koordinieren sind.

Das frühzeitige Einbinden von Sachverständigen ermöglichte Nachbesserungen vor finaler Fertigstellung und erhöhte die bauliche und regulatorische Sicherheit. Die Verknüpfung aus Planungsqualität, interdisziplinärem Verständnis und technischer Expertise war hierbei entscheidend.

## 7. Fazit

Der Neubau des Cancer Centers am Klinikum Stuttgart stellt einen zukunftsweisenden Schritt zur Verbesserung der onkologischen Patientenversorgung dar. Die enge Verzahnung von Diagnostik und Therapie, die koordinierte Zusammenarbeit mit allen Beteiligten im Rahmen umfassender Strahlenschutzmaßnahmen bilden ein gelungenes Beispiel moderner Krankenhausplanung. Die Erfahrungen aus diesem Projekt verdeutlichen die Notwendigkeit früher Kommunikation, klarer Abläufe und integrativer Planungsansätze bei komplexen medizinisch-technischen Bauvorhaben.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Planung und Betrieb des neuen Cancer Centers können auch für vergleichbare Neubauprojekte mit nuklearmedizinischen oder strahlentherapeutischen Schwerpunkten von Bedeutung sein.

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist
- [2] Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist
- [3] DIN 6847-2: Baulicher Strahlenschutz für medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen – Anforderungen an Planung und Ausführung
- [4] DIN 6847-5: Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen – Konstanzprüfung von Kennmerkmalen

[5] DIN 6846-2: Medizinische Gammabestrahlungsanlagen – Strahlenschutzregeln für Errichtung und Betrieb

[6] DIN 25422-1: Lagerung sonstiger radioaktiver Stoffe – Allgemeine Anforderungen

[7] DIN 1946-4: Raumluftechnik – Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens

# IN-SITU-GAMMAMESSUNGEN IM BUNKER EINES MEDIZINISCHEN LINEARBESCHLEUNIGERS

## IN-SITU GAMMA MEASUREMENTS IN A MEDICAL LINEAR ACCELERATOR TREATMENT ROOM

Wanke Carsten<sup>1</sup>, Döker Rolf<sup>1</sup>, Geworski Lilli<sup>1</sup>, Lange Hans-Jürgen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Medizinische Hochschule Hannover, Deutschland, <sup>2</sup>Mirion Technologies (Canberra) GmbH, Rüsselsheim, Deutschland

### **Zusammenfassung**

*Beim Betrieb von medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigern (LINACs) mit Beschleunigungsenergien von über 8 MeV entstehen Neutronen, die neben der Aktivierung von Geräteteilen auch die Aktivierung der baulichen Substanz des Bunkers zur Folge haben können. Zur Untersuchung der in baulichen Strukturen erzeugten radioaktiven Stoffe wurden daher in einem Bunker, in dem ein medizinisch genutzter LINAC betrieben wird, Messungen mit einem In-situ-Gammaspektrometer durchgeführt. Bei allen Messungen wurden gammastrahlende Radionuklide nachgewiesen, die jeweils charakteristisch für das im Sichtfeld des Detektors befindliche Material sind. Die massenbezogenen Aktivitäten lagen, unter Anwendung der Summenformel, bei allen Messungen jeweils unter den Werten für die uneingeschränkte Freigabe nach Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV.*

### **Abstract**

*During operation of a medical linear accelerator for electrons (LINAC) with energies above 8 MeV, neutrons are emitted, which can lead to an activation not only of device components but also of building structures of the accelerator room. For assessing the radioactivity induced in the building structure, measurements with an in-situ gamma spectrometer were conducted. In the field of view of the detector, the respective measurements resulted in the detection of gamma-emitting radionuclides characteristic for the building material in this area. The mass-specific activities were found to meet the criteria for unrestricted clearance according to Annex 4 Table 1 Column 3 of the German Radiation Protection Ordinance, applying the sum-formula.*

**Schlüsselwörter** LINAC, Aktivierung, Freigabe, In-situ-Messungen

*Keywords* LINAC, activation, clearance, in-situ measurements

## **1. Einleitung**

Zur Behandlung onkologischer und anderer Erkrankungen werden bei der Strahlentherapie hochenergetische Photonenfelder genutzt. Für die Erzeugung dieser Felder werden überwiegend Elektronen-Linearbeschleuniger eingesetzt. Mit modernen Geräten werden Beschleunigungsenergien von über 20 MeV erreicht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es durch den Kernphotoeffekt zur Emission von Neutronen und zur Aktivierung von Beschleunigerkomponenten kommen kann. Dieser Effekt wird ab einer Beschleunigungsenergie von ca. 8 MeV relevant [1].

Durch den Betrieb eines Beschleunigers mit den genannten Energien sind Komponenten des Gerätes, insbesondere z. B. das Target oder der Kollimator im Strahlerkopf, aktiviert. Diese Komponenten bedürfen im Allgemeinen der Behandlung als radioaktive Stoffe. Für im Raum befindliche Gegenstände und Einrichtungen sowie für die baulichen Strukturen wird dagegen nicht davon ausgegangen, dass es zu signifikanter Aktivierung kommt.

In der Klinik für Strahlentherapie und Spezielle Onkologie der Medizinischen Hochschule Hannover steht der Austausch eines Beschleunigers, der nach Herstellerangaben in der Lage ist, Photonenstrahlung mit einer Grenzenergie von 15 MeV und Elektronenstrahlung mit einer Grenzenergie von 18 MeV zu erzeugen, gegen ein neues Gerät an. Anlässlich des vorgesehenen Austauschs wurden In-situ-Gammamessungen durchgeführt, um die Annahme zu verifizieren, dass keine signifikante Aktivierung vorhanden ist.

## 2. Experimentelles

Zum Einsatz kam ein für die Verwendung mit der Software ISOCS der Firma Canberra (s. u.) charakterisierter Reinstgermaniumdetektor vom Typ BE3830 mit einem 90°-Kollimator (Bleistärke 50 mm) und einer integrierten Elektronik vom Typ Canberra Inspector 2000. Steuerung und Auswertung erfolgten mit der Software Genie 2000. Zur Ermittlung der Nachweiswahrscheinlichkeit wurde die Software ISOCS verwendet. Diese ermöglicht, basierend auf einer Charakterisierung des Detektors und einer geometrischen Beschreibung der gemessenen Strukturen und Objekte, eine rückführbare Modellierung der Nachweiswahrscheinlichkeit [2].

Nach [3] ist die höchste Aktivierung in Strukturen zu erwarten, die sich in räumlicher Nähe zum Strahlerkopf befinden. Da die Gantry um ihre Achse gedreht werden kann, sind dies im konkreten Fall die Wände rechts und links der Gantry, die Decke sowie der Fußboden. An jeder dieser Strukturen wurde jeweils eine In-situ-Gammamessung durchgeführt. Die anderen Wände sind weiter vom Detektorkopf entfernt und können zudem vom Primärstrahl nicht getroffen werden. Die vermessenen Wände bestehen aus Barytbeton, der Wand rechts der Gantry ist außerdem eine Schicht aus Blei aufgesetzt. Die Decke besteht ebenfalls aus Barytbeton, unter der Decke verläuft ein Stahlträger. Im Fußboden unter dem Isozentrum befindet sich eine versenkte Stahlplatte, auf der die Unterbauten des Patiententisches montiert sind. Abgedeckt ist diese Tischgrube mit Platten aus leichtem Material.

Für die Modellierung der Nachweiswahrscheinlichkeit wurden jeweils an die Messsituation angepasste Modelle verwendet. So ist z. B. bei der Aktivierung von Betonstrukturen durch Neutronen, wie sie bei den Wänden vermutet werden kann, im Allgemeinen ein Tiefenverlauf zu beobachten, bei dem die Aktivität zunächst ansteigt und danach exponentiell abfällt. Zur Berechnung der Nachweiswahrscheinlichkeiten wurde daher vorwiegend das in der Software Canberra ISOCS implementierte Modell der „exponentiellen Kreisfläche“ verwendet, bei dem der Tiefenverlauf der Aktivität in der Quellschicht mit einem ansteigenden und einem abfallenden Teil abschnittsweise modelliert wird. Die tatsächliche Aktivierung hängt dabei von den Sekundärteilchenfeldern und den in den Wänden enthaltenen chemischen Elementen ab, aus denen die Radionuklide gebildet werden und die das Neutronenfeld beeinflussen. Informationen über die Tiefenverteilung der durch Aktivierung tatsächlich erzeugten Aktivität lagen jedoch nicht vor, und die Gewinnung von Materialproben zur Ermittlung der Tiefenverteilung war nicht möglich, da der Bestrahlungsraum bis zum Tausch des Linearbeschleunigers weiter genutzt wird. Aus diesem Grunde wurden Sätze von modellierten Kalibrierungen erstellt, bei denen jeweils einer der in die Modellierung eingehenden Parameter in einem Bereich, der als realistisch eingeschätzt wird, variiert wurde. Die mit den verschiedenen Kalibrierungen berechneten Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Bei allen Messungen wurden gammastrahlende Radionuklide nachgewiesen, die durch Neutronenaktivierung entstehen können. So wurden beispielsweise bei der Messung von Barytbetonstrukturen unter anderem die Radionuklide Na-24, Co-60, Ba-131 und Ba-133 gefunden, die auf die Aktivierung des im Sichtfeld des Detektors befindlichen Materials zurückzuführen sind: Na-24 entsteht durch Aktivierung natürlichen Natriums in Beton, die Bariumisotope durch die Aktivierung natürlichen Bariums, das der wesentliche Bestandteil des als Zuschlagstoff verwendeten Baryts ist. Co-60 kann durch Aktivierung von natürlichem Kobalt, das im Beton, aber auch in dem zur Bewehrung verwendeten Stahl vorhanden ist, entstanden sein. Die höchsten Aktivitätswerte ergeben sich bei Verwendung von Modellierungen, bei denen eine verhältnismäßig weit in das Material hineinreichende Tiefenverteilung angenommen wird. Die Aktivitätswerte, die unter Annahme einer tief in das Material hineinreichenden Aktivitätsverteilung gewonnen wurden, scheinen aber die tatsächlich im Material vorhandenen Aktivitäten zu überschätzen.

Neben Radionukliden, die auf Aktivierung in Beton zurückzuführen sind, wurden in den Gammaskpektren auch Radionuklide gefunden, die auf die Aktivierung anderen Materials, das sich im Sichtfeld des Detektors befindet, zurückzuführen ist. So wurden zum Beispiel bei der Messung der Wand rechts der Gantry radioaktive Antimonisotope nachgewiesen. Diese sind vermutlich auf die Aktivierung von stabilem Antimon zurückzuführen, das als Legierungsmaterial für Blei verwendet wird und auch in der Bleischicht vorhanden ist, die der Wand vorgesetzt wurde. In den Gammaskpektren der Messungen von Decke und Boden wurden Nuklide gefunden, die auf die Aktivierung von Stahl im Träger an der Decke oder in der Platte im Boden zurückgeführt werden können.

Die berechneten Aktivitäten der einzelnen Nuklide in den beiden Wänden, der Decke und dem Boden variierten abhängig von der zugrunde gelegten Aktivitätsverteilung. Je nach Modellannahmen und verwendeten Parametern lagen die Werte der Gesamtaktivität in einer untersuchten Struktur im Bereich bis hin zu einigen Kilobecquerel. Bezieht man die maximalen für die verschiedenen baulichen Strukturen berechneten Aktivitäten auf die nach Anlage 8 StrlSchV für die Mittelung nicht wesentlich zu überschreitende Masse von 300 kg, so ist die Freigrenze der spezifischen Aktivität in keiner Messung ausgeschöpft. Die realistischen Massen der untersuchten, im Sichtfeld des Detektors befindlichen Strukturen liegen in der Regel deutlich über einer Masse von 300 kg. Bei der Messung der Decke liegen die ermittelten Werte für die spezifische Aktivität unter Anwendung der Summenformel auch dann deutlich unter dem Wert für die uneingeschränkte Freigabe, wenn man annimmt, dass sich die gesamte Aktivität derjenigen Radionuklide, die bei Neutronenaktivierung in Stahl entstehen können, im Stahlträger befindet, und die realistische Masse des Stahlträgers von ca. 85 kg berücksichtigt.

### 4. Fazit

In allen Gammaskpektren wurden künstliche Radionuklide nachgewiesen, die man auf eine physikalische Aktivierung der Baumaterialien in Wänden, Decke und Fußboden durch beim Betrieb des Linearbeschleunigers emittierte Neutronen zurückführen kann. Der Beschleuniger der MHH wurde über einen langen Zeitraum mit Energien von über 8 MeV genutzt. Die resultierenden Aktivitäten der erzeugten Radionuklide sind durchweg niedrig und liegen deutlich unterhalb der Werte für die uneingeschränkte Freigabe nach Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV. Dies bestätigt die Annahme, dass der Betrieb eines medizinischen Linearbeschleunigers keine signifikanten Aktivierungen an baulichen Strukturen zur Folge hat.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] International Atomic Energy Agency (Hrsg). Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators. IAEA Technical Reports Series Nr. 188. Wien, 1979
- [2] Venkatamaran R, Bronson F, Alrashkevich V, Young BM, Field F. Validation of in situ object counting system (ISOCS) mathematical efficiency calibration software. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 422 (1999) 450–454
- [3] Lee DY, Kim JH. Evaluating activation of the shielding walls of a treatment room using the Monte Carlo method. JINST 13 P05031, 2018

# **WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN RADIONUKLIDEN UND DEM MENSCHLICHEN ORGANISMUS: <sup>226/228</sup>RA-AUSSCHIEDUNGSANALYTIK SOWIE INTERAKTION VON <sup>243</sup>AM MIT NIERENZELLEN IN VITRO**

Senwitz Christian<sup>1,2,3</sup>, Walther Diana<sup>1</sup>, Taut Steffen<sup>3</sup>, Acker Margret<sup>3</sup>, Kahle Pia<sup>4</sup>, Kormoll Thomas<sup>4</sup>, Drobot Björn<sup>5</sup>, Heller Anne<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>VKTA - Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e. V., <sup>2</sup>TU Dresden, Fakultät Chemie und Lebensmittelchemie, <sup>3</sup>TU Dresden, Sachgebiet Strahlenschutz, Zentrales Radionuklidlabor, <sup>4</sup>TU Dresden, Fakultät Physik, Institut für Kern- und Teilchenphysik, <sup>5</sup>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie

Radionuklide (RN) weisen sowohl radio- als auch chemotoxische Eigenschaften auf und stellen bei Inkorporationsereignissen somit ein potenzielles Gesundheitsrisiko für den Menschen dar. Um ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen RN und biologischen Systemen zu erlangen, wurden im Rahmen des Verbundprojektes RADEKOR makroskopische Ausscheidungsanalysen mit natürlichen Radium-Nukliden (Teilprojekt A) sowie mikroskopische Expositionsstudien mit Americium an Nierenzelllinien (Teilprojekt B) durchgeführt.

In Teilprojekt A wurden Verzehrstudien mit Paranüssen und einem ausgewählten Heil-/Mineralwasser durchgeführt. Diese Lebensmittel enthalten höhere spezifische Aktivitäten an Ra als die übliche Nahrung und sind somit als Biotracer geeignet. Nach einem vorgegebenen Zeitplan wurden über einen Zeitraum von ca. 35 Tagen 24h-Ausscheidungsproben (Urin, Stuhl) gesammelt sowie aufgenommene Nahrungsmittel und Biotracer in Verzehrsprotokollen dokumentiert. Für die Bestimmung von <sup>226</sup>Ra und <sup>228</sup>Ra auf niedrigstem Aktivitätsniveau war die Entwicklung geeigneter Trenn- und Messverfahren sowie ihre Optimierung hinsichtlich Nachweisfähigkeit, Übertragbarkeit auf verschiedene Probenmaterialien (Lebensmittel, Wasser, Urin) und Routinetauglichkeit erforderlich. Anhand der erhobenen Daten konnten normierte Ausscheidungsraten berechnet sowie der zeitliche Verlauf der Exkretion von <sup>226</sup>Ra und <sup>228</sup>Ra ermittelt werden.

In Teilprojekt B wurden Nierenzelllinien von Mensch und Ratte mit <sup>243</sup>Am exponiert und die Effekte des Actinids auf biologische Parameter wie Zellviabilität, genomische Integrität, Apoptoseinduktion und Zellmorphologie analysiert. Außerdem wurde die intrazelluläre Am-Aufnahme ermittelt sowie die chemische Speziation des RN in Zellkulturmedium und Zellen bestimmt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden mit parallel durchgeführten mikrodosimetrischen Berechnungen korreliert und zusätzlich mit Daten des nicht-radioaktiven chemischen Am-Analogons Europium verglichen. Somit können Rückschlüsse auf das chemisch-biologische Verhalten von Am im Organismus sowie die radio- und chemotoxischen Eigenschaften des RN gezogen werden.



**Session 4**  
**Ausbildung zum Thema Strahlenschutz in**  
**Schulen**



## AUSBILDUNG ZUM THEMA STRAHLENSCHUTZ IN SCHULEN

Vahlbruch Jan-Willem<sup>1</sup>, Lange Astrid<sup>2</sup>, Neunzig Michael<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Hannover, <sup>2</sup>Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, <sup>3</sup>Zentrum für schulpraktische Lehrerbildung des Landes Nordrhein-Westfalen*

In dieser Session werden drei Referenten über dieses Thema aus ihren unterschiedlichen Perspektiven vortragen. Herr Vahlbruch (Leiter des IRS und Vorsitzender des Arbeitskreises Ausbildung im Fachverband) startet mit einem ersten Impulsvortrag und präsentiert einige Anregungen, die im AK Ausbildung erarbeitet worden sind.

Anschließend wird Frau Lange vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz eine Richtlinie vorstellen, die sich mit Sicherheit im Unterricht befasst. Es handelt sich um eine Empfehlung, die in der Kultusministerkonferenz fortlaufend weiterentwickelt wird.

Als dritter Referent wird Herr Neunzig vom Zentrum für schulpraktische Lehrerbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, einen Überblick über die möglichen Unterrichtsmethoden zum Thema Strahlenschutz geben.

Im Anschluss an diese drei Vorträge werden die Tagungsteilnehmer einbezogen und über das Thema Ausbildung zum Thema Strahlenschutz in Schulen soll diskutiert werden (Moderation: Herr Vahlbruch).



# **Session 5**

## **Strahlenschutzrecht**



# **FÜNF JAHRE NEUES STRAHLENSCHUTZRECHT IN ÖSTERREICH - ERFAHRUNGEN AUS DEM VOLLZUG MIT SCHWERPUNKT RADONSCHUTZ**

Zöchling Roman

*Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und  
Wasserwirtschaft (BMLUK), Österreich*

2020 wurde in Österreich das Strahlenschutzrecht primär im Zuge der Umsetzung der europäischen Grundnormenrichtlinie neu gefasst bzw. umfassend geändert. Das neue Strahlenschutzgesetz 2020 (StrSchG 2020) trat am 1. August 2020 in Kraft. Gleichzeitig wurden folgende auf dem StrSchG 2020 basierende Verordnungen neu verlautbart bzw. novelliert: Die Allgemeine Strahlenschutzverordnung (AllgStrSchV 2020), die Interventionsverordnung 2020 (IntV 2020), die Medizinische Strahlenschutzverordnung (MedStrSchV) und die Radioaktive Abfälle-Verbringungsverordnung (RAbf-VV). Gänzlich neu wurde die Radonschutzverordnung (RnV) in Kraft gesetzt. Sie enthält Bestimmungen zum Schutz von Personen vor Gefahren durch Radon in Aufenthaltsräumen von Wohngebäuden und an Arbeitsplätzen.

Mit dem neuen Strahlenschutzrecht in Österreich wird dem internationalen Stand der Technik Rechnung getragen und zur laufenden Verbesserung des Schutzes vor Gefahren durch ionisierende Strahlung beigetragen. Der Vortrag gibt einen Überblick über die Erfahrungen der letzten fünf Jahre aus dem Vollzug des neuen österreichischen Strahlenschutzrechts und beleuchtet Verbesserungen wie auch identifizierte Herausforderungen in Zusammenhang mit den neuen Regelungen. Zudem wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Änderungen im österreichischen Strahlenschutzrecht gegeben.

Ein Schwerpunkt des Vortrags sind insbesondere die Erfahrungen im Vollzug der neuen Radonschutzverordnung. Mit dieser Verordnung wurden erstmals Radonvorsorge- und Radonschutzgebiete ausgewiesen, wobei in letzteren nunmehr allgemein an Arbeitsplätzen im Erdgeschoß oder in Kellergeschoßen eine Verpflichtung zur Erhebung der Radonexposition besteht. Um die Einhaltung der neuen Vorgaben zu gewährleisten, liegt ein Hauptaugenmerk der Informationstätigkeit auf der Sensibilisierung der Allgemeinbevölkerung und der Verpflichteten (Arbeitgeber:innen) für die Gefahren von Radon sowie auf der Begleitung der angesprochenen Zielgruppen bei den zu treffenden Maßnahmen.



**Session 6**  
**Diskussionsrunden zu**  
**strahlenschutzrechtlichen Themen**



# STRAHLENSCHUTZRECHTLICHE THEMEN

Koletzko Gerd<sup>1</sup>, Nagels Sven<sup>2</sup>, Hellhammer Rolf<sup>3</sup>, Pehlivan Johanna<sup>4</sup>, Schlösser Dietmar<sup>5</sup>, Trautmannsheimer Markus<sup>5</sup>, Gruber Valeria<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung, Berlin, <sup>2</sup>JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH, Jülich, <sup>3</sup>Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Berlin, <sup>4</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), <sup>5</sup>VKTA - Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e. V., <sup>6</sup>Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, <sup>6</sup>AGES - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit

Die Diskussionsrunden befassen sich mit Fachthemen aus dem Strahlenschutzrecht in Deutschland, Schweiz und Österreich.

In fünf Arbeitsgruppen soll zu den ab 2018 eingeführten Strahlenschutzregelungen diskutiert werden.

1. Anwendung- und Berufsfelder im medizinischen Strahlenschutz
2. Freigabe radioaktiver Stoffe
3. Praktischer Strahlenschutz
4. Radon an Arbeitsplätzen
5. Bürokratieabbau im Strahlenschutz

Die Kerninhalte aller Themen befassen sich, mit Ausnahme des Themas „Bürokratieabbau“ mit den als Fragestellung formulierten Aspekten:

- Welche wesentlichen Änderungen gab es gegenüber die vorherigen Strahlenschutzregelungen in D, CH und in A?
- Was hat sich bewährt?
- Was wurde durch die neuen Strahlenschutzregelungen verbessert?
- In welchen Bereichen gibt es einen Änderungs-/Verbesserungsbedarf in den aktuellen Strahlenschutzregelungen?
- Welche Vorschläge kann der Fachverband formulieren, die an den Gesetzgeber als Vorschlag für eine Verbesserung der aktuellen Strahlenschutzregelungen gesandt werden können?

Für die einzelnen Themen konnten folgende Moderatorinnen/Moderatoren gewonnen werden, die die Diskussionsrunden inhaltlich vorbereiten:

- *Koletzko, Gerd*: Anwendung- und Berufsfelder im medizinischen Strahlenschutz  
Anwendungsfelder ionisierender Strahlung in der Medizin sind vielfältig. Grob werden die Fächer Radiologie, Nuklearmedizin und Strahlentherapie unterschieden. Dementsprechend viele Berufsfelder gibt es, die Verantwortung im Strahlenschutz tragen. Neben Ärzten und MPE sind es vor allen Dingen MTR, zunehmend auch MFA und weiters medizinisches Assistenzpersonal mit Zusatzqualifikationen, die hier verantwortungsvoll mitwirken. Wer darf was? Welche Qualifikation ist für die jeweilige Tätigkeit notwendig? Das sind die wesentlichen Fragen, die in der Diskussionsrunde besprochen werden sollen. Ziel ist es eine Übersicht über die Berufe und erforderliche Qualifikationen für medizinische Anwendungen ionisierender Strahlung zu erarbeiten.
- *Bothe Matthias*: Freigabe radioaktiver Stoffe
- *Hellhammer Rolf*: Praktischer Strahlenschutz

- *Pehlivan Johanna/ Valeria Gruber*: Radon an Arbeitsplätzen
- *Schlösser Dietmar/ Trautmannsheimer Markus*: Bürokratieabbau im Strahlenschutz

Die Ergebnisse sollen im Anschluss der Tagung auch inhaltlich weiter ausgewertet und möglichst in einer noch zu bestimmenden Form als Veröffentlichung zusammengefasst werden

**Session 7**  
**Radon**



# UNSCEARREPORT 2025: EVALUATION OF PUBLIC EXPOSURE TO IONIZING RADIATION - ERGEBNISSE FÜR RADON UND THORON

Ringer Wolfgang<sup>1</sup>, Antignani Sara<sup>2</sup>, Bochicchio Francesco<sup>2</sup>, Carpentieri Carmela<sup>2</sup>, Di Carlo Christian<sup>2</sup>, Gaskin Janet<sup>3</sup>, Gruber Valeria<sup>1</sup>, Hosoda Masahiro<sup>4</sup>, Ielsch Geraldine<sup>5</sup>, Janik Miroslaw<sup>6</sup>, Petermann Eric<sup>7</sup>, Sahoo Bijay Kumar<sup>8</sup>, Sedigheh Sina<sup>9</sup>, Tate Brendan<sup>10</sup>, Balonov, Mikhail<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Österreich; <sup>2</sup>Italian National Institute of Health (ISS), Italy; <sup>3</sup>National Research Council (NRC), Canada; <sup>4</sup>Hirosaki University, Japan; <sup>5</sup>Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), France; <sup>6</sup>The National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), Japan; <sup>7</sup>Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Deutschland; <sup>8</sup>Bhabha Atomic Research Centre (BARC), India; <sup>9</sup>Shiraz University, Iran; <sup>10</sup>Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), Australia; <sup>11</sup>UNSCEAR Consultant, Israel

Das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) veröffentlicht seit 1958 regelmäßig wissenschaftliche Evaluierungen betreffend die Exposition der Bevölkerung durch ionisierende Strahlung aus natürlichen und künstlichen Quellen. Der letzte Bericht wurde 2025 veröffentlicht.

Für diesen Bericht wurden von der Expertengruppe für Radon und Thoron mehr als 2000 Publikationen sowie die von 61 UN Ländern übermittelten Daten anhand von definierten Qualitätskriterien gesichtet und bewertet. Der Fokus lag dabei auf den Ergebnissen von nationalen (und regionalen) Erhebungen der Radon- und Thoronkonzentration in Gebäuden und im Freien sowie der Radonkonzentration in Trinkwasser. Zudem wurden auf Basis des Literaturreviews u.a. auch die zeitliche und räumliche Variabilität der Radonkonzentration in Gebäuden, die Aufenthaltszeit in Gebäuden, der Gleichgewichtsfaktor für Radon und zeitliche Trends in nationalen Radonkonzentrationen erfasst und im Bericht beschrieben.

Der weltweite Mittelwert der mittleren jährlichen Effektivdosis durch Strahlung aus natürlichen Quellen wurde mit 3 mSv abgeschätzt. Den Hauptbeitrag (etwa 60 %) liefert die Inhalation von Radon, Thoron und Folgeprodukten mit 1,8 mSv.

In diesem Beitrag werden die wesentlichen Ergebnisse betreffend Radon und Thoron präsentiert.

# RADON AUS SICHT DES ARBEITSSCHUTZES

## RADON FROM OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY PERSPECTIVE

Hofmann Robert, Fleischhammer Meike

*BG prevent GmbH, Kompetenzgruppe Strahlenschutz, München, Deutschland  
(Hinweis: Bis Mitte des Jahres 2025 firmierte die BG prevent GmbH unter  
B·A·D Gesundheitsvorsorge und Sicherheitstechnik GmbH)*

### **Zusammenfassung**

*Die Radonthematik wird seit Jahrzehnten in der Fachwelt behandelt. Über die RICHTLINIE 2013/59/EURATOM des Rates der europäischen Union [1] hat der Schutz vor Radon mittlerweile in allen EU-Mitgliedstaaten Eingang ins nationale Rechtswesen gefunden. Teils mit unterschiedlich ausgeprägtem Erfolg.*

*Ausgehend von der Beobachtung, dass weite Teile der Bevölkerung in Deutschland der Risikobewertung von Radon eine eher geringe Bedeutung beimessen [2], stellt sich die Frage, ob durch eine gezielte Ansprache von Arbeitgeber: innen und Arbeitnehmer: innen zu Themen des Arbeitsschutzes ein effektiverer Beitrag zum Schutz vor Radon erreicht werden kann.*

*Dieser Beitrag untersucht die Bedeutung des Radonschutzes am Arbeitsplatz und diskutiert, wie durch gezielte Strategien das Bewusstsein und die Schutzmaßnahmen gegen Radon verbessert werden können.*

*The issue of radon has been discussed by experts for decades. Radon protection has now been incorporated into national legislation in all EU member states via the Council of the European Union's DIRECTIVE 2013/59/EURATOM [1]. In some cases, with varying degrees of success. Based on the observation that large sections of the German population attach rather little importance to the risk assessment of radon [2]; the question arises as to whether a more effective contribution to protection against radon can be achieved by specifically addressing the working population (employers/employees) via occupational health and safety issues.*

*This article examines the importance of radon protection in the workplace and discusses how awareness and protective measures against radon can be improved through targeted strategies.*

**Schlüsselwörter** Arbeitsschutz, Arbeitgeber, Arbeitsplatz, Gefährdungsbeurteilung

**Keywords** occupational health and safety, employer, workplace, risk assessment

## **1. Einleitung**

Mit der Bekanntgabe des Strahlenschutzgesetzes [3] am 3. Juli 2017 wurde dem Schutz vor Radon ein eigenes Kapitel mit zwölf Paragrafen im deutschen Rechtswesen gewidmet. Insbesondere die Überschrift von Abschnitt 3, „Schutz vor Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen“, macht die allgemeine Zielrichtung deutlich. Der Schutz vor Radon ist vorrangig als Teil des Arbeitsschutzes zu betrachten. Es liegt nahe, dass sich mit dieser Thematik entsprechende Stellen in Unternehmen sowie Dienstleister im Arbeitsschutz befassen sollten.

Inwiefern der Arbeitsschutz bislang einen Beitrag zur Verbreitung von Informationen zur Radonthematik in der Bevölkerung geleistet hat oder gar einen erheblichen Beitrag im Bereich von Maßnahmen zum Schutz vor Radon leistet, ist nur schwer abzuschätzen. Es soll jedoch

versucht werden, dieses Thema im allgemeinen Arbeitsschutz verstärkt in den Vordergrund zu rücken.

## **2. Entwicklungen zur Radonthematik im Arbeitsschutz**

Grundsätzlich hat der Schutz vor Radon schon eine längere Tradition in Deutschland, als es das erste Strahlenschutzgesetztes vermuten lässt.

Einer der ersten Maßnahmen stellen sicherlich die Änderungen an den bergmännischen Arbeitsbedingungen dar, als in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts erkannt wurde, dass Radon mit für die hohe Lungenkrebsrate der Bergarbeiter beim Abbau von Uranerz verantwortlich war.

Zwar waren über die seit 1960 bestehenden Strahlenschutzverordnungen, Dosisgrenzwerte und Freigrenzen im Umgang mit radioaktiven Stoffen (und damit auch Radon) im deutschen Recht geregelt, sie hatten jedoch keinen direkten Bezug zum Schutz vor Radon an Arbeitsplätzen.

Erst die vierte Fassung der Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 [4] enthielt im Teil 3 dann die Arbeitsfelder, bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können. In Teil A wurden Arbeitsfelder mit erhöhter Radon-222-Exposition in untertägigen Bergwerken, Radon-Heilbädern und -Heilstollen sowie in Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung aufgeführt. Arbeitgeber, die für Arbeitsplätze in diesen Arbeitsfeldern verantwortlich sind, wurden verpflichtet, eine Abschätzung der Radon-Exposition oder der Körperdosis durchzuführen. Die Mehrheit der betroffenen Unternehmen musste von den Landesämtern mehrfach an diese Verpflichtung erinnert werden [5].

Mit dem Strahlenschutzgesetz wurde diese Messpflicht schließlich auf alle Arbeitgeber in Radonvorsorgegebieten ausgeweitet, die für Arbeitsplätze im Unter- und Erdgeschoss verantwortlich sind.

Damit ergaben sich für viele Unternehmen, die bislang nicht mit Strahlenschutz konfrontiert waren, neue Verpflichtungen.

Den Unternehmen wurden die Informationen zu dieser Messpflicht auf verschiedenen Wegen angeboten. Eine wichtige Rolle spielen dabei die öffentlichen Medien (Presse, Rundfunk und Internet), Kommunen, Landesämter und das Bundesamt für Strahlenschutz [6] sowie Berufsverbände, Berufsgenossenschaften und Unfallversicherer [7]. Ebenso ist es Aufgabe von regionalen und überregionalen Dienstleistern im Arbeitsschutz den Schutz vor Radon in Unternehmen zu Thematisieren.

Als Beispiel wird hier die BG prevent GmbH angeführt.

## **3. Aufbau einer neuen Dienstleistung für den Arbeitsschutz**

BG prevent ist der bundesweit größte überbetriebliche Dienstleister für Prävention in der Arbeitswelt. Das Unternehmen beschäftigt mehr als 3.700 Expert:innen für Arbeitsmedizin, Arbeitssicherheit und Gesundheitsmanagement. Es betreut über 210.000 Unternehmen, Betriebsstätten und öffentliche Einrichtungen aller Größen und Branchen mit ihren vielen Beschäftigten – bundesweit und flächendeckend an über 150 Standorten.

In der Kompetenzgruppe Strahlenschutz der BG prevent wurde sich bereits 2017 der Radonthematik angenommen. In der ersten Phase wurden fachkundige Mitarbeitende im Strahlenschutz zu Radonfachpersonen weitergebildet. Es wurden Konzepte erarbeitet und Unterlagen erstellt. Nach der Anschaffung von kalibriergeprüften Messsystemen konnten erste Kundenprojekte realisiert werden. Über Beiträge in Fachzeitschriften wie „Sicherheitsingenieur – Fachzeitschrift für betriebliches Sicherheitsmanagement und Prävention“ [8], „ARP –

Arbeitsrecht in Recht und Praxis“ und „inform – Gesundheit und Sicherheit bei der Arbeit“ wurde über die neue Rechtsgrundlage informiert.

Nachdem die Radonvorsorgegebiete in den Bundesländern bis Anfang 2021 bekannt gegeben wurden, wurden gezielt Kunden in den betroffenen Kommunen angeschrieben und ihnen wurde Unterstützung bei der Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben angeboten.

Neben der anfänglich vielfach beauftragten Unterstützung bei der Langzeitmessung mit Exposimeter wurden oftmals Begehungen mit Beratung durch die Radonfachpersonen der BG prevent in Anspruch genommen.

Nach Ablauf der gesetzlich vorgegebenen Frist für das Vorhalten der Messergebnisse der Erstmessung verlagerte sich der Schwerpunkt der Kundenanfragen hin zu beratenden Tätigkeiten. Oft wurde zusätzliche Expertise eingeholt, nachdem die Ergebnisse der Erstmessung bereits vorlagen.

Darüber hinaus wurden Informationsveranstaltungen in Form von Webinaren entwickelt, angeboten und durchgeführt.

Insgesamt bleibt die Nachfrage im Bereich des beruflichen Arbeitsschutzes bislang jedoch überschaubar. Als Ursachen sind einerseits die vermeintlich geringere Betroffenheit von der Radonproblematik (zum Beispiel kein Radonvorsorgegebiet) und andererseits die wirtschaftliche Verfassung vieler Unternehmen im Hinblick auf freiwillige Maßnahmen zu nennen. Daher werden aktuell neue Strategien entwickelt, um den Schutz vor Radon in Unternehmen zu thematisieren.

Ein wichtiger Baustein im betrieblichen Arbeitsschutz ist die Gefährdungsbeurteilung eines Arbeitsplatzes. Sie ist eine gesetzliche Pflicht für Arbeitgeber und muss für jeden Arbeitsplatz und jede Tätigkeit durchgeführt werden. Eine Verankerung der Radonthematik in der Liste möglicher Gefährdungen am Arbeitsplatz ist daher ein naheliegender Schritt. Dieser Schritt muss durch Informationsangebote zu Radon für die Ersteller der Gefährdungsbeurteilungen unterstützt werden.

#### **4. Resonanz auf die Einführung der Radonthematik im Arbeitsschutz**

Die Gründe für ein Unternehmen sich mit dem Thema Radon zu befassen sind unterschiedlich. Dazu zählen:

- Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben/Messpflicht und Vermeidung eines Ordnungswidrigkeitsverfahrens,
- vorbeugende Maßnahmen im Sinne der Prävention auf freiwilliger Basis
  - als Ausdruck der Wertschätzung der eigenen Mitarbeitenden.
  - zur Wahrung des Betriebsfriedens bei wahrgenommenen Sorgen der eigenen Mitarbeitenden,
  - zur Wiederherstellung des Betriebsfriedens bei eigenmächtig durchgeführten Messungen der Mitarbeitenden,
  - zur Außendarstellung gegenüber eigenen und potenziellen Kunden des Unternehmens.

In welchem Umfang Maßnahmen in Anspruch genommen werden, ist dabei sehr unterschiedlich. In der Regel wird zunächst eine Beratung zur Klärung des Umfangs angefordert. Liegen noch keine Messergebnisse vor, werden Messungen mit Exposimetern oder zunehmend mit elektronischen Radonmonitoren beauftragt.

Es werden allerdings auch vermehrt Anfragen von Kunden registriert, die bereits Messergebnisse mit Referenzwertüberschreitungen vorliegen haben. Auch Anfragen von Unternehmen, in denen Mitarbeitende Messungen teilweise eigenmächtig und/oder mit ungeeigneten Messmitteln durchgeführt haben, erreichen uns. Insbesondere bei Konflikten

zwischen Mitarbeitenden und Arbeitgebenden stehen Informationsveranstaltungen zur Aufklärung im Fokus des Interesses.

Inwiefern sich eine digitale Dienstleistung mittels vernetzter Radonmonitore zur betrieblichen Gesundheitsförderung durchsetzen wird, bleibt abzuwarten. Erste Kundenprojekte diesbezüglich zeigen jedoch eine durchweg positive Resonanz.

## 5. Fazit

In vielen Unternehmen ist die Radonthematik nicht präsent. Die Unwissenheit oder Untätigkeit der Arbeitgeber kann in Einzelfällen zu unterschiedlich ausgeprägten Konflikten führen. Eine Überprüfung der Relevanz von Radonschutz im Rahmen einer allgemeinen Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz ist daher ratsam. Es müssen geeignete Verfahren für den Arbeitsschutz entwickelt und in der Gefährdungsbeurteilung verankert werden. Zudem sollten Fachkräfte für Arbeitssicherheit verstärkt in dieses Thema einbezogen werden. Es bleibt zu hoffen, dass auf dem Gebiet des Arbeitsschutzes ein größerer Beitrag geleistet werden kann, um eine bessere Sensibilisierung der Bevölkerung gegenüber Radon zu erreichen.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Union: RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung. Brüssel, 2013
- [2] N. Dilkova-Gnoyke, R. Gaber, T. Jerković, M. Meyer, S. Renner, A. Wachenfeld-Schell: Erfassung des Umgangs der deutschen Bevölkerung mit Radon als Grundlage für Risikokommunikation und Stärkung des Schutzverhaltens - Vorhaben 3620S72211. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), BfS-RESFOR-203/22, 2022
- [3] Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 42: Gesetze zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung. Bonn, 2017
- [4] Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 38: Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz. Bonn, 2001
- [5] S. Körner, A. Buchanzow: Strahlenexposition durch natürliche Radioisotope aus gewerblichen Betrieben in Bayern. Augsburg: Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU), 2004
- [6] S. Feige, F. Friedrich-Kees, U. Oeh: Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen: Leitfaden zu den §§ 126 - 132 des Strahlenschutzgesetzes. Berlin: Bundesamt für Strahlenschutz UR 1, BfS-42/22, 2022
- [7] DGUV Information 203-094: Radon - Eine Handlungshilfe zu Expositionsmessungen, zur Interpretation von Messergebnissen und zu Strahlenschutzmaßnahmen. Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2021
- [8] R. Hofmann: Neues Strahlenschutzgesetz. Leinfelden-Echterdingen: Dr. Curt Haefner-Verlag GmbH, 12/2019

# **RADON-PERSONENDOSIMETRIE ZUR ÜBERWACHUNG VON BERGLEUTEN UND BERGFÜHRERN IM ERZGEBIRGE UND IM VOGTLAND**

## **RADON PERSONAL DOSIMETRY FOR MONITORING MINERS AND GUIDES IN VISITOR MINES IN THE SAXON ERZGEBIRGE AND VOGTLAND**

Dehnert Jörg<sup>1</sup>, Engelhardt Jörg<sup>2</sup>, Guhr Andreas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), <sup>2</sup>Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung (LPS), <sup>3</sup>ALTRAC Radon-Messtechnik, Deutschland

### **Zusammenfassung**

*Die amtliche Radon-Personendosimetrie hat sich ab dem Jahr 2012 in Sachsen zur Überwachung von Bergleuten und von Bergführern in Besucherbergwerken durchgesetzt. Ende 2024 wurden 207 Personen aus 16 Einrichtungen amtlich überwacht. Die Radon-Personendosimetrie wurde fester Bestandteil der Strahlenschutzkonzepte von Firmen und Besucherbergwerken. Sie hat maßgeblich zur Dosisminimierung an untertägigen Arbeitsplätzen in Sachsen beigetragen. Anfangs standen viele Firmenleitungen der Radon-Personendosimetrie skeptisch gegenüber. Heute haben sich die Vorteile der Radon-Personendosimetrie so etabliert, dass viele Firmen die Radon-Personendosimetrie freiwillig fortführen, obwohl die gesetzliche Verpflichtung dazu entfallen ist. Vereinzelt wurden durch die Radon-Personendosimetrie in untertägigen Grubenbauen unvorhersehbare Situationen mit hohen Expositionen bis hin zu Grenzwertüberschreitungen gefunden, die mit aktiven Messgeräten übersehen wurden. Die amtliche Radon-Personendosimetrie gibt es in zwei Formen mit Referenzort oder mit radondichter Box. Die Dosimetrie-Form mit radondichter Box wurde für die Anwendung unter den schwierigen Bedingungen der Altbergbausanierung entwickelt und hat sich dort und anderswo bewährt.*

*Official radon personal dosimetry has been established in Saxony for monitoring miners and guides in visitor mines since 2012. 207 people from 16 facilities were officially monitored by the end of 2024. Radon personal dosimetry has become an integral part of the radiation protection concepts of companies and visitor mines. The dosimetry has contributed significantly to dose minimization in underground workplaces in Saxony. Initially, many company managements were skeptical about radon personal dosimetry. Today, the advantages of radon personal dosimetry have become so established, that many companies continue to carry out radon personal dosimetry voluntarily, even though the legal requirement to do so has been abolished. Radon personal dosimetry has occasionally revealed unforeseeable situations in underground mines with high exposures, including limit value violations, which were missed with active measuring devices. There are two types of official radon personal dosimetry, with a reference location or with a radon-tight box. The dosimetry type with a radon-tight box was developed for use in the difficult conditions of old mine rehabilitation and has proven itself there and elsewhere.*

**Schlüsselwörter** Radon, Dosimetrie, Exposition, Bergwerk, Besucherbergwerk

**Keywords** radon, exposition, dosimetry, mine, visitor mine

## 1. Einleitung

Die amtliche Radon-Personendosimetrie hat sich ab dem Jahr 2012 in Sachsen zur Überwachung von Bergleuten und von Bergführern in Besucherbergwerken durchgesetzt. Ende 2024 wurden von der Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz-ausbildung (LPS) 207 Personen aus 16 Einrichtungen amtlich überwacht. Das waren 27 Bergleute im aktiven Bergbau, 150 Bergleute im Sanierungsbergbau, 13 Bergleute in einem Lehr- und Forschungsbergwerk, 16 Bergführer in Besucherbergwerken und ein Mitarbeiter der Strahlenschutzbehörde. Unter Tage können unerwartete und schnell wechselnde Expositionssituationen auftreten, die kurzfristige Strahlenschutzmaßnahmen wie Bewetterungen und den Bau von Wetterblenden zum Schutz vor Radon erfordern [1]. Wegen dieser dynamischen Expositionssituationen wurde die Radon-Personendosimetrie zur Überwachung von Bergleuten und Bergführern fester Bestandteil der Strahlenschutzkonzepte von Firmen und Besucherbergwerken. Sie hat maßgeblich zur Dosisminimierung an untertägigen Arbeitsplätzen in Sachsen beigetragen. Anfangs standen viele Firmenleitungen der Radon-Personendosimetrie skeptisch gegenüber. Heute haben sich die Vorteile der Radon-Personendosimetrie so etabliert, dass viele Firmen die Radon-Personendosimetrie freiwillig fortführen, obwohl die gesetzliche Verpflichtung dazu durch Unterschreitung der abgeschätzten Expositionen von 6 Millisievert im Kalenderjahr entfallen ist. Die amtliche Radon-Personendosimetrie gibt es in zwei Formen mit Referenzort oder mit radondichter Box. Die Dosimetrie-Form mit radondichter Box wurde für die Anwendung unter den schwierigen Bedingungen der Altbergbausanierung entwickelt. Die radondichte Box vereinfacht die Anwendung der Radon-Personendosimetrie und wird deshalb von der Mehrheit der Anwender bevorzugt.

## 2. Rechtliche Grundlagen der Radon-Personendosimetrie

Das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) sieht im Teil 4 „Strahlenschutz bei bestehenden Expositionssituationen“ Kapitel 2 „Schutz vor Radon“ keine Genehmigungen vor. Deshalb gibt es im Unterschied zu anderen Dosimetrieformen von einer Ausnahme abgesehen keine Strahlenschutzgenehmigungen mit behördlichen Festlegungen zur Durchführung von Radon-Personendosimetrie an Arbeitsplätzen [2]. Bei der Ausnahme handelt es sich um Strahlenschutzgenehmigungen, die bis zum Jahr 2018 in den fünf neuen Bundesländern nach der „Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz“ (VOAS) der DDR erteilt wurden [3].

Im Teil 4 Abschnitt 3 StrlSchG „Schutz vor Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen“ müssen Arbeitsplätze nach § 129 StrlSchG vom Verantwortlichen bei der zuständigen Behörde angemeldet werden, wenn entweder trotz Maßnahmen der Referenzwert für die über das Jahr gemittelte Radonaktivitätskonzentration von  $300 \text{ Bq/m}^3$  überschritten wird oder wenn wegen der Natur des Arbeitsplatzes bei Überschreitung des Referenzwertes auf Maßnahmen verzichtet wurde. Zu den Innenräumen zählen nach § 5 Abs. 17 StrlSchG auch ortsfeste Räume außerhalb von Gebäuden wie Höhlen, Bergwerke oder untertägige Kanäle und Schächte z.B. für Gasleitungen oder Telekommunikation.

In beiden Fällen muss der zur Anmeldung verpflichtete nach § 130 StrlSchG eine auf den Arbeitsplatz bezogene Expositionsabschätzung durchführen. Wenn die Abschätzung ergibt, dass eine effektive Dosis von 6 Millisievert im Kalenderjahr überschritten werden kann, sind die Anforderungen des beruflichen Strahlenschutzes nach § 131 StrlSchG zu erfüllen. Dazu zählt nach § 131 Abs. 1 Punkt 2 StrlSchG die Messung der Radonexposition. Diese muss nach

§ 157 Abs. 1 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) über eine nach § 169 Abs. 1 StrlSchG bestimmte Messstelle erfolgen [4].

Zusammenfassend bedeutet dies, dass bei einer geschätzten effektiven Dosis von mehr als 6 Millisievert im Kalenderjahr an einem Arbeitsplatz verpflichtend Radon-Personendosimetrie bei einer nach § 169 Abs. 1 StrlSchG bestimmten Messstelle durchzuführen ist.

Bei einer geschätzten Exposition von bis zu 6 Millisievert im Kalenderjahr an einem Arbeitsplatz muss der Verpflichtete nach § 130 Abs. 2 StrlSchG die Exposition durch Radon regelmäßig überprüfen. Dabei hat es sich für Firmen und Beschäftigte gleichermaßen als vorteilhaft erwiesen, die Radon-Personendosimetrie auf freiwilliger Grundlage auch unterhalb von 6 Millisievert im Kalenderjahr durchzuführen oder beizubehalten. Die effektiven Dosen sächsischer Bergleute sind in den letzten zehn Jahren gesunken. Viele Firmen haben die 6-Millisievert-Schwelle des beruflichen Strahlenschutzes unterschritten und die Radon-Personendosimetrie trotzdem beibehalten. Heute werden in Sachsen die meisten Personen auf freiwilliger Basis mit Radon-Personendosimetrie bei einer nach § 169 Abs. 1 StrlSchG bestimmten Messstelle überwacht.

Dieses Vorgehen entspricht auch der alten „Richtlinie Arbeiten“ vom 15. Dezember 2003. Dort heißt es: „In der Regel ist die Verwendung passiver Messgeräte zur Bestimmung der Radon-222-Exposition, die von den Personen während der Ausübung der Arbeiten getragen werden, das Verfahren, mit dem die Messungen vorgenommen werden sollten. Das gilt insbesondere dann, wenn Personen ihre Arbeiten an verschiedenen Arbeitsorten ausüben“ [5].

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der effektiven Dosen war die früher häufig verwendete Radon-Ortsdosimetrie mit einer Hochrechnung über die Arbeitszeit. Davon ist wegen der vielen Fehlermöglichkeiten z.B. durch die in den Grubenbauen oft stark schwankenden Radonaktivitätskonzentrationen dringend abzuraten.

### **3. Radon- Personendosimetrie mit Referenzort**

Die LPS setzt für die amtliche Radon-Personendosimetrie das Radonexposimeter Typ PD der Firma ALTRAC ein. Bei den Exposimetern handelt es sich um Diffusionskammern, in denen sich Kernspurdetektoren befinden. Das Material ist eine spezielle Kunststoffkombination mit einem Stahlfaseranteil. Die Diffusionszeit des Radons durch die Polymermatrix des Kunststoffs in den Innenraum der Dosimeter beträgt ca. neun Minuten. Dadurch wird gewährleistet, dass die Isotope Radon-219 mit einer Halbwertszeit von 3,96 s und Radon-220 mit einer Halbwertszeit von 55,6 s die Kernspurdetektoren nicht erreichen. Nur das Isotop Radon-222 dringt durch die Dosimeterwand bis zum Detektor vor und verursacht den Messeffekt. Die Kernspurdetektoren bestehen aus dem Kunststoff CR 39 (Allyl-diglycol-Polycarbonat).

Das Radonexposimeter Typ PD wird durch Radon in der Umgebungsluft kontinuierlich exponiert. Um die Exposition von Personen während ihrer Arbeitszeit bestimmen zu können, muss das Exposimeter außerhalb der Arbeitszeit zusammen mit einem Referenzexposimeter an einem Referenzort gelagert werden. Nach einem dreimonatigen Tragezeitraum werden die Expositionen vom persönlichem Exposimeter und vom Referenzexposimetern bestimmt und voneinander subtrahiert.

An den Referenzorten müssen die Radonaktivitätskonzentrationen niedrig sein. Bei hohen Radonaktivitätskonzentrationen am Referenzort entstehen bei der Subtraktion von Exposition und Referenzexposition hohe Messunsicherheiten und es kann zur Nichtauswertbarkeit der Exposimeter kommen. Aus diesem Grund muss der Referenzort folgende Anforderungen erfüllen:

Die Exposimeter müssen außerhalb der Arbeitszeit wettergeschützt und diebstahlsicher im Freien aufbewahrt werden. Die Gehäuse der Exposimeter dürfen nicht abgedeckt werden. Die Abstände zu Gebäudewänden sollten mindestens 0,2 m betragen und die Referenzorte dürfen sich nicht in unmittelbarer Nähe zu Türen, Fenstern, Heizungen und Lüftungsanlagen befinden.

#### 4. Radon-Personendosimetrie mit radondichter Box

Die Vorgaben für den Referenzort sind in der Praxis schwer einzuhalten. Hinzu kommen weitere Fehlerquellen wie eine hohe oder veränderliche Radonaktivitätskonzentration am Referenzort und besondere Schwierigkeiten bei der Organisation von Bergsicherungsarbeiten im Altbergbau. Dazu gehören Baustellenwechsel und Urlaub von Bergleuten innerhalb des dreimonatigen Tragezeitraums der Exposimeter oder die Betreuung mehrerer Baustellen durch einen Steiger oder Bauleiter. Um die Radon-Personendosimetrie für den Altbergbau anwendungsfreundlicher zu gestalten, wurde eine referenzortfreie Form der Radon-Personendosimetrie mit einer radondichten Box entwickelt, mit drei sächsischen Bergsicherungsfirmen über 18 Monate getestet und dann in Sachsen ab Januar 2017 flächendeckend angeboten [6, 7, 8].



Abb. 1: Personalisierte Radonbox der LPS für die Radon-Personendosimetrie

Bei der Radon-Personendosimetrie ohne Referenzort erhalten die Anwender von der LPS personalisierte, radondichte Boxen, in denen sich Exposimeter und Aktivkohlepatronen befinden (Abb. 1). Die Aktivkohle bindet Radon, das beim Öffnen und Schließen in die Boxen gelangt. Die Anwender legen ihre Exposimeter außerhalb der Arbeitszeiten in die Boxen. Referenzorte und Referenzexposimeter entfallen. Die radondichten Boxen dürfen an unterschiedlichen Orten gelagert und von den Bergleuten auch von einer Baustelle zur anderen transportiert werden. Die Anwender müssen darauf achten, dass die Boxen Tag und Nacht geschlossen sind und nur zur Entnahme und zum Hineinlegen der Exposimeter kurzzeitig geöffnet werden. Zum Quartalswechsel werden von der LPS die radondichten Boxen mit den Exposimetern ausgetauscht. Die Aktivkohle aus den zurückgesandten Boxen wird bei der LPS ausgeheizt und dann wiederverwendet. Auf diese Weise haben alle von der LPS ausgegebenen Boxen eine hohe Adsorptionsfähigkeit für Radon.

Die radondichte Box führt zu genaueren Ergebnissen, weil sie den systembedingten Fehler der Radon-Personendosimetrie mit Referenzort vermeidet, wo pro Quartal die Differenz der Expositionen von persönlichem Exposimeter und Referenzexposimeter gebildet werden muss. Gleichzeitig ist die radondichte Box sehr anwenderfreundlich. Die radondichte Box wird

deshalb von den meisten Anwendern bevorzugt. In Sachsen haben sich zwölf Einrichtungen mit 172 überwachten Personen für die Radonbox entschieden. Vier Einrichtungen mit 35 Personen nutzen die Radon-Personendosimetrie mit Referenzort.

## 5. Beispiel aus der Praxis der Radon-Personendosimetrie

Die Überwachung von Bergleuten und Bergführern mit amtlicher Radon-Personendosimetrie erfolgt mit dem Ziel, quartalsweise effektive Dosen zu bestimmen und die Einhaltung des Grenzwertes von 20 Millisievert im Kalenderjahr nach § 78 Abs. 1 StrlSchG sicher zu stellen.

Der operative Strahlenschutz unter Tage und die Festlegung von Strahlenschutzmaßnahmen erfolgen üblicherweise mit Hilfe von aktiven Radonmonitoren, die die Radonaktivitätskonzentrationen ohne Zeitverzug anzeigen. Trotzdem hat es in der Vergangenheit erstaunliche Situationen gegeben, wo hohe Expositionen bis hin zu Grenzwertüberschreitungen durch Radon-Personendosimetrie gefunden wurden, die vorher mit aktiven Messgeräten übersehen wurden. Ursache hierfür sind die häufig unter Tage stark schwankenden Radonaktivitätskonzentrationen, bei denen mit punktuellen Messungen die wahren Expositionen im Tagesverlauf nicht immer erkannt werden. Das soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

Im Besucherbergwerk Markus-Röhling-Stolln im Ortsteil Frohnau von Annaberg-Buchholz wurden im III. Quartal 2021 vom 1. Juli bis 30. September bei den fünf Bergführern ungewöhnlich hohe effektive Dosen bis 10,2 mSv gemessen. Die kumulierten effektiven Dosen über die ersten drei Quartale 2021 erreichten 12,1 mSv. Aus diesem Grund hatte die LPS eine Schwellwertüberschreitung an die Strahlenschutzbehörde gemeldet. Eine Überprüfung im Besucherbergwerk ergab, dass die Bergsicherung Schneeberg GmbH & Co. KG Arbeiten zur Herstellung eines neuen Besucherrundgangs ausführte. Insbesondere gab es



*Abb. 2: Besucherstrecke im Besucherbergwerk Markus-Röhling-Stolln (links) und reparierte Wettertür in einem Stolln außerhalb der Besucherstrecke (rechts)*

eine 33 m lange Neuauffahrung mit Durchbruch zum Christian Flachen. Dabei wurde versehentlich eine Wettertür im Wetterdamm auf dem Wilhelmine Morgengang an der 3. Radkammer aufgesprengt. Diese Wettertür befand sich in einem Nebenstolln außerhalb des Besucherrundgangs, so dass der Schaden in dem weitläufigen Besucherbergwerk nicht auffiel. Nach den hohen, gemessenen Expositionen der Bergführer wurde die Expositionsquelle gesucht, die zerstörte Wettertür gefunden und eine neue Wettertür eingesetzt (Abb. 2).

## 6. Ergebnisse

Die amtliche Radon-Personendosimetrie dient der Überwachung von Personen und der Einhaltung des Grenzwertes von 20 Millisievert im Kalenderjahr. Mehrfach wurden mit Radon-Personendosimetrie Expositionsquellen entdeckt, die mit Radonmonitoren übersehen wurden. Die Mehrheit der Anwender in Sachsen verwendet die nutzerfreundliche Radonbox.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Dehnert, J. (2020): Radon Exposures of Miners at Small Underground Construction Sites in Old Mining: Recommendations to Improve Radiation Protection Measures by the Saxon Radiation Protection Authority.- Health Phys. 118 (1): 96-105. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001117>
- [2] Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist
- [3] Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz vom 11. Oktober 1984 (VOAS) (GBl. DDR 1984 I S. 341).
- [4] Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist"
- [5] Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung (Richtlinie Arbeiten) vom 15. Dezember 2003, Die Bundesregierung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, [www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de](http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de)
- [6] Dehnert, J., Guhr, A., Engelhardt, J. (2017): Optimierung der Personendosimetrie an radonexponierten Arbeitsplätzen.- In: Tzschentke, C., Vahlbruch, J.-W. (Hg): Das neue Strahlenschutzrecht, Expositionssituationen und Entsorgung.- Fachverband für Strahlenschutz e.V., 301 S., 9.-12. Oktober 2017, Hannover: 184-188
- [7] Dehnert, J., Engelhardt, J., Guhr, A. (2019): Amtliche Radon-Personendosimetrie für Bergleute, Bergführer und Vereinsmitglieder im Altbergbau.- In: Mayer, G., Benndorf, J., Löbel, K.-H., Butscher, C., Tondera, D., Busch, W. (Hg): 19. Altbergbau-Kolloquium.- Montanuniversität Leoben, ISBN 978-3-938390-24-5, 261 S., 7.-9. November 2019, Leoben: 220-226.
- [8] Dehnert, J., Guhr, A., Engelhardt, J. (2020): Improvement of a Radon Dosimetry System for Miners by Replacing Reference Dosimeters with Radonproof Boxes Containing Activated Carbon Cartridges.- Health Phys. 118 (2): 117-128. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001163>

# MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN VON RADON 222-KURZZEITMESSUNGEN ZUR ABSCHÄTZUNG DES JAHRESMITTELWERTS

## POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF SHORT-TERM RADON 222 MEASUREMENTS FOR ESTIMATING THE ANNUAL AVERAGE VALUE

Maringer Franz Josef<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Universität für Bodenkultur Wien, Österreich, <sup>2</sup>Technische Universität Wien, Atominstitut, Österreich, <sup>3</sup>Österreichischer Verband für Strahlenschutz, Wien, Österreich

### **Zusammenfassung**

*In diesem Beitrag werden neu entwickelte Radonkurzzeitmessverfahren zur Abschätzung des Jahresmittelwerts im Überblick präsentiert und die Grenzen der Anwendung diskutiert. Dabei wird insbesondere auf eine kürzlich neu entwickelte Methode eingegangen. Mit diesem Verfahren konnte der Radon-222-Jahresmittelwert in 24 untersuchten Gebäuden in vier österreichischen Bundesländern (Niederösterreich, Oberösterreich, Tirol und Wien) mittels dreiwöchiger Rn-222-Messungen mit maximalen relativen Abweichungen von  $\pm 30\%$  (Vertrauensniveau 80 %) abgeschätzt werden. Im Zuge eines derzeit laufenden Forschungsvorhabens (2024 – 2027) wird diese neue Methode durch weitere Untersuchungen in Gebäuden in Österreich, Deutschland und Ungarn getestet, validiert und weiterentwickelt.*

*This article provides an overview of newly developed short-term radon measurement methods for estimating the annual average radon concentration and discusses the limitations of their application. Particular attention is paid to a recently developed method. Using this method, the annual average radon 222 concentration in 24 buildings in four Austrian provinces (Lower Austria, Upper Austria, Tyrol and Vienna) was estimated by means of three-week Rn-222 measurements with maximum deviations of  $\pm 30\%$  (confidence level 80 %). As part of an ongoing research project (2024 to 2027), this new method is being tested, validated and further developed through investigations in buildings in Austria, Germany and Hungary.*

**Schlüsselwörter:** Radon 222, Kurzzeitmessverfahren, Jahresmittelwert

## **1. Einleitung**

In einer Reihe von internationalen Studien wurde nachgewiesen, dass die Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen *IRC* (Indoor Radon Concentration) generell jahreszeitlich-saisonalen Variationen unterliegt. Es wurde gezeigt, dass häufig höhere *IRC* im Winter und niedrigere in den Sommermonaten gemessen werden [1], [2]. Eine Ursache hierfür ist die Wirkung des Kamineffekts innerhalb des Gebäudes im Winter infolge der Gebäudebeheizung im Zusammenwirken mit niedrigen Außentemperaturen. Die Temperaturunterschiede führen zu einem Druckgradienten, wodurch das Radongas verstärkt aus dem Boden in die Innenräume einströmt. Im Gegensatz dazu führt die generell höhere Außentemperatur im Sommer dazu, dass in Innenräumen der Druck größer ist als außerhalb und somit das Edelgas generell in geringerem Maß eindringen kann. Ein weiterer Grund für eine niedrigere *IRC* in den Sommermonaten ist das Lüftungsverhalten der Bewohner:innen. Aufgrund der höheren Temperaturen im Sommerhalbjahr wird im Normalfall häufiger gelüftet,

wodurch das Innenraum-Radon mit der nahezu Radon-freien Frischluft von außen verdünnt wird [3].

Die rechtlich verbindliche Erhebung der mittleren jährlichen *IRC* in Österreich erfordert im Allgemeinen eine Langzeitmessung über mindestens sechs Monate, wodurch etwaige saisonale und tageszeitliche Variationen ausgeglichen werden können [4]. Da in der Heizsaison mit höheren *IRC*-Werten zu rechnen ist, muss mindestens die Hälfte des Messzeitraums zwischen 15. Oktober und 15. April liegen [5].

## 2. Einflussfaktoren auf Radonmesswerte in Innenräumen

Die Autor:innen einer aktuellen israelischen Arbeit [6] zeigen, dass bei Messperioden bis zu 6 Monaten die zeitlichen Variationen (verursacht durch die verschiedenen Einflussfaktoren) – im Gegensatz zu den Unsicherheiten der Kalibrierung und des Leewertes der Messgeräte – am stärksten zur Variabilität der jährlichen durchschnittlichen Radonkonzentration beitragen.

Ziel einer finnischen Studie aus jüngster Zeit [7] war es, zu ermitteln, ob Kurzzeitmessungen von 2–5 Tagen (ohne Berücksichtigung von Einflussfaktoren) zuverlässig verwendet werden können, um die Exposition der Bewohner abzuschätzen. Bei einer maximal akzeptablen Falsch-Negativ-Rate von 1 % liegt der Aktionswert zur Sicherstellung der Unterschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m<sup>3</sup> für eine 2–5-tägige Messung bei 90–100 Bq/m<sup>3</sup>.

Im Zuge eines, in den Jahren 2022 bis 2024 durchgeführten Forschungsprojekts an der TU Wien<sup>1</sup>, wurden in 24 Gebäuden in vier österreichischen Bundesländern Abhängigkeiten von Radonmesswerten von miterhobenen Einflussfaktoren untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in den untersuchten Innenräumen signifikante Korrelationen mit der Außentemperatur, der Temperaturdifferenz innen-außen, der Luftfeuchte außen und innen, der Windgeschwindigkeit und der Luftdruckdifferenz innen-außen aufweisen. Von den Gebäudedaten zeigten die Faktoren Hanglage, erdberührter Innenraum und das Lüftungsverhalten gering signifikante Korrelationen zur Radon-222-Aktivitätskonzentration.

## 3. Abschätzung des Rn-222-Jahresmittelwertes aus Kurzzeitmessungen

Auf Basis dieser Ergebnisse der Untersuchungen in den 24 Gebäuden wurden funktionale Zusammenhänge der relevanten Einflussparameter gesucht. Dabei wurden zehn Funktionen mit zehn Einflussparametern identifiziert, welche eine signifikante Reduktion der Abweichungen der **Rn-222-Kurzzeit-Messwerte *SIRC*** von den **Langzeitmesswerten *LIRC*** ermöglichen [8]. Mittels Regressionsanalyse – Anpassung der Kurzzeitmessdaten an die Langzeitmessdaten unter Berücksichtigung der identifizierten Einflussparameter mit der Methode der kleinsten Quadrate / least-square-fit – wurde ein multiplikatives Modell Glg. (1) zur Berechnung des **Schätzwerts des Jahresmittelwertes der Radon-222-Aktivitätskonzentration *EIRC*** aus dem Kurzzeit-Messwert *SIRC* erstellt:

$$EIRC = SIRC \cdot \prod_i p_i = SIRC \cdot p_{TDJ} \cdot p_{TTX} \cdot p_{MON} \cdot p_{FFX} \cdot p_{VVX} \cdot p_{TIA} \cdot p_{s(cRn)} \cdot p_{PPX} \cdot p_{TIA} \cdot p_{sym} \quad (1)$$

Damit konnten die Einflüsse von Umgebungsfaktoren auf die Kurzzeitmessungen deutlich reduziert und die Abweichungen der Ergebnisse der Kurzzeitmessungen von jenen der Langzeitmessung wesentlich verringert werden [9].

In den Abb. 1 bis 5 sind Beispiele für die gefundenen Zusammenhänge zwischen den geschätzten Langzeitmittelwerten *EIRC* und den Messwerten der Kurzzeitmessungen *SIRC* unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren grafisch dargestellt. Es ist zu beachten, dass diese

---

<sup>1</sup> Gefördert vom Umweltministerium, Projekt BMK 2023-0.312.455 [8]

funktionalen Beziehungen auf *EIRC*-Werte von 300 Bq/m<sup>3</sup> bezogen sind. Der Wert von 300 Bq/m<sup>3</sup> wurde gewählt, da dies der Referenzwert für Radon-reduzierende Maßnahmen in Innenräumen gemäß der österreichischen Radonschutz-Verordnung ist.

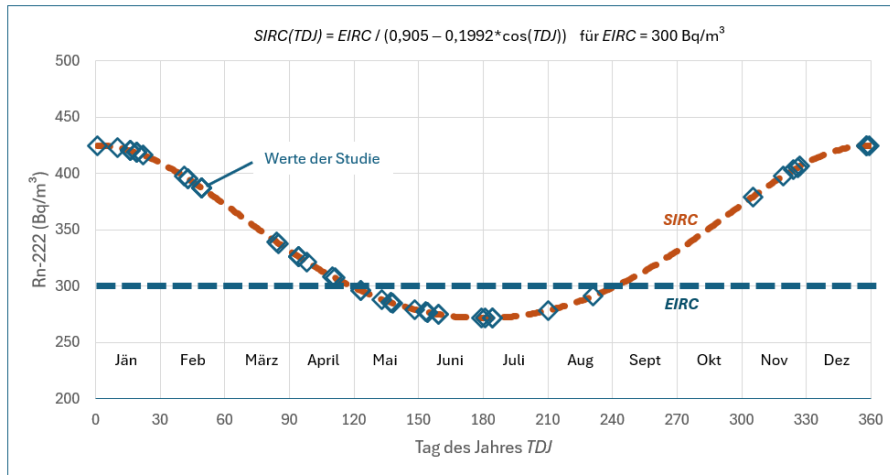


Abbildung 1: Abhängigkeit der SIRC vom Tag des Jahres TDJ

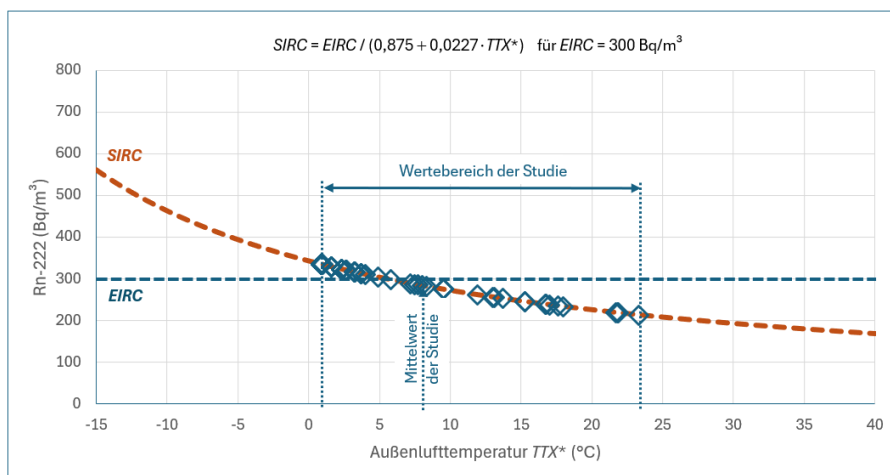


Abbildung 2: Abhängigkeit der SIRC von der Außentemperatur TTX\* (°C)

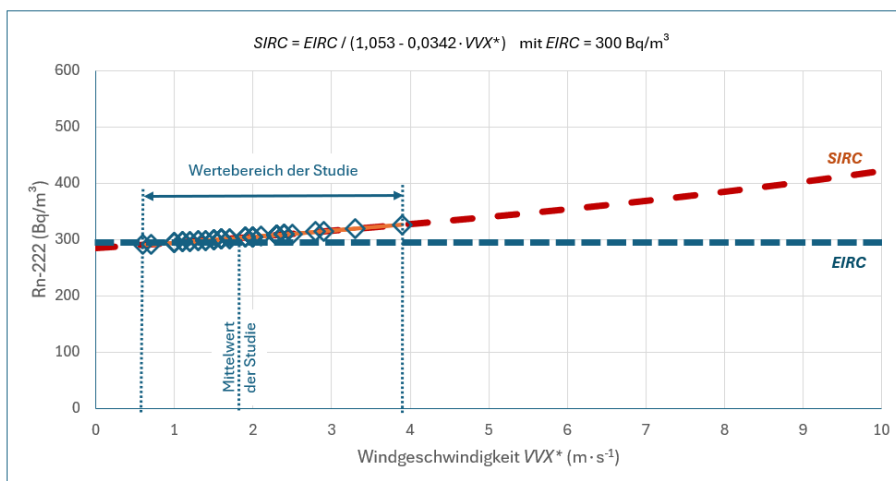


Abbildung 3: Abhängigkeit der SIRC von der Windgeschwindigkeit VVX\* (m/s)

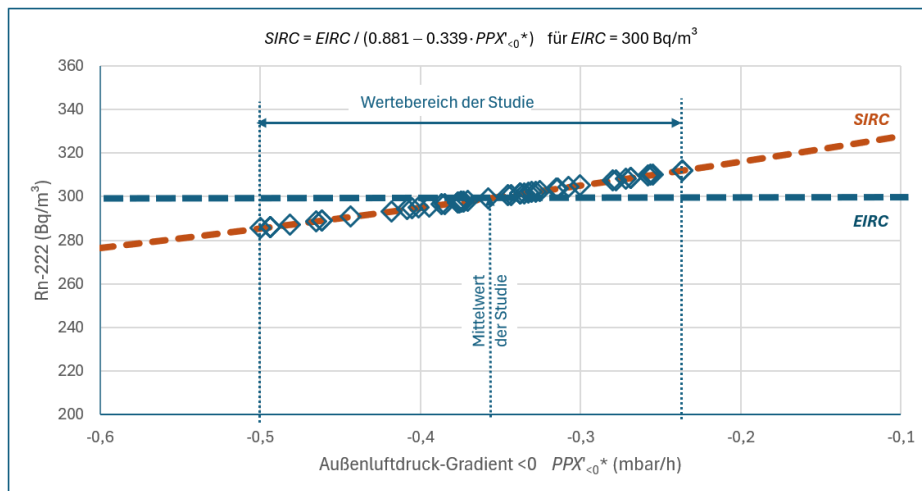


Abbildung 4: Abhängigkeit der SIRC vom zeitlichen Gradienten des Außenluftdrucks  $PPX'_{<0}^*$  (mbar/h, nur  $PPX'$ -Werte  $<0$  berücksichtigt)

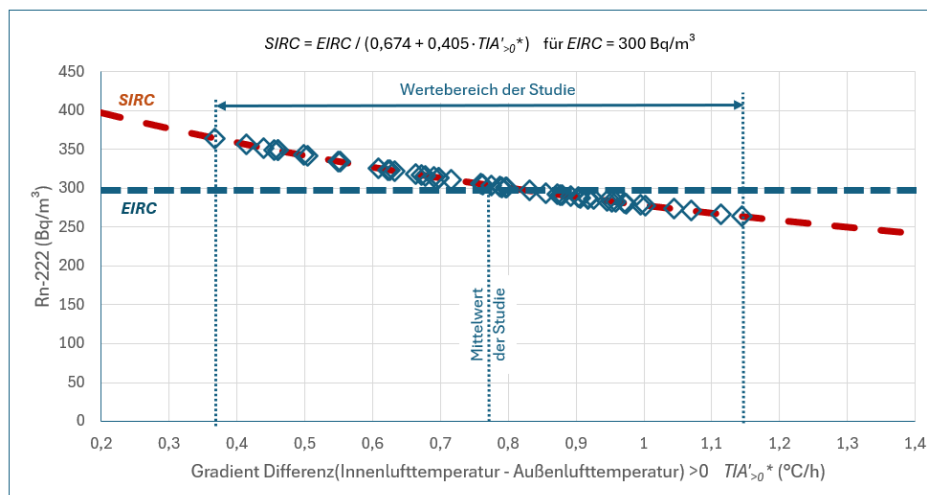


Abbildung 5: Abhängigkeit der SIRC vom zeitlichen Gradienten der Temperaturdifferenz (innen – außen)  $TIA'_{>0}^*$  ( $^{\circ}C/h$ , nur  $TIA'$ -Werte  $>0$  berücksichtigt)

Die hier dargestellten Zusammenhänge wirken gemäß Glg. (1) multiplikativ d.h., die Einflüsse der einzelnen Einflussfaktoren überlagern multiplikativ. Bei der Interpretation einzelner Zusammenhänge ist daher Vorsicht geboten. Jedenfalls war die Anwendung der Produktformel Glg. (1) auf die durchgeführten 50 Kurzzeitmessungen in den 24 Gebäuden zielführend für eine signifikante Reduktion der Abweichungen aller geschätzten Langzeitmittelwerte  $EIRC$  von den jeweils tatsächlich messtechnisch ermittelten Langzeitmittelwerten  $LIRC$ .

In Abb. 6 sind die Ergebnisse der Regressionsanalysen durch Anpassung der Kurzzeitmessdaten  $SIRC$  an die Langzeitmessdaten  $LIRC$  (Methode der kleinsten Quadrate) unter Einbeziehung der identifizierten Einflussparameter der 50 Kurzzeit- und 24 Langzeitmessungen von Rn-222 in den 24 untersuchten Räumen im Zeitraum von Oktober 2022 bis Juli 2023 dargestellt.

In jedem der 24 Räume wurden eine Langzeitmessung und mindestens je eine Kurzzeitmessung in der Wintersaison und Sommersaison durchgeführt, wobei in zwei Räumen zusätzlich je eine

Dreiwochen-Kurzzeitmessung im Frühjahr durchgeführt wurde. Abb. 6 zeigt, dass die Anwendung des physikalisch-statistischen Modells auf der Grundlage der Spearman-Korrelationsanalyse und weiterer physikalischer Überlegungen, die Schätzwerte *EIRC* der Jahresmittelwerte *LIRC* im Vergleich zu den Kurzzeitmesswerten *SIRC* deutlich verbessert hat. Während die Verhältnisse von 32 (62 %) von 50 Kurzzeitmessungen um mehr als  $\pm 0,3$  vom optimalen Wert 1,0 abweichen, liegen nur 10 (20 %) von 50 *EIRC*-Werten außerhalb des Intervalls von  $\pm 0,3$ .

Weiters zeigt Abb. 6, dass für die 24 untersuchten Räume alle *EIRC/LIRC*-Verhältnisse der 50 Kurzzeitmessungen innerhalb des Intervalls 0,4 bis 1,6 liegen, während die *SIRC/LIRC*-Werte im größeren Intervall 0,2 bis 2,8 liegen. 11 (46 %) von 24 Radon-Langzeitmittelwerten *LIRC* sind größer als  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wurde ein (vorläufiger) Leitfaden zusammengestellt, der es ermöglicht, Innenraum-Jahresmittelwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration aus dreiwöchigen Radon-222-Kurzzeitmessungen abzuschätzen. [8] Weitere detaillierte Ergebnisse der Untersuchungen und Auswertungen sind in Fachpublikationen dokumentiert und veröffentlicht. [10], [11], [12]

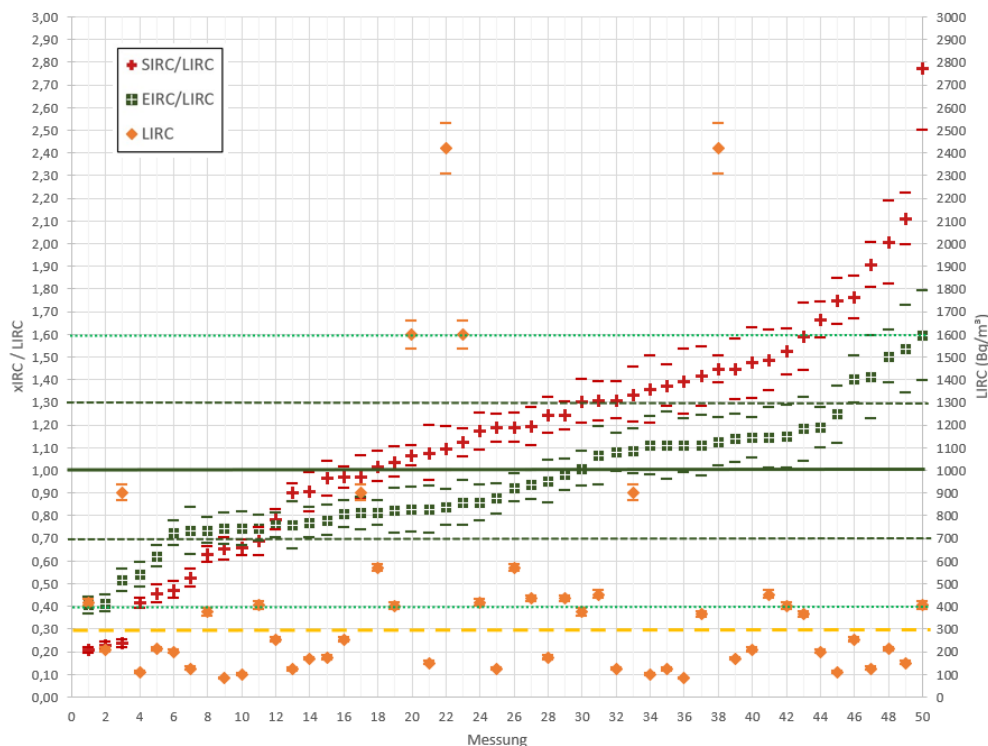


Abb. 6: Verhältnisse (mit Unsicherheitsbalken) *SIRC/LIRC* (rot) und *EIRC/LIRC* (grün) – in aufsteigender Reihenfolge sortiert, sowie die *LIRC*-Werte ( $\text{Bq/m}^3$ ) der Langzeitmessungen (orange, mit Unsicherheitsbalken).

#### 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, aus dreiwöchigen Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration (Stunden(mittel)werte) mit aktiven Radonmessgeräten unter funktionaler Berücksichtigung wesentlicher Einflussparameter, den Radon-222-Jahresmittelwert eines Innenraums abzuschätzen. Das, in einem Leitfaden dokumentierte Verfahren, wurde anhand der Messungen in 24 Innenräumen in

vier österreichischen Bundesländern entwickelt und erfolgreich getestet. Mit der entwickelten Methode können die wesentlichen Einflüsse auf die Kurzzeitmessungen ‚herausgerechnet‘ und die Abweichungen der Ergebnisse der Kurzzeitmessungen, von den Ergebnissen der Langzeitmessung signifikant verringert werden.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] H. Friedmann u. a., „Das österreichische nationale Radonprojekt – ÖNRAP Projekt-Endbericht (in German)“, 2007, doi: 10.13140/RG.2.2.34760.01285.
- [2] J. C. H. Miles, C. B. Howarth, und N. Hunter, „Seasonal variation of radon concentrations in UK homes“, *J. Radiol. Prot.*, Bd. 32, Nr. 3, S. 275–287, Sep. 2012, doi: 10.1088/0952-4746/32/3/275.
- [3] J. F. Rey, S. Goyette, M. Gandolla, M. Palacios, F. Barazza, und J. Goyette Pernot, „Long-Term Impacts of Weather Conditions on Indoor Radon Concentration Measurements in Switzerland“, *Atmosphere*, Bd. 13, Nr. 1, S. 92, Jan. 2022, doi: 10.3390/atmos13010092.
- [4] „Wie messe ich Radon?“, Fachstelle für Radon. <https://www.radon.gv.at/zielgruppen/privatpersonen/wie-messe-ich-radon> (zugegriffen 6. Juni 2023).
- [5] „AGES - Strahlenschutz Serviceleistungen“, AGES. <https://www.ages.at/umwelt/radioaktivitaet/strahlenschutz-serviceleistungen> (zugegriffen 6. Juni 2023).
- [6] Tsapalov, A.; Kovler, K.; Bossew, P., Strategy and Metrological Support for Indoor Radon Measurements Using Popular Low-Cost Active Monitors with High and Low Sensitivity. *Sensors* 2024, 24, 4764. <https://doi.org/10.3390/s24154764>
- [7] Turtiainen, T.; Kojo, K.; Kurttio, P., Short-Term Temporal Variability of Radon in Finnish Dwellings and the Use of Temporal Correction Factors. *Atmosphere* 2025, 16, 489. <https://doi.org/10.3390/atmos16050489>
- [8] F.J. Maringer, Leitfaden – Abschätzung des Radon-222-Jahresmittelwerts in Innenräumen aus Kurzzeitmessungen, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2024 ([https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:5e295623-4fb0-41a9-8bf8-05d0ddefc2c5/Leitfaden\\_BMK\\_UA.pdf](https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:5e295623-4fb0-41a9-8bf8-05d0ddefc2c5/Leitfaden_BMK_UA.pdf))
- [9] Maringer, F.J.; Blum, M. Application of Short-Term Measurements to Estimate the Annual Mean Indoor Air Radon-222 Activity Concentration. *Atmosphere* **2025**, 16, 215. <https://doi.org/10.3390/atmos16020215>
- [10] Blum, M. Neue Kurzzeitmessmethoden für die Ermittlung der Radonsituation in Innenräumen. *Strahlenschutz aktuell* 59(1), S. 9-15, 2025
- [11] Maringer, F.J., Eine neue Methode zur Abschätzung der Radonsituation in Innenräumen. *Strahlenschutz aktuell* 59(1), S. 16-26, 2025
- [12] Maringer, F.J., Blum, M. Eine neue Methode zur Abschätzung der mittleren, langzeitlichen Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen. *Strahlenschutzpraxis* 31. Jahrgang 2025, Heft 3, Fachverband für Strahlenschutz e.V., TÜV Media GmbH, Köln, 2025
- [13] Maringer, F.J., Radon-222-Kurzzeit-Messungen zur Abschätzung des Jahres-Mittelwertes, <https://www.researchgate.net/publication>, (re- print) DOI:10.13140/RG.2.2.26691.92966, August 2025



## **Session 8**

### **Radon**



# **RADON IN HESSEN – GEMESSEN, NICHT GESCHÄTZT**

## **RADON IN HESSE – MEASURED, NOT ESTIMATED**

Kraft-Bermuth Saskia, Bauer Melanie, Grimm Volker, Kalmbach Paul, Kerker Steffen, Kwasseu Alisson, Moubeya Charlotte, Zapata Krystof

*Technische Hochschule Mittelhessen und Hessisches Radonzentrum, Deutschland*

### **Zusammenfassung**

*Im Auftrag des in Hessen zuständigen Ministeriums (HMLU) hat die Technische Hochschule Mittelhessen in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Radonzentrum mehrere Messkampagnen durchgeführt, um die Radonsituation in Hessen möglichst detailliert zu erfassen. In allen hessischen Landkreisen wurden zunächst Messungen der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft durchgeführt und mögliche Korrelationen zu Geologie und Bodenbeschaffenheit untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Bodenbeschaffenheit einen Einfluss auf die Radonaktivitätskonzentration ausübt. Anschließend wurde unter Beteiligung der Bevölkerung in 3000 Haushalten über 12 Monate die Radonaktivitätskonzentration in repräsentativen Innenräumen (Keller, Wohn- und Schlafbereich) erfasst. In einem Fragebogen wurden die beteiligten Haushalte außerdem gebeten, Angaben über ihr Vorwissen zum Thema Radon und ihre Risikoeinschätzung zu machen. Die Ergebnisse geben einen ersten Aufschluss über den Erfolg der Radonstrategie des Landes Hessen, in der die Information der Bevölkerung eine zentrale Rolle spielt. In einer weiteren Messkampagne wurden Arbeitsplätze untersucht, für die außerhalb von Radonvorsorgegebieten keine Messpflicht besteht, und Arbeitsplätze, die in Anlage 8 des Strahlenschutzgesetzes aufgelistet sind. Nach Messung der Radonaktivitätskonzentration vor Ort wurde eine Expositionsabschätzung durchgeführt. Außerdem wurde die Personenexposition der Beschäftigten ermittelt. Basierend auf diesen Daten wurden die verschiedenen Methoden zur Bewertung der Radonsituation an Arbeitsplätzen verglichen.*

### **Abstract**

*On behalf of the ministry responsible in Hesse (HMLU), the TH Mittelhessen University of Applied Sciences in cooperation with the Radon Center Hesse conducted several measurement campaigns to assess the radon situation in Hesse as comprehensively as possible. Initially, measurements of the radon activity concentration in soil air were conducted across all Hessian districts, and potential correlations with geology and soil composition were examined. It became evident that the soil composition has an impact on the activity concentration. Subsequently, with the involvement of the public, the radon activity concentration was investigated in 3,000 households over 12 months in representative indoor spaces (cellars, living rooms, and bedrooms). Furthermore, in a questionnaire, the participating households were asked to provide information about their prior knowledge about radon and their risk assessment. The results provide initial insights into the success of the radon strategy of the state of Hesse, in which informing the public plays a pivotal role. In another measurement campaign, workplaces were investigated for which there is no obligation to measure outside of radon precautionary areas, and workplaces listed in Annex 8 of the Radiation Protection Act. After measuring the radon activity concentration on site, an exposure assessment was performed. Additionally, the personal exposure of the employees was determined. Based on these data, the various methods for evaluating the radon situation at workplaces were compared.*

**Schlüsselwörter:** Radon, Bodenluftmessungen, Innenraummessungen, Dosimetrie

**Keywords:** Radon, soil air measurements, indoor measurements, dosimetry

## 1. Einleitung

Nach § 121 des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) und § 153 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) sind die Bundesländer verpflichtet, Gebiete als sogenannte *Radonvorsorgegebiete* auszuweisen, wenn in diesen Gebieten *auf mindestens 75 Prozent des jeweils auszuweisenden Gebiets der Referenzwert in mindestens zehn Prozent der Anzahl der Gebäude überschritten wird* [1,(2)]. Der zurzeit in Deutschland gültige Referenzwert für die Radon-222-Aktivitätskonzentration beträgt  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Das Gesetz nimmt hierbei Bezug auf einen über das Jahr gemittelten Wert. Die Ausweisung liegt in der Hoheit der Bundesländer, die dafür auch geeignete Daten erheben sollen. Vor diesem Hintergrund hat das Land Hessen, vertreten durch das für die Ausweisung zuständige Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU), die Technische Hochschule Mittelhessen (THM) und das Hessische Radonzentrum (HeRaZ) mit der Durchführung mehrerer Messkampagnen betraut, um die Radonsituation in den hessischen Landkreisen und kreisfreien Städten zu erfassen. In einem ersten Schritt wurde die Aktivitätskonzentration von Radon in der Bodenluft untersucht. Im zweiten Schritt wurde eine hessenweite Messkampagne zur Ermittlung der Innenraumkonzentration in Wohngebäuden durchgeführt. In einer weiteren Messkampagne wurden Arbeitsplätze untersucht, an denen eine erhöhte Radonaktivitätskonzentration mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auftreten kann, zum Beispiel Wasserwerke oder Arbeitsplätze untertage, und solche, bei denen eine erhöhte Radonaktivitätskonzentration unwahrscheinlich ist. Im Rahmen der Messungen wurde die Auswertung von Personenexposimetern mit zeitaufgelösten Messungen der Radonaktivitätskonzentration am Arbeitsplatz verglichen, um zu ermitteln, ob beide Messverfahren für eine belastbare Dosisabschätzung herangezogen werden können.

## 2. Radon in der Bodenluft

Radon-222 entsteht als Produkt von Radium-226 in der Zerfallskette von Uran-238, das sich in Deutschland überall im Untergrund befindet, jedoch je nach geologischen Gegebenheiten unterschiedlich verteilt ist. Deshalb ist die Geologie der erste Faktor, der die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft beeinflusst. Hessen mit seiner Lage in der geografischen Mitte Deutschlands zeichnet sich durch eine Vielzahl an verschiedenen geologischen Strukturräumen aus. In jedem hessischen Landkreis befinden sich mehrere verschiedene Strukturräume [2]. Um sowohl die Landkreise und kreisfreien Städte als Verwaltungseinheiten als auch die geologischen Strukturräume repräsentativ abzudecken, wurden vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) 750 Messorte ausgewiesen, an denen die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft bestimmt wurde. Dabei wurde versucht, die verschiedenen Strukturräume gemäß ihrer Flächenanteile abzudecken, soweit nicht messtechnische Randbedingungen (Bodenfeuchte, Grabbarkeit, Bodenauflage) dagegensprachen. Details der Planung und Durchführung der Messkampagne finden sich in [3].

Für den Austritt des Radons aus dem Boden spielt neben der Geologie die Permeabilität  $K$  des Bodens für Gase eine entscheidende Rolle.

Diese Größe geht, zusammen mit der Radonaktivitätskonzentration  $c_{\text{Rn}}$ , in das geogene Radonpotential  $\text{RP}$  ein, das definiert ist als [4]:

$$RP = \frac{c_{Rn}}{-\log(K)-10} \quad (1)$$

Deshalb wurde in der Messkampagne neben der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft auch die Permeabilität des Bodens bestimmt und daraus das geogene Radonpotential errechnet. Zusätzlich wurden weitere Daten wie Luftdruck und Umgebungstemperatur erfasst. Abbildung 1 zeigt die Mediane der Messungen des geogenen Radonpotentials in den jeweiligen geologischen Strukturräumen<sup>1)</sup> [5]. Die Zahl in der Klammer gibt die Anzahl der Messungen an, von denen der Median gebildet wurde. *Buntsandstein (BSS)* sowie *Quartäre Sedimente (QS)* und *Rotliegend (RO)* weisen etwas geringere Median-Werte auf. Die Kategorien *Kristallin (KR)* und *Mesozoikum und Zechstein (MZ)* weisen höhere Median-Werte auf. Im Rahmen der Standardabweichungen, die sich aus der teilweise erheblichen Streuung der Messwerte innerhalb eines Strukturraums ergeben, stimmen jedoch alle Werte überein. Die Asymmetrie der Standardabweichungen zeigt überdies, dass die Verteilungen eine Schiefe zu höheren Radonpotentialen haben.

Da die Messungen der Radonaktivitätskonzentration und der Gaspermeabilität in einer Tiefe von 1 m durchgeführt werden, lag es nahe, den Einfluss des Bodens auf das Radonpotential zu untersuchen. Das HLNUG stellte dazu Informationen aus den Bodenflächendaten für Hessen (BFD50) [6] über die Hauptgruppen, Gruppen und Untergruppen zu den einzelnen Messorten zur Verfügung. Die vier untersuchten Hauptgruppen unterscheiden Böden aus fluvialen (A), kolluvialen (C), äolischen (D) und solifluidalen (E) Sedimenten. In den Gruppen und Untergruppen ist die Herkunft der Sedimente, zum Beispiel Flugsand oder Lösslehm, beschrieben. Abbildung 2 zeigt das geogene Radonpotential in Abhängigkeit von der Bodengruppe. Zusätzlich ist der vorherrschende geologische Strukturraum angegeben. Die als *gemischt* gekennzeichneten Gruppen können keinem vorherrschenden Strukturraum zugeordnet werden. Man erkennt, dass die Bodengruppe

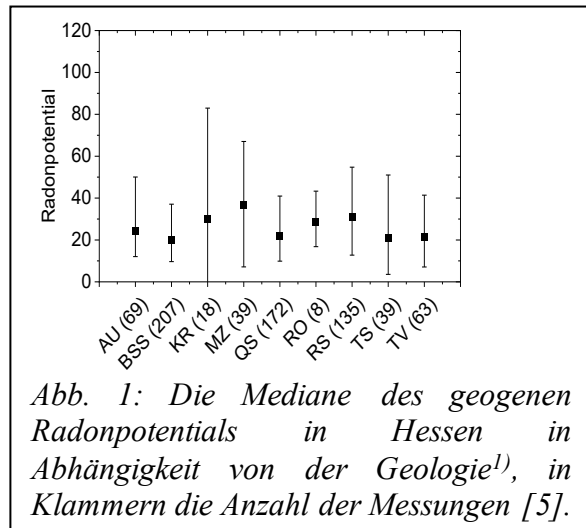


Abb. 1: Die Mediane des geogenen Radonpotentials in Hessen in Abhängigkeit von der Geologie<sup>1)</sup>, in Klammern die Anzahl der Messungen [5].

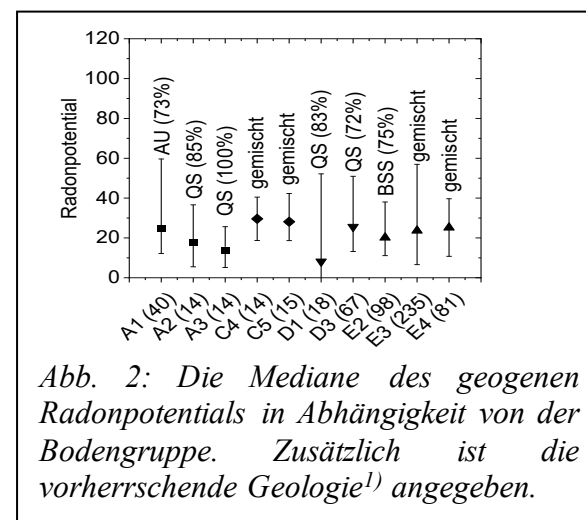


Abb. 2: Die Mediane des geogenen Radonpotentials in Abhängigkeit von der Bodengruppe. Zusätzlich ist die vorherrschende Geologie<sup>1)</sup> angegeben.

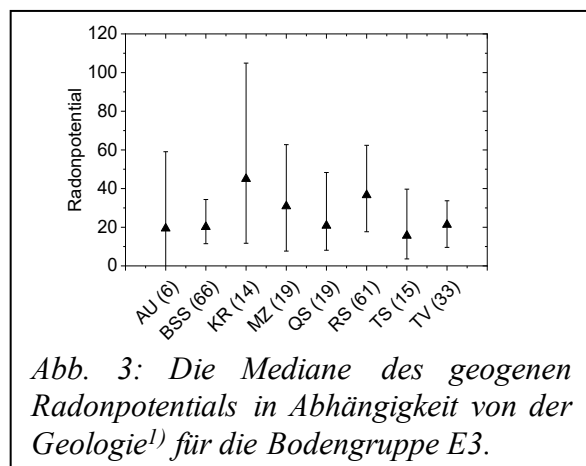


Abb. 3: Die Mediane des geogenen Radonpotentials in Abhängigkeit von der Geologie<sup>1)</sup> für die Bodengruppe E3.

<sup>1)</sup> AU = Auenablagerungen, BSS = Buntsandstein, KR = Kristallin, MZ = Mesozoikum und Zechstein, QS = Quartäre Sedimente, RO = Rotliegend, RS = Rheinisches Schiefergebirge, TS = Tertiäre Sedimente, TV = Tertiäre Vulkanite

durchaus einen Einfluss auf das Radonpotential ausübt. In der Gruppe E3, für die mit Abstand die meisten Messwerte vorliegen, sind bis auf *Rotliegend* alle geologischen Strukturräume vertreten. Für diese Gruppe wurde daher der Einfluss der geologischen Strukturräume separat untersucht (Abbildung 3). Auch wenn die Streuung der Messwerte innerhalb eines Strukturraums groß ist, zeigt sich im Vergleich mit der Abbildung 1 eine deutlichere Abhängigkeit. Daraus lässt sich folgern, dass die Bodenart bei der Prognose des geogenen Radonpotentials nicht außer Acht gelassen werden sollte, insbesondere wenn es um die Ausweisung von Radonvorsorgegebieten geht.

### 3. Radon in Innenräumen

Die Vorschriften zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten beziehen sich ausdrücklich auf die Jahresmittelwerte der Radonaktivitätskonzentration in Innenräumen. Daher wurde im Anschluss an die Messkampagne zur Bestimmung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft eine weitere Kampagne durchgeführt, in der in 3000 Haushalten ein Jahr lang die Radonaktivitätskonzentration in repräsentativen Wohnräumen sowie Kellern ermittelt wurde. Die teilnehmenden Haushalte wurden vom HeRaZ hauptsächlich über Social Media und die Webseite angeworben. Auf Messen und bei Aktionen zur Information der Öffentlichkeit wurden zusätzlich Flyer verteilt. Die Akquise erfolgte in zwei großen Gruppen, im Herbst 2023 und im Frühsommer 2024. Im Juli 2025 lagen für ca. 830 der Haushalte Auswertungen der Messungen vor. Daher werden in diesem Beitrag vorläufige Ergebnisse vorgestellt.

In Anlehnung an eine deutschlandweite Messkampagne zur Radonaktivitätskonzentration in Innenräumen des Bundesamts für Strahlenschutz [7] wurde für jede Messung die Art des Gebäudes (Ein- oder Mehrfamilienhaus, Fachwerk- oder Massivhaus, ...), das Baujahr, die Art des Raums (Keller, Wohnraum, Schlafzimmer, ...) sowie das Stockwerk erfasst. Die teilnehmenden Haushalte waren aufgefordert, ein Exposimeter im Keller und eines in einem repräsentativen Wohnraum zu platzieren. Es zeigte sich jedoch, dass diese Trennung nicht immer aufrechterhalten werden kann: Manchmal befanden sich Wohnräume im Keller, manche Haushalte hatten keinen Keller und platzierten deshalb beide Exposimeter in oberen Stockwerken. In manchen Fällen ließ es sich im Nachhinein nicht mehr nachvollziehen, welches Exposimeter sich in welchem Stockwerk befunden hat. Dies schränkt die statistische Belastbarkeit der Analysen ein, weshalb in einem ersten Schritt zunächst die Art und das Alter der Gebäude in den Blick genommen wurden. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Jahresmittelwerte der Radonaktivitätskonzentrationen  $c_{Rn}$ , die

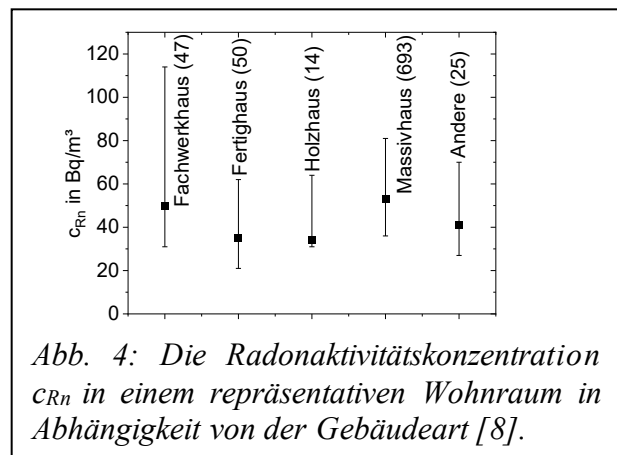


Abb. 4: Die Radonaktivitätskonzentration  $c_{Rn}$  in einem repräsentativen Wohnraum in Abhängigkeit von der Gebäudeart [8].

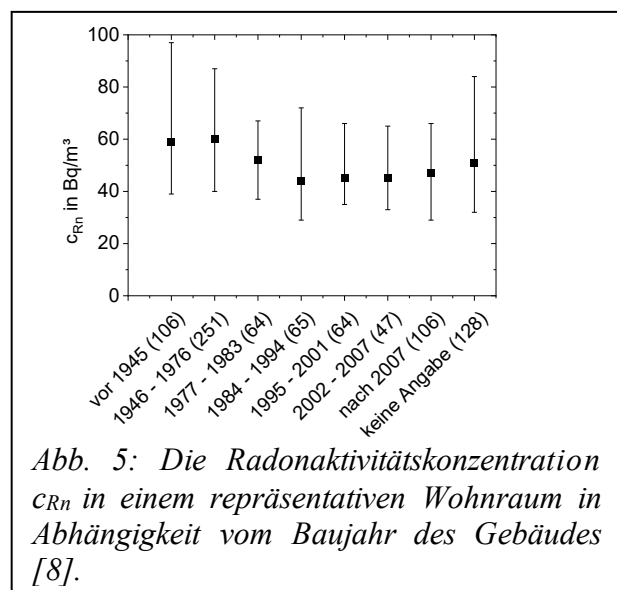


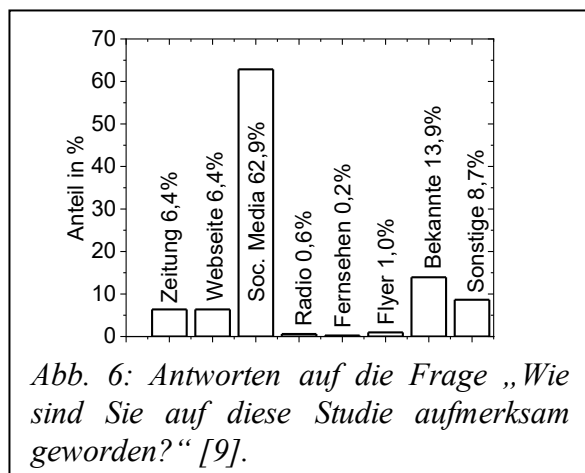
Abb. 5: Die Radonaktivitätskonzentration  $c_{Rn}$  in einem repräsentativen Wohnraum in Abhängigkeit vom Baujahr des Gebäudes [8].

jeweils in einem als *Wohnraum* kategorisierten Raum gemessen wurden. Dargestellt ist jeweils der Median mit den asymmetrischen Standardabweichungen, in Klammern die Anzahl der Messungen. Zwei Tendenzen lassen sich feststellen: Fachwerkhäuser, die meistens vor 1945 erbaut wurden, weisen eine höhere Radonbelastung auf als Holz- oder Fertighäuser, aber vergleichbar mit dem in Deutschland am weitesten verbreiteten Gebäudetyp, dem Massivhaus. Bezogen auf das Baujahr lässt sich eine Tendenz zur Verringerung der Aktivitätskonzentration beobachten. Insgesamt liegen die Aktivitätskonzentrationen deutlich unterhalb des Referenzwerts; es muss jedoch erwähnt werden, dass in einzelnen Fällen sehr wohl auch deutliche Überschreitungen gemessen wurden. Die bundesweite Vergleichsstudie des Bundesamts für Strahlenschutz [7] kommt zu vergleichbaren Ergebnissen. Weitere Faktoren, wie ganz oder teilweise Unterkellerung oder die Anzahl der Wohneinheiten, spielen ebenfalls eine Rolle. Und vor allem das Lüftungsverhalten beziehungsweise das Vorhandensein einer aktiven Lüftung hat einen erheblichen Einfluss auf die Aktivitätskonzentration. Die Auswertung der vollständigen Statistik aller Innenraum-Messungen wird zeigen, ob sich für Hessen weitere Einflussfaktoren ermitteln lassen. Im letzten Schritt ist es notwendig, die Ergebnisse der Bodenluft-Messungen und Innenraum-Messungen zu vergleichen, um belastbare Daten für die Ausweisung möglicher Radonvorsorgegebiete bereitzustellen.

#### 4. Vorwissen und Risikoeinschätzung

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Innenraum-Messkampagne mussten für die Bereitstellung der Exposimeter einen Fragebogen ausfüllen, in dem neben Details zum vermessenen Gebäude auch Vorwissen und Risikoeinschätzungen zum Thema Radon abgefragt wurden. Die Fragen wurden von einer Mitarbeiterin des HeRaZ in Anlehnung an Vorarbeiten des Bundesamts für Strahlenschutz erarbeitet und umfassten Skalen zu Kenntnissen, Sorgen, Risikoabschätzungen sowie Motivation zur Teilnahme an der Studie, Alter und Geschlecht (Angabe freiwillig) der ausfüllenden Person, Anzahl der Personen im Haushalt sowie die Frage, wie die Person(en) auf die Studie aufmerksam geworden sind. Eine Auswertung der bis Mai 2025 vorliegenden Antworten wurde im Rahmen von [9] durchgeführt. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse dieser ersten Auswertung zusammengefasst.

Obwohl davon auszugehen ist, dass bei Personen, die an einer solchen Studie teilnehmen, bereits ein gewisses Interesse für das Thema besteht, zeigte sich in der Befragung, dass beim Vorwissen durchaus Verbesserungsbedarf besteht. Auf einer Skala von 1 („nie gehört“) bis 6 („Umfangreiche Kenntnisse“) antwortete mehr als die Hälfte der Befragten mit 1 bis 3. Die Aussage „Ich mache mir Sorgen, dass bei mir zuhause zu viel Radon ist.“ bewertete mehr als die Hälfte der Befragten auf einer Skala von 1 („keine Sorge“) bis 6 („sehr große Sorge“) ebenfalls mit 1 bis 3. Dasselbe gilt für die Sorge, durch Radon an Lungenkrebs zu erkranken. Interessanterweise konnte zwischen den Vorkenntnissen und dem Lüftungsverhalten (von „nicht täglich“ bis „mehr als 4 mal pro Tag“) kein statistisch signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Personen, die eine höhere Sorge vor Lungenkrebs durch Radon angegeben haben, lüfteten hingegen etwas häufiger (70% 1-2 mal pro Tag) verglichen mit Personen, die diese Sorge nicht äußern (64% 1-2 mal pro Tag).



Untersucht wurde auch, ob sich das Wissen über Radon und die Sorge in verschiedenen Altersgruppen unterscheidet. Die überwiegende Mehrheit der Befragten war zwischen 30 und 60 Jahre alt und gab 3 als Stufe des Vorwissens an (Median aller Antworten). Die Gruppe der unter 30jährigen war zwar mit einem Anteil von 4,9% unterrepräsentiert, aber es ist auffällig, dass in dieser Gruppe das eigene Wissen über Radon deutlich geringer eingeschätzt wird (Median 1,5). Das widerspricht der ursprünglichen Annahme, jüngere Menschen wären durch Schule und Medien mehr für schädliche Umwelteinflüsse sensibilisiert. Weiterhin zeigte sich in der Auswertung, dass Frauen ihr eigenes Vorwissen tendenziell schlechter einschätzen als Männer. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass von den Befragten, die eine Angabe zum Geschlecht gemacht haben, nur 29% weiblich waren, was nicht dem demografischen Durchschnitt in Hessen von 51% entspricht. Da jeder Fragebogen nur einmal pro Haushalt aufgenommen wurde, ist eine mögliche Erklärung, dass bei Paaren oder Familien mehrheitlich die Männer die Beantwortung übernommen haben.

Abbildung 6 schließlich zeigt die Antworten auf die Frage „*Wie sind Sie auf diese Studie aufmerksam geworden?*“ Die Kampagne wurde von Seiten des HeRaZ über die Webseite und Social Media-Plattformen beworben. Insbesondere der Anteil der Social Media ist mit 63% dementsprechend sehr hoch. Diese Auswertung zeigt, dass mit relativ geringem Werbeaufwand eine recht hohe Zahl an teilnehmenden Haushalten gewonnen werden konnte.

Insgesamt hat die Befragung der Bevölkerung die Erkenntnisse des Bundesamts für Strahlenschutz bestätigt [10]: Die Bevölkerung in Hessen hat wenige bis mittlere Kenntnisse über Radon, jüngere Personen eher geringere als ältere. Daraus lassen sich für die Umsetzung der hessischen Radonstrategie Zielgruppen-gerechtere Maßnahmen ableiten; insbesondere kommt offensichtlich den Schulen und Hochschulen als Multiplikatoren entscheidende Bedeutung zu.

## 5. Radon an Arbeitsplätzen

Befindet sich ein Arbeitsplatz in einem Radonvorsorgegebiet oder ist er in Anlage 8 StrlSchG beschrieben, ist der Arbeitgeber verpflichtet, den Jahresmittelwert der Radonaktivitätskonzentration zu ermitteln. Wird der Referenzwert von 300 Bq/m<sup>3</sup> überschritten, müssen Maßnahmen zur Reduzierung der Radonaktivitätskonzentration ergriffen werden. Sind diese Maßnahmen nicht erfolgreich oder nicht möglich, kann es notwendig werden, die Beschäftigten in den beruflichen Strahlenschutz aufzunehmen und ihre Personenexposition zu ermitteln. Um die Radonsituation in hessischen Unternehmen zu untersuchen, wurden an 41 Arbeitsplätzen und für 31 Beschäftigte in 10 Unternehmen Messungen mit einer Dauer von jeweils drei Monaten durchgeführt. Die Radonaktivitätskonzentration vor Ort wurde jeweils mit Kernspurexposimetern und mittels einer zeitaufgelösten Messung bestimmt. Zusätzlich wurde an einigen Arbeitsplätzen die Aktivitätskonzentration der Radonfolgeprodukte ermittelt und der Gleichgewichtsfaktor berechnet. Die Berechnung der effektiven Dosis für die Beschäftigten wurde auf Grundlage der Messungen mit verschiedenen Methoden durchgeführt und mit der Dosis aus der Personendosimetrie verglichen.

Die Auswertung der Daten ist noch nicht abgeschlossen. Erste Vergleiche der Dosis der Beschäftigten, die aus der orts- und der personenbezogenen Exposition ermittelt wurde, ergeben ein uneinheitliches Bild. Es ist offensichtlich Vorsicht geboten, wenn aus der Radonexposition an einem Arbeitsplatz die mögliche Exposition der Beschäftigten abgeschätzt wird. Insgesamt zeigte sich allerdings, dass auch an Arbeitsplätzen mit hoher Radonaktivitätskonzentration für keine überwachte Person eine effektive Dosis von 6 mSv/a überschritten wurde.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] § 153 Festlegung von Gebieten nach § 121 Absatz 1 Satz 1 des Strahlenschutzgesetzes, Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), 2018, zitiert nach [https://www.gesetze-im-internet.de/strlsv\\_2018/\\_153.html](https://www.gesetze-im-internet.de/strlsv_2018/_153.html), Zugriff am 08.07.2025
- [2] HLNUG Geologie Viewer 1:25000, <https://geologie.hessen.de/mapapps/resources/apps/geologie/index.html?lang=de>, Zugriff am 24.07.2025
- [3] Kuske, T., Kerker, S., Breckow, J., Lehné, R., Laupenmühlen, T., & Jedmowski, L., Nukleonika **65(2)** (2020) 139-144 doi: 10.2478/nuka-2020-0022
- [4] M. Neznal, M. Neznal, M. Matolin, I. Varnet, J. Miksova, <https://www.radonvos.cz/pdf/metodika.pdf>, Zugriff am 29.07.2025
- [5] Moubea, C.T., Master-Thesis, Technische Hochschule Mittelhessen (2024)
- [6] HLNUG Boden Viewer Hessen 1:50000, <https://bodenviewer.hessen.de/mapapps/resources/apps/bodenviewer/index.html?lang=de>, Zugriff am 24.07.2025
- [7] Kemski, J., Gruber V., Baumann, S. und Alber, O., Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2024062644650>, Zugriff am 17.07.2025
- [8] Kwasseu Ndopoh, A., Master-Thesis, Technische Hochschule Mittelhessen (2025)
- [9] Bauer, M. C., Bachelor-Thesis, Technische Hochschule Mittelhessen (2025)
- [10] Huber, L., Jerković, T., Marczuk, L., Meyer, M., Renner, S., Wieners-Schlupkothen, S., Wachenfeld-Schell, A., Vorhaben 3621S72210, Bundesamt für Strahlenschutz, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2022081833825>, Zugriff am 21.07.2025

## **ÜBERPRÜFUNG DER AUSWEISUNG DER RADONVORSORGEGEBIETE IN SACHSEN – EIN ZWISCHENSTAND**

Alisch-Mark Mandy, Pezenka Janett, Friedemann Stefan, Pianski Jacqueline , Geib Tobias,  
Heinrich Thomas

*Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Deutschland*

Die Festlegung der Radonvorsorgegebiete gilt in Sachsen seit dem 31.12.2020 (Sächsisches Amtsblatt Nr. 49/2020 vom 03.12.2020 - S. 1362). Aktuell sind 107 der 418 sächsischen Städte und Gemeinden als Radonvorsorgegebiet ausgewiesen. Im Hinblick auf die Überprüfung dieser Ausweisung der Radonvorsorgegebiete wurden in den letzten Jahren weitere Messkampagnen durchgeführt, um die Datenlage weiter zu verdichten. Erste Auswertungen der gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Referenzwertes von 300 Becquerel pro Kubikmeter in Innenräumen in Bezug auf die geologischen Einheiten, die Gebäudeebene der Messungen sowie in Bezug zum Gebäudealter werden vorgestellt. Außerdem erfolgt eine orientierende Auswertung von Radonschutzmaßnahmen und der anschließenden Erfolgskontrolle in Gebäuden mit Aufenthaltsräumen bzw. mit Arbeitsplätzen.

# **RADON AUßERHALB DER VORSORGEGEBIETE ANHAND DES FALLBEISPIELS PROSEKTUR CHEMNITZ**

Kieschnick Michael<sup>1</sup>, Jankuhn Steffen<sup>2</sup>, Schulz Simone<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung (LPS) Berlin, <sup>2</sup>Universität Leipzig, Stabstelle Umwelt- und Arbeitsschutz, Leipzig, <sup>3</sup>Universität Leipzig, Prosektur Chemnitz, Chemnitz

## **Zusammenfassung**

*Mit dem Strahlenschutzgesetz wurde 2017 der Radonschutz um eine neue Dimension erweitert. Bis dahin standen die klassischen Anwendungen Bergbau, Radonheilbäder und Wasserwerke allein anhand der möglichen effektiven Dosen im Fokus. Durch das Gesetz wurde ein neuer Ansatz im Radonschutz verbindlich gemacht, bei dem erste Maßnahmen im Radonschutz nicht von einer Dosisabschätzung abhängig gemacht werden, sondern von einer Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m<sup>3</sup>. Durch die Ausweisung von Vorsorgegebieten bis Ende 2020 wurde dafür gesorgt, dass in Bereichen mit erhöhtem Risiko für Überschreitungen dieses Wertes Messungen durch die Arbeitgeber zu erfolgen haben.*

*Das Radonschutz auch außerhalb der Vorsorgegebiete ein Thema ist, soll im Vortrag gezeigt werden. Hierfür wird das Fallbeispiel der Prosektur Chemnitz der Universität Leipzig verwendet. Die Prosektur liegt in der Nähe eines Vorsorgegebiets, jedoch außerhalb desselben. Bei Erhebungen der Radonkonzentration in der Prosektur wurde 2020 durch die Firma GeoPrax in stichprobenartigen Messungen festgestellt, dass teils erhebliche Radonbelastungen bis in den Bereich über 8000 Bq/m<sup>3</sup> vorlagen. Im Zusammenspiel von betrieblichem Strahlenschutz, der Abteilung Rechtsmedizin und dem Sächsischen Immobilien- und Baumanagement (SIB) wurden die Ergebnisse des vorgelegten Gutachtens durch bauliche Maßnahmen adressiert, der Sanierungsfortschritt messtechnisch begleitet und schließlich mittels Exposimetern die Jahresbelastung der Mitarbeiter erhoben. Die zuständige Behörde wurde dabei ebenfalls frühzeitig eingebunden. Mit Beginn des Jahres 2025 erfolgte im Wesentlichen der Übergang in einen Regelbetrieb mit angezeigten Radonarbeitsplätzen.*

*Ziel des Vortrags ist aufzuzeigen, welche praktischen und strukturellen Herausforderungen sich aus der Anwendung des Rechts ergeben. Wirksame Maßnahmen mit teils erheblichem Sanierungserfolg werden ebenfalls geschildert.*

**Schlüsselwörter** Radon, Referenzwertüberschreitung, kein Vorsorgegebiet, Fallbeispiel, Sanierung

**Key words** radon, exceeded reference value, outside of identified areas, case study, renovation

## **1. Einleitung**

Mit dem Strahlenschutzgesetz von 2017 wurde vom Gesetzgeber in den Fokus genommen, dass auch außerhalb von Bergbau, Radonheilbädern und Wasserwerken erhebliche Belastungen durch das radioaktive Edelgas Radon-222 vorliegen können. Dies ging einher mit der Abschaffung des vormaligen Begriffs der „Arbeiten“ verbunden mit dem neuen Begriff der „Tätigkeiten mit bestehender Exposition“. Die Festlegung eines Referenzwertes von 300 Bq/m<sup>3</sup> für die Radonbelastung der Atemluft, verbunden mit der neu geschaffenen Anmeldepflicht für betroffene Arbeitsplätze führt zu einer höheren Quantität (mehr betroffene Unternehmen) als auch einer anderen Qualität (zusätzliche bauliche Maßnahmen sowie ggf. Berichts- und

Anmeldepflichten, Beurteilung wo Arbeitsplätze vorliegen) der Strahlenschutzaufgaben von Unternehmen und Vollzugsbehörden.

Vorsorgegebiete in denen Messpflichten bestehen, wurden durch die Bundesländer bis Ende 2020 ausgewiesen. Die Fristsetzungen von 18 Monaten für die Erstmessung und 30 Monaten für anschließende Kontrollmessungen führen trotz der langen Zeit seit Einführung der Regelung zu einer weiterhin hohen Aktualität der Thematik, die hier an einem Fallbeispiel diskutiert wird.

## 2. Rechtliche Grundlage für Radonschutz an Arbeitsplätzen

Mit § 126 StrlSchG wurde der Referenzwert von Radon-222 in der Luft an Arbeitsplätzen auf 300 Bq/m<sup>3</sup> festgelegt. Wer Arbeitsplätze in Innenräumen unterhält an denen der Referenzwert überschritten wird, unterliegt nach § 128 StrlSchG Absatz 3 innerbetrieblichen Mitteilungspflichten, sowie nach Absatz 1 der grundsätzlichen Pflicht Maßnahmen zur Verringerung der Radonkonzentration zu treffen. Ist eine Verringerung unter den Referenzwert nicht möglich, so regeln §§ 129 – 131a StrlSchG die sich daraus ergebenden Aufgaben im Strahlenschutz. Neu hierbei ist die Anmeldung des Arbeitsplatzes, die bereits unterhalb der Schwelle der ehemaligen „Arbeiten“ zu erfolgen hat, während weitere Pflichten sich der vormaligen Maßnahmenschwelle einer geschätzten Exposition von 6 mSv bedienen.

Flankiert werden diese Vorschriften durch Messpflichten, die in § 127 StrlSchG (Erstmessung) und § 128 Abs. 2 StrlSchG (Kontrollmessung) festgelegt sind. Diese sind notwendig, da der Betriebsstätteninhaber nur durch Messung Kenntnis von der Überschreitung des maßnahmenauslösenden Referenzwertes erlangen kann. Unabhängig von der Messpflicht in Vorsorgegebieten nach § 127 StrlSchG i.V.m. § 121 StrlSchG kann jede Messung der Radonkonzentration in der Raumluft Pflichten im Strahlenschutz begründen. Somit kann der Radonschutz nach Strahlenschutzrecht auch außerhalb von Vorsorgegebieten nicht außer Acht gelassen werden.

Die rechtliche Verantwortung trägt, wie bisher bei „Arbeiten“, der Betriebsstätteninhaber. Durch den Fokus der neuen Regelungen (auch) auf bauliche Maßnahmen und die potentielle Ausweitung auf mehr „reguläre“ Gebäude (im Vergleich zu Bergwerken bzw. Zisternen) ist zu erwarten, dass Situationen relevanter werden in denen der verpflichtete Betriebsstätteninhaber nicht eigenständig in der Lage ist über bauliche Maßnahmen zum Radonschutz im Bestand zu entscheiden, da er nicht Gebäudeeigentümer ist.

Ein weiterer rechtlicher Aspekt ist die getroffene Definition des Begriffs „Arbeitsplatz“ in § 5 Abs. 4 StrlSchG: „Arbeitsplatz: Jeder Ort, an dem sich eine Arbeitskraft während ihrer Berufsausübung regelmäßig oder wiederholt aufhält.“

Der Gesetzgeber betont dabei in der amtlichen Begründung insbesondere, dass die Regelungen „grundsätzlich auch bei kurzfristigem Aufenthalt der Beschäftigten heranzuziehen [sind]“. Mess- und Handlungspflichten nach Errichtung eines Gebäudes bestehen nur bei vorhanden sein eines Arbeitsplatzes. Der Betriebsstätteninhaber hat daher die Aufgabe zu beurteilen in welchen Räumen Arbeitsplätze vorliegen. Diese Aufgabe ist für den klassischen Arbeitnehmer mit einem festen Arbeitsplatz sehr einfach zu lösen. Die Betrachtung erstreckt sich jedoch auch auf eigene Arbeitnehmer sowie Dritte in der Betriebsstätte tätige Personen, die nur kurzfristig und ggf. in verschiedenen Räumen tätig sind (z.B. Putzpersonal, Drittfirmen zu Reparaturen, Wartungspersonal in Funktionsräumen). Wird in diesen Beispielen das Bestehen eines Arbeitsplatzes bejaht, weitet dies die Anforderungen des Radonschutzes auf sonst nicht zu betrachtende Räume aus. Insbesondere bei Funktionsräumen in denen selten Arbeitstätigkeiten erforderlich sind, bestehen häufig Faktoren, die hohe Radonkonzentrationen begünstigen (z.B. Lage im Keller, schlechte Lüftung).

### 3. Ausgangslage Prosektur Chemnitz

Die Prosektur Chemnitz der Universität Leipzig liegt außerhalb eines Vorsorgegebietes in einer Hanglage. Dies erleichtert insbesondere ein Eindringen von Radon ins Untergeschoss. Über eine Innentreppe ist das Erdgeschoss mit dem Untergeschoss verbunden. Dies erlaubt einen erheblichen Luftaustausch. Im Sektionssaal war bereits aus Arbeitsschutzgründen ein erzwungener Luftwechsel vorgesehen. Aufgrund bestehender Verdachtsmomente wurde im Jahr 2020 ein Gutachten über die Radonbelastung im Gebäude anhand von elektronischen Erhebungsmessungen über einen Zeitraum von zwei Wochen durch die Firma Geoprax erstellt. Die Übersicht der Ergebnisse findet sich in Abb. 1. Einzelne Räume überschritten bei diesen Messungen nicht den Referenzwert. Dies korreliert sehr gut mit dem Vorhandensein einer Lüftung in den entsprechenden Räumen. Die anderen Räume wiesen erhebliche Radonkonzentrationen oberhalb von 1000 Bq/m<sup>3</sup> auf. Abb. 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentration in einem ausgewählten Arbeitsraum. Die Einbrüche in der Aktivitätskonzentration korrelieren dabei mit dem Lüften der Räume innerhalb der Arbeitszeit. Eine gesonderte Berücksichtigung dieses Effekts ist jedoch bei der Erhebung der Radonkonzentration von Gesetzes wegen nicht vorgesehen.



Abb. 1 – Bei der Erstmessung vom 22.06.-06.07.2020 ermittelte mittlere Radonkonzentrationen in der Prosektur Chemnitz. Links ist das Erdgeschoss dargestellt, rechts das Untergeschoss. Grün bedeutet Unterschreitung des Referenzwertes, rot bedeutet eine Überschreitung von 6 mSv bei Daueraufenthalt am Arbeitsplatz. Die Erhebung und Auswertung erfolgten durch die Firma Geoprax.

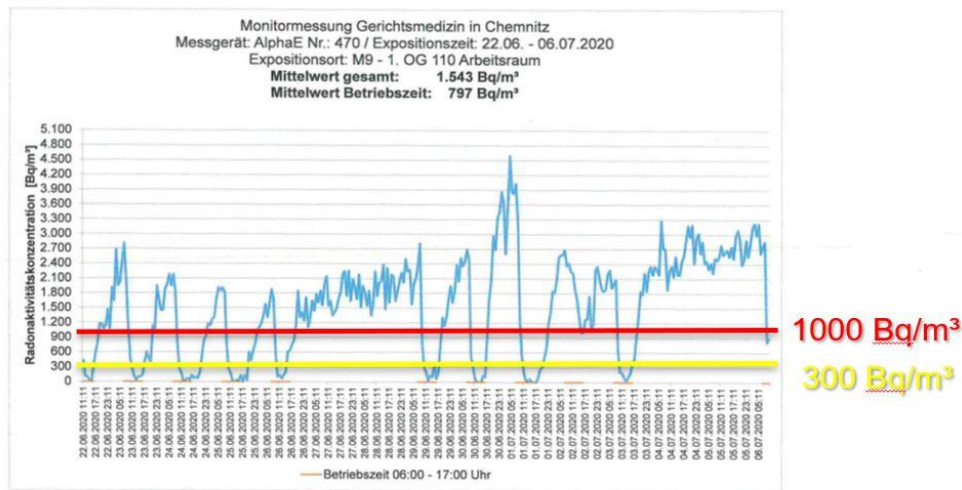


Abb. 2 – Zeitaufgelöster Verlauf der Radonkonzentration in einem ausgewählten Arbeitsraum. Klar zu erkennen ist eine erhebliche Verringerung der Radon-konzentration mit Beginn der Arbeitszeit. Grund hierfür sind Lüftungsmaßnahmen. Erhebung und Auswertung erfolgten durch die Firma Geoprax.

#### 4. Sanierungsmaßnahmen und Sanierungsergebnis

Als Ergebnis der Messungen wurden zunächst Erstmaßnahmen (Umsetzung von Mitarbeitern in andere Räume, regelmäßige Lüftung der Räume durch die Mitarbeiter) getroffen um die erhöhten Radonkonzentrationen wirksam zu verringern. Parallel wurden entsprechend der Empfehlung des Gutachters bauliche Maßnahmen geplant und umgesetzt. Hierbei waren insbesondere die Einrichtung einer Radon Absaugung (Radon Brunnen) an einem Eintrittspfad unterhalb der Treppe sowie die Zwangsbelüftung der Arbeitsräume relevant. Erleichtert wurde die Maßnahme durch bereits existierende Infrastruktur (bestehende Lüftungsschächte zu den Büros, bestehende Lüftungsanlage für den Sektionssaal) die lediglich für eine Überdruckbelüftung umgerüstet werden musste.

Begleitet wurden die Baumaßnahmen von Messungen mittels dreier elektronischer Messgeräte um den Sanierungserfolg im Verlauf der Maßnahmen punktuell in verschiedenen Räumen und in Hinblick auf bestimmte Maßnahmen überprüfen zu können. Hierbei zeigte sich durch Einrichtung von Radonbrunnen und Überdruckbelüftung ein erheblicher Sanierungserfolg im Erdgeschoss. Dieser basiert sehr wahrscheinlich auf einer erfolgreichen Blockade des Zustroms aus dem Untergeschoss. Im Untergeschoss stellte sich ebenfalls ein Sanierungserfolg ein, dieser war aber deutlich schwächer ausgeprägt.

Die Messungen legen nahe, dass Änderungen in der Abstimmung der Lüftungsanlage für einzelne Räume auch die anderen Räume beeinflussen. In Kombination mit im Hause parallellaufenden Baumaßnahmen, die häufiger zu einem irregulären Lüftungsregime im Haus führten, wurde daher in Abstimmung mit der Behörde entschieden erst nach Abschluss aller Bauarbeiten im November 2023 mit einer umfassenden einjährigen Kontrollmessung mit Expositometern zu beginnen um verlässliche Daten für den Regelbetrieb zu gewinnen. Die Ergebnisse der Kontrollmessung finden sich in Abb. 3. Die Maßnahmen führten in allen Räumen – auch solchen ohne Zwangsbelüftung – zu einem Absinken der Radonkonzentration.

In allen Büroräumen konnte durch die Sanierung eine Radonkonzentration erreicht werden, die keine über die Anmeldung von Arbeitsplätzen und Expositionsabschätzung hinausgehenden Maßnahmen notwendig macht.



Abb. 3 – In der Kontrollmessung mittels Exposimetern ermittelte Radonkonzentrationen. Grün signalisiert die Unterschreitung, Gelb die Überschreitung des Referenzwertes, bei Rot kann für Daueraufenthalt der Wert von 6 mSv im Kalenderjahr überschritten werden.

## 5. Expositionsabschätzung und Umgang mit Fremdfirmen

Die meisten betroffenen eigenen Mitarbeiter waren nur in Teilzeit mit vergleichbarem Tätigkeitsprofil in der Prosektur tätig. Es wurden daher Mitarbeitergruppen gebildet und gemeinsam betrachtet, wobei eine Gruppe auch aus einem einzelnen Mitarbeiter bestehen kann. Kriterium bei der Gruppierung war der Aufenthalt in gleichen (anmeldepflichtigen) Räumen über gleiche Zeiten. Die Zeiten wurden konservativ geschätzt. Anhand dieser Zeiten und der gemessenen Exposition wurde schließlich eine anzunehmende maximale Exposition der Mitarbeitergruppen ermittelt. Bis auf einen Arbeitsplatz lagen die Expositionen dabei unterhalb von 1 mSv.

Da in der Prosektur auch Mitarbeiter von Dritten (Bestatter, Polizei, Ärzte, Putzfirmen, Wartungsfirmen) tätig sind, stellte sich zusätzlich die Frage, wie bezüglich dieser zu verfahren ist. Bestimmte Gruppen müssen nicht betrachtet werden, da Sie nicht in betroffenen Räumen tätig sind (Polizei, Bestatter, Ärzte). Für bestimmte Gruppen wurde die Arbeitsplatzzeigenschaft aufgrund des zu erwartenden sehr geringen Stundenansatzes im Jahresverlauf als weder regelmäßig noch wiederholt verneint (Wartungsfirmen), jedoch entschieden die betroffenen

Raumübersicht für Standort

Nr.	Raumnr.	Bezeichnung	Radon [Bq/m <sup>3</sup> ]	Dosiskoeffizient (MBq*h/mSv)	ZE - 5 Minuten (nSv)	Radon-Exposition pro Stunde (µSv)	Tag (µSv)	Woche (µSv)	Jahr (mSv)
8	R001	Besprechungsraum	1040	0,32	270,833	3,250	26,000	130,000	6,500
3	R002 / 003	Schreibzimmer	719	0,32	187,240	2,247	17,975	89,875	4,494
17	R005	Lager	719	0,32	187,240	2,247	17,975	89,875	4,494
10	R006/1	Heizung	1610	0,32	419,271	5,031	40,250	201,250	10,063
9	R006/2	ELT	2070	0,32	539,063	6,469	51,750	258,750	12,938
11	R007/1	Radonbrunnen	2690	0,32	700,521	8,406	67,250	336,250	16,813
1	R009	Arztzimmer	456	0,32	118,750	1,425	11,400	57,000	2,850
12	R010	Kopierraum / Server	2360	0,32	614,583	7,375	59,000	295,000	14,750
2	R011	Untersuchungszimmer	113	0,32	29,427	0,353	2,825	14,125	0,706
13	R012	Flur EG	872	0,32	227,083	2,725	21,800	109,000	5,450

Abb. 1 – Exposition über verschiedene Referenzzeiträume in den Räumen der Prosektur Chemnitz. Auf geschlüsselt wurde dabei nach Zeiteinheiten (5 min), Stunden, Tage (8h), Wochen (40h) und dem Gesamtjahr (2000h).

Räume anlassbezogen zu lüften. Als problematisch stellte sich vor allem das Putzpersonal heraus, welches sowohl in verschiedenen Räumen als auch über einen relevanten Zeitraum tätig ist. Es wurde hierzu entschieden, zusätzlich Arbeitsplätze für das Putzpersonal in allen zu putzenden Räumen mit Referenzwertüberschreitung anzumelden und den Arbeitgeber anhand einer Tabelle (Abb. 4) über die möglichen Expositionen des Personals zu informieren. Diese enthält eine Aufschlüsselung der Dosis über verschiedene Zeiträume und erlaubt so eine erleichterte Abschätzung der Exposition.

## **6. Fazit**

Am Fall der Prosektur Chemnitz zeigt sich, wie durch Messungen der Radonkonzentration auch außerhalb der Vorsorgegebiete Pflichten im Radonschutz entstehen. Zunächst war zu klären, wie überhaupt mit den Messungen umzugehen ist, da diese nicht die Anforderungen an eine Erstmessung erfüllen (insbesondere aufgrund des kurzen Messzeitraums). Anhand der Höhe der gemessenen Radonkonzentration wurde schließlich entschieden, dass eine Überschreitung des Referenzwertes bei einer Jahresmessung als wahrscheinlich gelten muss.

Sofortmaßnahmen wie regelmäßiges Lüften und Umsetzung von Mitarbeitern wurden unverzüglich durchgeführt. Bauliche Maßnahmen, begleitet von elektronischen Messungen, konnten erst etwa drei Jahre nach der Erhebungsmessung abgeschlossen werden. Anhand baubegleitender elektronischer Messungen konnten im Laufe der Sanierung Anpassungen der Maßnahmen vorgenommen werden und Erfolge dokumentiert werden. Die Sanierung selbst wurde auf Räume fokussiert in denen reguläre Arbeitsplätze vorgesehen sind. Dieser Ansatz diente der Limitierung von Baukosten und Bauumfang und hat sich im Ergebnis als zielführend erwiesen. Nach Abschluss aller Baumaßnahmen wurde eine reguläre einjährige Kontrollmessung mit Exposimetern als notwendige Basis des weiteren Strahlenschutzes durchgeführt. Der Sanierungserfolg war insbesondere im Erdgeschoss erheblich.

Als größte rechtliche Problematik erwies sich der Umgang mit Drittfirmen und der Arbeitsplatzdefinition des Strahlenschutzgesetzes. Es musste hierzu eine Auslegung entwickelt und auf die verschiedenen Drittfirmen angewandt werden. Danach wurde entschieden ob diese Dritte sind, die nach StrlSchG Arbeitsplätze in einer Betriebsstätte der Universität Leipzig unterhalten und gegenüber denen Informationspflichten bestehen. Als besonders kritische Personengruppe wurde dabei Putzpersonal identifiziert, dass in sehr vielen Räumen einen Arbeitsplatz begründen kann, die aus anderen Gründen nicht anmeldepflichtig wären (Flure, Toiletten etc.). Zwar ist dabei die Aufenthaltszeit im einzelnen Raum eng begrenzt, die Summe der Arbeitszeit kann aber gegebenenfalls nicht vernachlässigt werden.

## **7. Literaturverzeichnis**

[1] Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist

## **AKTIVITÄTEN ZU AUS- UND FORTBILDUNGEN UND KOOPERATIONEN IM RADONSCHUTZ IN ÖSTERREICH**

Gruber Valeria, Ringer Wolfgang, Wurm Gernot, Kunte Angelika, Götzendorfer Andrea, Himmelbauer Klara, Baumann Sebastian, Gräser Joachim

*Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Österreich*

Radonschutz ist ein multidisziplinäres Feld. Daher ist es für eine effiziente Umsetzung wichtig, alle relevanten Zielgruppen - wie Bau- und Gesundheitswesen, Arbeitgeber, Schulen und Hochschulen, Behörden - einzubinden. Dafür ist Information und Aufklärung, Etablierung von Kooperationen, sowie Aus- und Fortbildung nötig.

Der Beitrag gibt einen Einblick in die Aktivitäten der Radonfachstelle in Österreich in der Aus- und Fortbildung im baulichen Radonschutz, Aufklärung und Angebote für den Radonschutz an Arbeitsplätzen, Projekte in Schulen, sowie zu bestehenden und neu etablierten Kooperationen, v.a. im medizinischen Bereich. Dabei sollen auch die gewonnenen Erkenntnisse, Wirksamkeit, Probleme und Pläne für die Zukunft diskutiert werden – für einen praktischen Nutzen für die Zuhörer und als Grundlage für einen Erfahrungsaustausch.



**Session 9**  
**Radioaktive Altlasten**



# RECYCLING UND ENTSORUNG VON KONTAMINIERTEN BÖDEN IN FUKUUSHIMA

Feinhals Jörg

*Geschäftsführer Fachverband für Strahlenschutz e. V., Deutschland*

## Zusammenfassung

*Im Rahmen der Dekontamination von Landflächen, Gebäuden, ganzen Städten sind erhebliche Mengen an kontaminierten Böden angefallen (13.790.000 m<sup>3</sup>).*

*Für die Verwendung im öffentlichen Bereich gilt ein Wert von 8 Bq/g für Cs-137. Ca. 75% des Materials haben eine geringere spez. Aktivität.*

*Die Aktivität des verbliebenen Materials kann bis auf geringe Restmengen (<1%) durch verschiedene Maßnahmen ebenfalls unter diesen Wert gesenkt werden.*

*Die verbliebenen radioaktiven Abfälle sollen bis 2045 in einem oberflächennahen Endlager entsorgt sein. Dieses Endlager ist noch zu beplanen, zu errichten und zu betreiben.*

*Am Kernkraftwerksstandort werden derzeit noch die Brennelemente geborgen. Dies wird voraussichtlich 2029 abgeschlossen sein.*

*Zugleich beginnt derzeit die Erprobung der Technik zur Bergung von Kernmaterial.*

*Die Stilllegung soll in 30-40 Jahren abgeschlossen sein.*

## 1. Inhalt

- Das Erdbeben und die Tsunamiwelle
- Wie wirkte sich der Tsunami auf die Blöcke von Fukushima Daiichi aus?
- Die radiologischen Folgen des Unfalls von Fukushima Daiichi
- Die radiologischen Maßnahmen – Dekontamination
- Entsorgung und Recycling
- Wie geht es weiter am Standort?

## 2. Das Erdbeben und die Tsunamiwelle

Am 11.03.2011 um 14:46 JST ereignete sich ein Erdbeben mit Magnitude 9 im Nordosten der Hauptinsel Honshu.



Im Einwirkungsbereich sind 15 KKW, die sofort abgeschaltet wurden. Weniger als eine Stunde später lief eine riesige Tsunamiwelle an der Küste auf.



Die Folgen dieser Tragödie:

- 22.199 Tote, davon wurden ca. 2.500 nie gefunden,
- mehr als 470.000 Gebäude wurden schwer beschädigt oder zerstört,
- ca. 4 Mio Haushalte ohne Strom,
- 2,3 Mio Haushalte ohne Trinkwasser,
- mehr als 120 erhebliche Landrutsche, Damnbrüche und Bodenverschiebungen.



### 3. Wie wirkte sich der Tsunami auf die Blöcke von Fukushima Daiichi aus?

Infolge des Erdbebens wurden die im Betrieb befindlichen Reaktoren 1-3 abgeschaltet. Block 4 war in Revision, Blöcke 5-6 sollten wiederangefahren werden.



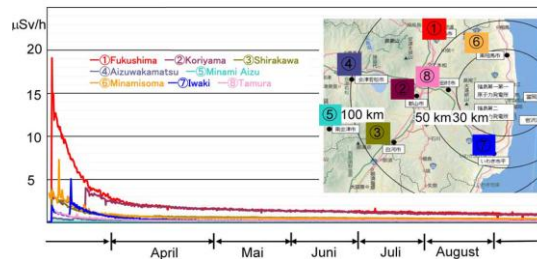
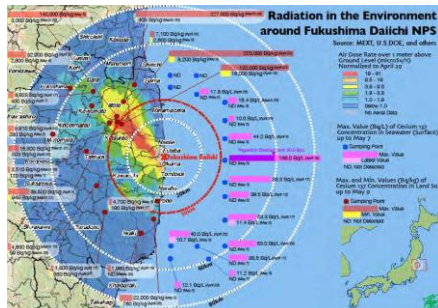
Infolge des Erdbebens war der Standort von jeglicher externer Stromversorgung abgeschnitten. Blöcke 5 und 6 konnten über ein Notaggregat gekühlt werden. Nach weniger als einer Stunde traf eine 14 m hohe Welle auf den Standort. Dabei wurden u.a. auch die Notstromdiesel zerstört. Eine Kühlung der Brennstäbe war nicht mehr gewährleistet. Wasserstoff entsteht, Knallgasexplosionen zerstören den oberen Teil der Blöcke 1-3. Eine Kernschmelze setzt in den Blöcken 1-3 ein, eine Not-Kühlung mit Wasser erfolgt aus Wasserwerfern und Löschfahrzeugen.



## 4. Die radiologischen Folgen des Unfalls von Fukushima Daiichi

Durch die Explosionen wurden radioaktive Partikel in die Umgebung freigesetzt und mit dem Wind und Niederschlägen in der Umgebung verteilt.

Es wurden vorrangig Jod- und Cs-Isotope gemessen. Aufgrund der geringen Halbwertszeit sind jetzt nur noch Cs-134 und vor allem Cs-137 feststellbar.



Außerhalb der Anlage wurden max. eine ODL von 170  $\mu\text{Sv/h}$  und eine Bodenkontamination von 220 Bq/g festgestellt. Die ODL ging in wenigen Monaten wieder auf Werte vor der Katastrophe herunter.

## 5. Die radiologischen Maßnahmen - Dekontamination

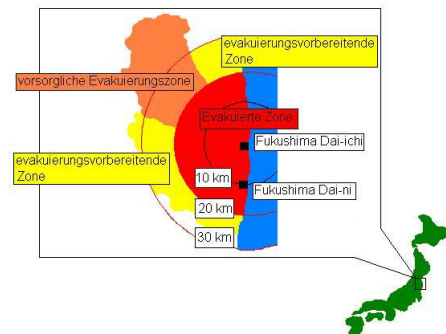
Aufgrund des Druckanstiegs im RDB wurden am 12.03.2011 morgens Einwohner im Umkreis von 10 km evakuiert.

Nach der ersten Explosion nachmittags am 12.03.2011 wurden die Einwohner im Umkreis von 20 km evakuiert. Ein Radius von 20-30 km bedeutet „Verbleiben im Haus“.

Am 11.04.2011 wurde eine vorsorgliche Evakuierungszone sowie eine evakuierungsvorbereitende Zone eingerichtet. Kriterium für die Evakuierung ist eine Dosis von 20 mSv/a.

Es wurden Grenzwerte für Nahrungsmittel und Trinkwasser festgelegt.

Evakuierte Bereiche sollen dekontaminiert werden, damit die evakuierte Bevölkerung in ihre Heimat zurückkehren kann.



Dekontaminationsbereiche

Hierzu wurden vorrangig Bodenflächen abgetragen, bis die Oberflächenkontamination den geforderten Kriterien entsprach.



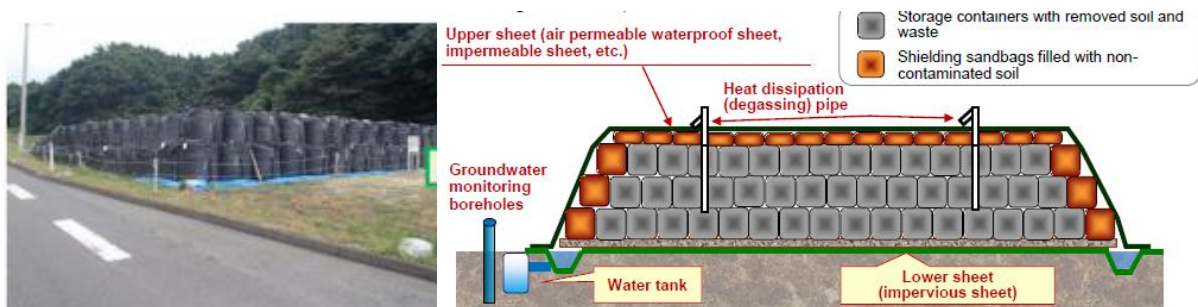
Ebenso wurden Häuser entweder gereinigt oder abgerissen.



Zuständig für den evakuierten Bereich (rot umrandet) ist das japanische Umweltministerium MOE, außerhalb der Zone sind die Gemeinden für die Dekontamination für die Dekontamination selbst zuständig (grüner und gelber Bereich).

Die Evakuierung konnte bis 2020 bereits in vielen Gemeinden außerhalb des Sperrgebietes aufgehoben werden.

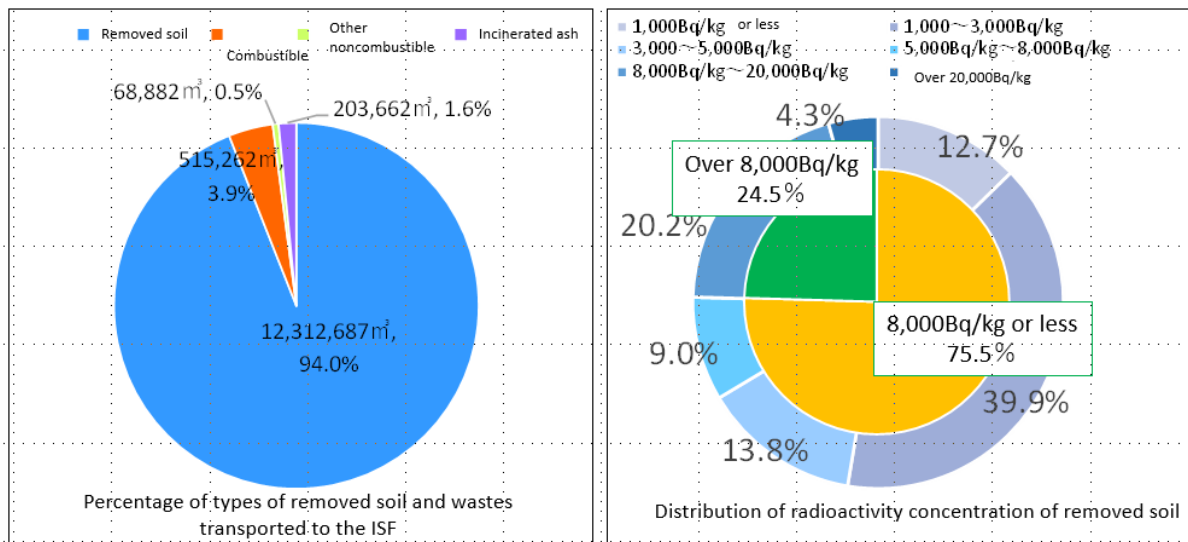
Wie geht es weiter mit dem kontaminierten Bodenmaterial? Als erste Maßnahme wurden in den Gemeinden Bigbags mit kontaminierten Böden in ca. 1200 Lagerbereichen gelagert.



Zunächst wurden die vielen Lagerbereiche aufgelöst, das Bodenmaterial zu einem neuen Standort verbracht – dem ISF (Interim Storage Facility). Das ISF ist mit Messeinrichtungen sowie Behandlungsanlagen (z.B. einer Verbrennungsanlage) ausgestattet. Ende April 2024 war alles (13.790.000 m<sup>3</sup>) zum ISF verbracht worden.

Auf Basis des 1 mSv/a-Kriteriums wurde ein Interventionswert von 8 Bq/g für Cs-137 ermittelt. Ca. 75% haben eine spez. Aktivität < 8 Bq/g und dürfen direkt in Recycling-Projekte eingesetzt werden. Ca. 25% liegen über diesem 8 Bq/g Kriterium.

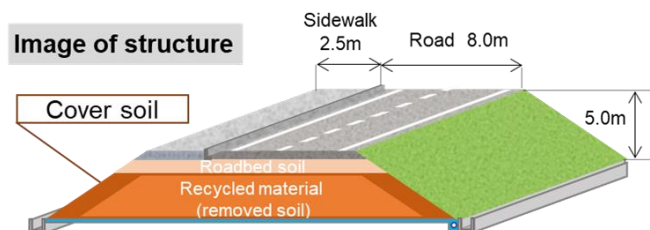
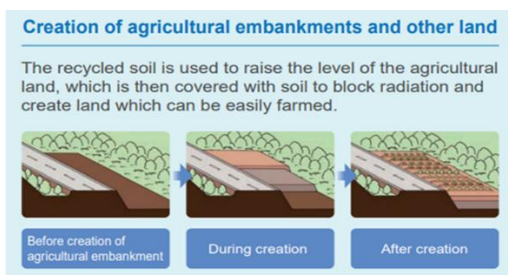
Zum Vergleich: der deutsche Freigabewert für Cs-137 bei Deponierung bis max. 1000 Mg/a beträgt ebenfalls 8 Bq/g.



## 5. Entsorgung und Recycling

Beispiele für das Recycling von Bodenmaterial sind

- Verwendung als Untergrundmaterial im Straßenbau
- Verwendung als Untergrundmaterial zur Anhebung des Ackerlandes



Hierzu wurde ein Demonstrationszentrum in Iitate Village eingerichtet.

Auch für die Behandlung kontaminierter Böden bestehen bereits erste Pilotanlagen.

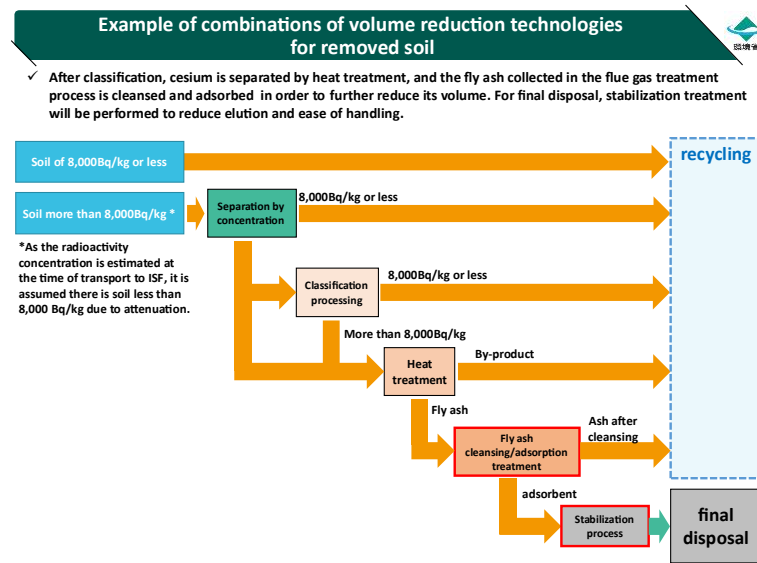
Vorgesehen ist

- Messung der spezifischen Aktivität: <8 Bq/g direktes Recycling (ca. 75%)
- Aussortieren von Bestandteilen mit erhöhter Aktivität durch direkte Messung sowie Sieben, um organische und Feinanteile zu entfernen (weitere ca. 15% können recycelt werden).
- Veraschung, so dass Cs-137 in die Flugasche geht (weitere >7% können recycelt werden)
- Reinigung der Flugasche (weitere >2% können recycelt werden).

Weit mehr als 99% der kontaminierten Böden können recycelt werden. Deutlich weniger als 1% verbleiben somit als radioaktiver Abfall. Die Entsorgung der radioaktiven Abfälle soll in einem typischen, oberflächennahen Endlager, wie es auch in Japan bereits einige gibt, erfolgen. Randbedingungen hierfür sind:

- nicht im Distrikt Fukushima,
- Betreiber ist der Staat - betreibereigene Endlager kommen somit nicht in Frage,

- sämtliche radioaktive Abfälle aus diesem Prozess sollen bis **März 2045** in einem eigens hierfür erbauten Endlager entsorgt sein.

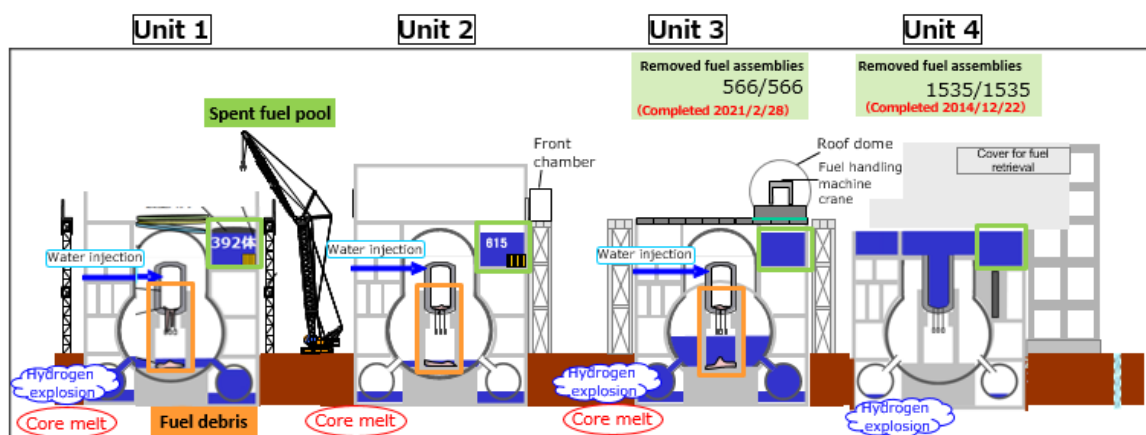


Der Plan zum Recycling und Entsorgung von kontaminiertem Boden wurde von der IAEA in 2024 für gut befunden.

## 6. Wie geht es weiter am Standort?

Am Kernkraftwerksstandort werden derzeit noch die Brennelemente geborgen. Dies wird voraussichtlich 2029 abgeschlossen sein. Zugleich beginnt derzeit die Erprobung der Technik zur Bergung von Kernmaterial. Die Stilllegung soll in 30-40 Jahren abgeschlossen sein. Der Status wird in der folgenden Abbildung aufgezeigt (Quelle Tepco).

Current situation at each unit



# **SANIERUNG HISTORISCHER DEPONIEREN MIT RADIOLOGISCHEN ATTLASTEN IN DER SCHWEIZ**

## **REMEDICATION OF HISTORIC LANDFILLS CONTAMINATED WITH RADIOACTIVE WASTE IN SWITZERLAND**

Linder Reto, Senn A.-C.

*Abteilung Strahlenschutz, Bundesamt für Gesundheit, Schweiz*

### **Zusammenfassung**

*Im Mai 2015 beauftragte der Bundesrat das Bundesamt für Gesundheit BAG mit der Umsetzung des Aktionsplans Radium, um das Problem der radiologischen Altlasten zu bewältigen, welche durch die Verwendung radiumhaltiger Leuchtfarben durch die Uhrenindustrie bis in die 1960-er Jahre entstanden sind. Im Rahmen dieses Aktionsplans wurde unter anderem untersucht, welche ehemaligen Deponien möglicherweise mit radiumhaltigen Abfällen kontaminiert sind. Dabei wurden rund 250 Standorte identifiziert. Bei Sondierungs- und Aushubarbeiten im Bereich einer ehemaligen Deponie mit möglicher Radiumkontamination können Risiken für Arbeitskräfte und die Umwelt nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund müssen in solchen Fällen Strahlenschutzmassnahmen ergriffen werden. Das BAG hat eine Wegleitung herausgegeben, welche das Vorgehen bei Sondierungs- und Aushubarbeiten auf solchen Standorten regelt. Betroffene Sanierungsfirmen müssen zur Durchführung der Aushubarbeiten eine Bewilligung für den Umgang mit radioaktivem Material beantragen. Dazu muss ein Strahlenschutzkonzept eingereicht und die Arbeiten durch eine vor Ort anwesende Strahlenschutz-sachverständige Person überwacht werden. Die enge Begleitung der Aushubarbeiten durch die Strahlenschutz-Aufsichtsbehörde BAG gewährleisten einen möglichst reibungslosen Ablauf solcher Sanierungsprojekte aus Sicht des Strahlenschutzes. Die laufende Sanierung einer ehemaligen Stadtdeponie zeigt jedoch eindrücklich, wie anspruchsvoll sich die Triage und Entsorgung von radiumkontaminiertem Material gestaltet. Insbesondere durch die Kombination von konventionellen Schadstoffen und radioaktiven Kontaminationen ist es oft schwierig, einen geeigneten Entsorgungsweg zu finden.*

**Schlüsselwörter** *Radiologische Altlasten, Deponiesanierung*

## **1. Einleitung**

In der Schweiz wurde Radium bis Ende der 1960-er Jahre hauptsächlich von der Uhrenindustrie als Basis für Leuchtfarbe verwendet. Da es zu dieser Zeit für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen noch keine spezifischen Vorschriften gab, wurden die anfallenden Abfälle als normale Haushalts- oder Industrieabfälle entsorgt. So gelangten sämtliche radioaktiven Abfälle aus dieser Tätigkeit in regionale Deponien. Um zu ermitteln, welche dieser ehemaligen Deponien betroffen sein könnten, wurde im Rahmen des Aktionsplans Radium [1] des Bundesamtes für Gesundheit BAG unter anderem historische Recherchen durchgeführt. Dabei wurden rund 250 ehemalige Deponiestandorte identifiziert. Werden in solchen ehemaligen Deponien Sondierungen, Sanierungen oder sonstige Aushubarbeiten durchgeführt, müssen Strahlenschutzmassnahmen für die Arbeiterinnen und Arbeiter und für die Umwelt getroffen werden.

Eine Sanierung auf einem solchen Standort ist seit 2022 auf dem ehemaligen „Stadtmist“ in Solothurn [2] im Gange. Zwischen 1925 und 1976 entsorgte die Stadt Solothurn dort den anfallenden Kehricht. Die in dieser stillgelegten Deponie enthaltenen konventionellen Schadstoffe gefährden die Umwelt. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass das gesamte Areal saniert werden muss. Die sanierten Flächen sollen anschliessend wieder als Bauland oder zur landwirtschaftlichen Nutzung uneingeschränkt zur Verfügung stehen. Die gesamten Aushub- und Entsorgungsarbeiten für alle drei Deponiebereiche „Unterhof“, „Spitelfeld“ und „Oberer Einschlag“ werden ca. vier bis fünf Jahre in Anspruch nehmen.

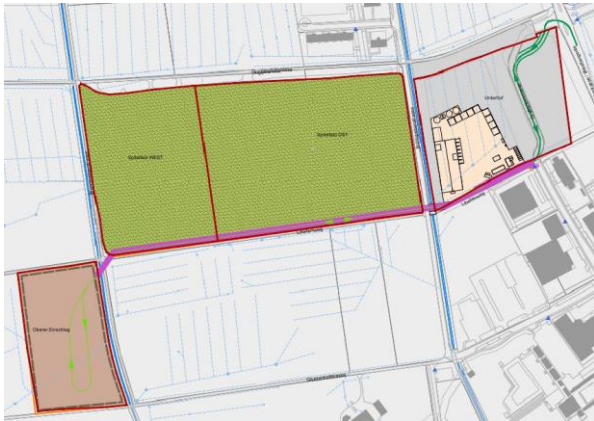


Abb. 1: Übersicht der 3 Deponiebereiche mit Installationsplatz und Aufbereitungsanlage



Abb. 2: Deponiebereich Spitelfeld während der Sanierung

## 2. Strahlenschutzkonzept

Aushubarbeiten in ehemaligen Deponien, die mit Radium kontaminierte Abfälle enthalten können, dürfen nur mit einer vom BAG erteilten Bewilligung durchgeführt werden. Das BAG ist die Aufsichts- und Bewilligungsbehörde im Bereich Strahlenschutz. Das Vorgehen richtet sich dabei nach der Wegleitung des BAG «Arbeiten auf ehemaligen Deponien» [3]. Im Rahmen des Bewilligungsverfahrens prüft und überwacht das BAG, ob die mit der Durchführung dieser Arbeiten beauftragte Firma die erforderlichen Strahlenschutzmassnahmen gesetzeskonform plant und auch umsetzt. Die geplanten Massnahmen müssen in einem Strahlenschutzkonzept festgelegt werden. Unter anderem müssen das Vorgehen zur Überprüfung des Aushubmaterials mittels Radioaktivitätsmessungen sowie die erforderlichen Massnahmen zum Schutz der Arbeitnehmenden erläutert werden. Weiter sind geeignete Entsorgungswege zu definieren, falls radioaktives Material anfällt.

### 2.1 Mess- und Triageverfahren

Die mit der Sanierung der Stadtmist-Deponie beauftragte Sanierungsfirma hat zwei Messportale installiert, welche das ausgehobene Deponiegut zuerst beim Transport in die Aufbereitungsanlage und dann vor dem Abtransport des Materials auf erhöhte Radioaktivität überprüfen (Portalmonitore GammaScan2 mit 2 x 25 l Detektorvolumen).

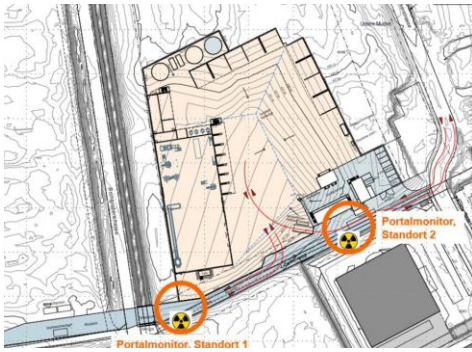


Abb. 1: Standorte der Portalmonitore



Abb.2: Bagger mit Radioaktivitätsdetektor

Die Alarminstellung der Portalmonitore wurde auf den doppelten Wert der natürlichen Hintergrundstrahlung eingestellt. Wird bei der Durchfahrt durch das Portal ein Alarm ausgelöst, muss die Ladung mit einem Handmessgerät ausgemessen (Nuvia Szinto II) und, falls erforderlich, triagiert werden. Ziel der Triage ist, radioaktives Material vor der weiteren Behandlung des Deponiematerials auszusortieren und für die Entsorgung als radioaktiver Abfall vorzubereiten. Falls die Radioaktivität diffus im Deponiematerial verteilt ist und nicht aussortiert werden kann, wird das Material auf einem separaten Bereich zwischengelagert, um es zu einem späteren Zeitpunkt als radioaktives Material mit geringer Aktivität zu entsorgen. Die schweizerische Gesetzgebung sieht vor, dass solches Material mit Zustimmung des BAG und der kantonalen Umweltbehörde in Deponien des Typs E („Reaktordeponie“) abgelagert werden können. Während der Sanierung des Stadtmists wurde aufgrund der häufigen Alarme ergänzend zu den Portalmessungen zusätzlich eine Baggerschaufelmesssonde beschafft und eingesetzt (Cetto Baggersonde 0.7 l CsI Detektor). Damit kann radioaktiv kontaminiertes Material bereits an der Aushubstelle detektiert und so frühzeitig aussortiert werden.

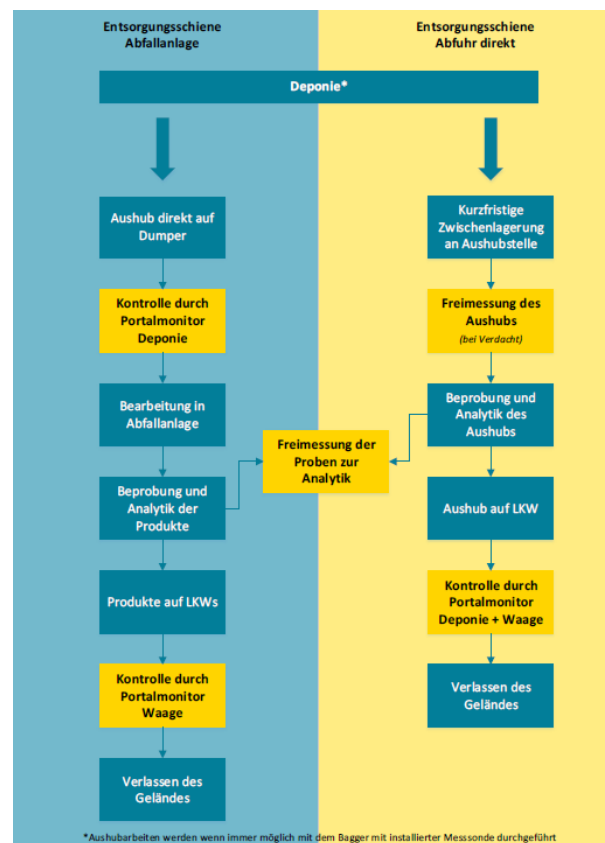


Abb. 3: Ablaufschema Messkonzept

## 2.2 Personeller Strahlenschutz

Arbeiter, welche auf dem Sanierungsareal beschäftigt sind, insbesondere beim Aushub und der Triage von kontaminiertem Material gelten nicht als beruflich strahlenexponiert, da gemäss unserer Erfahrung bei dieser Tätigkeit keine Personendosen über 1 mSv pro Kalenderjahr akkumuliert werden können. Zur Sicherstellung dieser Annahme wird die Person, welche am häufigsten in Kontakt mit kontaminiertem Material steht, dosimetriert. Zusätzlich wurde an Orten, an welchen Arbeiter durch radioaktives Material exponiert werden könnten (z.B. im Baggerfahrzeug oder an der Handauslese der Aufbereitungsanlage), Ortsdosimeter installiert. Die Resultate der Dosimetrie bestätigen, dass der Dosisgrenzwert nicht überschritten wird. Der betriebsinterne Arbeitssicherheits-, Hygiene und Gesundheitsschutzplan verlangt zum Schutz vor konventionellen Schadstoffen beim Aufenthalt auf dem Sanierungsgelände umfangreiche Schutzmassnahmen. So trägt das Personal einen Einwegschutzanzug, Einweghandschuhe und Gummistiefel. Die Übergänge zwischen dem Schutzanzug, den Handschuhen und den Stiefeln werden abgeklebt. Falls eine Staubbelastung vorliegt, wird zusätzlich eine Staubschutzmaske FFP3 getragen. Diese Massnahmen schützen die Arbeiter auch vor Kontamination und Inkorporation von radioaktivem Material. Zusätzlich werden Arbeiter und Gerätschaften, welche möglicherweise mit radioaktivem Material in Kontakt gekommen sind, nach ihrem Einsatz mit einem Kontaminationsmessgerät (Nuvia, Como-170) auf mögliche Kontamination überprüft und freigemessen.

## 2.3 Strahlenschutzausbildung und Instruktion

Zur Umsetzung der Strahlenschutzmassnahmen und zur Instruktion der betroffenen Arbeitnehmenden muss eine Strahlenschutz-sachverständige Person vor Ort anwesend sein. Diese muss eine anerkannte Strahlenschutzausbildung (I 6 Strahlenschutz-Sachverständige bei der Kontrolle auf Vorhandensein von radioaktivem Material) nachweisen können. Im vorliegenden Sanierungsfall war es eine Herausforderung, den betroffenen Arbeitnehmenden die Angst vor einer möglichen schädlichen Wirkung durch radioaktives Material zu nehmen. Dazu wurden einige Arbeitnehmende mit elektronischen Dosimetern ausgerüstet. Nachdem belegt werden konnte, dass die akkumulierte Dosis nach Arbeiten in Bereichen mit nachgewiesener radioaktiver Kontamination nicht wesentlich höher ausfällt, als wenn die elektronischen Dosimeter in der Garderobe verbleiben, konnten die Befürchtungen glaubhaft widerlegt werden.

## 3. Radioaktive Abfälle aus der Deponiesanierung

In der Regel erfolgt eine Sanierung eines ehemaligen Deponiestandorts nicht aufgrund der möglichen radiologischen Belastung. Messungen der Sickerwässer in nachweislich mit Radium belasteten Deponien haben bis heute in keinem Fall unzulässige Aktivitätskonzentrationen gezeigt. Das Deponiematerial im Stadtmist Solothurn enthält vorwiegend Siedlungsabfälle (Abfallsäcke, Metall, Schlacke etc.). Rund 65 % davon müssen in der vor Ort installierten Aufbereitungsanlage behandelt werden, da eine direkte Entsorgung oder Verwertung aufgrund der Materialzusammensetzung nicht möglich ist. Sobald Deponiematerial radioaktiv kontaminiert ist, bestimmt diese Belastung meist den möglichen Entsorgungsweg. So dürfen radioaktive Abfälle zum Beispiel nicht ausserhalb der Schweiz entsorgt werden.

### 3.1 Deponierung leicht radioaktiver Abfälle mit Zustimmung des BAG

Leicht kontaminierte radiumhaltige Abfälle könnten bis zu einer spezifischen Aktivität von 10 kBq/kg mit Zustimmung des BAG in einem Deponiekompartment Typ E abgelagert

werden. wenn es die Zusammensetzung in Bezug auf konventionelle Schadstoffe (z. B. Schwermetalle) zulässt. Jedoch sind nur sehr wenige Betreiber von Typ E Deponien bereit, leicht radioaktives Material entgegenzunehmen und mit Zustimmung des BAG abzulagern. Aus diesem Grund sind die Kapazitäten für diesen Entsorgungsweg ohnehin sehr beschränkt. Eine Ablagerung von *unbehandeltem* Deponiematerial im Typ E-Kompartiment ist zudem aufgrund seiner Zusammensetzung häufig nicht zulässig. Auf eine Behandlung von radioaktiv kontaminiertem Material in der auf dem Deponiegelände installierten Aufbereitungsanlage wurde bis jetzt verzichtet. Es besteht die Gefahr, dass Anlagenteile oder das Prozesswasser kontaminiert werden oder Ra-226 im Filterkuchen angereichert würde. Dies könnte dazu führen, dass aufgrund der Aktivitätskonzentration eine konventionelle Entsorgung des Filterkuchens nicht mehr zulässig wäre. Mittlerweile lagern rund 15'000 m<sup>3</sup> mit Radium kontaminiertes Material im Zwischenlager auf der Deponie, für welches noch ein geeigneter Entsorgungsweg definiert werden muss.

### 3.2 Radioaktiver Abfall zur Abgabe an das Bundeszwischenlager

Abfälle mit spezifischen Aktivitäten von Ra-226 über 10 kBq/kg müssen als radioaktiver Abfall an das Bundeszwischenlager BZL abgeliefert werden. Davon betroffen sind im Wesentlichen Abfälle aus der Triage von Aushubmaterial. Die Kosten für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen belaufen sich auf Fr. 200.- pro Liter, weshalb sich eine sorgfältige Separierung und Volumenreduktion lohnt. Bis zum aktuellen Zeitpunkt wurden rund 150 kg radioaktive Abfälle aussortiert und an das BZL abgeliefert.



*Abb. 4: Ampullen mit Radiumleuchtfarbe aus der Triage von kontaminiertem Deponiematerial*

## 4. Schlussfolgerungen und Herausforderungen

Die Sanierung historischer Deponien, welche neben konventionellen Schadstoffen auch radiologische Altlasten enthalten, gestaltet sich insbesondere im Hinblick auf die Identifikation geeigneter Entsorgungswege als besonders anspruchsvoll. Grundsätzlich dürfen radioaktiv kontaminierte Abfälle nur innerhalb der Schweiz entsorgt werden, wohingegen die Entsorgung von Deponiematerial mit konventionellen Schadstoffen (Schwermetalle, PFAS etc.) häufig im Ausland erfolgt. Zwar besteht in der Schweiz die Möglichkeit, radioaktive Abfälle mit geringer

Aktivität mit Zustimmung des BAG auf einer Deponie des Typs E abzulagern, dies ist jedoch für konventionell belastete Abfälle ohne vorherige Behandlung nicht in jedem Fall zulässig. Die Arbeitssicherheitsmassnahmen, welche bei der Sanierung von Deponien mit konventionellen Schadstoffen gefordert werden, sind auch für den Umgang mit radioaktiv kontaminiertem Deponiematerial zweckmässig. Das Personal ist in der Regel im Umgang mit chemischen Schadstoffen vertraut, jedoch kaum mit radioaktiven Materialien. Es ist daher besonders wichtig, das nötige Wissen über die möglichen Gefahren und die richtigen Schutzmassnahmen zu vermitteln. Dazu muss eine Strahlenschutz-sachverständige Person vor Ort verfügbar sein.

Neben möglichen Radiumkontaminationen durch die frühere Anwendung von Leuchtfarbe in der Uhrenindustrie können Deponiematerialien auch erhöhte NORM-Gehalte aufweisen. Damit ist eine Differenzierung zwischen einer Radiumkontamination aus einer künstlichen Quelle und Radium aus dem Zerfall von natürlichem Uran erforderlich, da hierfür andere Befreiungsgrenzen für die Entsorgung gelten.

## **5. Literaturverzeichnis**

- [1] Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz: Erfassung und Verwaltung von ehemaligen Deponien, die radiumkontaminierte Abfälle enthalten können, Endversion vom 17. März 2021; Internet: <https://www.bag.admin.ch/de/radium-altlasten-in-deponien>
- [2] Kanton Solothurn, Amt für Umwelt, Sanierung Stadtmist Solothurn; Internet: <https://stadtmist.so.ch/>
- [3] Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz: Wegleitung Arbeiten auf ehemaligen Deponien, V1.1 10.07.2025; Internet: <https://www.bag.admin.ch/de/strahlenschutz-wegleitungen#BAG-Wegleitungen>

# RADIOLOGISCHE ATTLASTEN IN ÖSTERREICH

Kabrt Franz, Rechenberger Fabian, Dangl Verena, Katzlberger Christian

*Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Österreich*

Die Präsentation behandelt umfassend die Geschichte, Entdeckung und den Umgang mit radioaktiven Altlasten in Österreich. Sie beginnt mit der Entdeckung der Radioaktivität durch Uranerz und Pechblende in der Joachimsthal Mine und führt zu der Produktion von Radium und Thorium in Österreich. Es werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen erläutert, insbesondere die Umsetzung der EU-Richtlinie 2013/59/Euratom innerhalb des österreichischen Strahlenschutzgesetzes 2020. Ein Maßnahmenkatalog für radioaktive Altlasten wird vorgestellt, der Schutzstrategien und Interventionsmaßnahmen umfasst.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Identifizierung und Sanierung von Altlasten. Es wird ein radiologischer Altlasten- und Verdachtsflächenkatalog vorgestellt, der die Priorisierung und Evaluierung von Kontaminationsflächen ermöglicht. Die Zusammenarbeit mit Spezialisten für chemische Altlasten und die Durchführung von Sanierungsarbeiten werden ebenfalls thematisiert. Die Präsentation enthält Beispiele für Sanierungsprojekte, wie die Sanierung einer chemischen Fabrik, bei der kontaminiertes Erdreich und radioaktiver Abfall entsorgt wurden. Ein weiteres Beispiel ist eine Glühstrumpffabrik, wo Dekontaminations- und Abfallmanagementmaßnahmen durchgeführt wurden, einschließlich In-Situ-Messungen und Überwachungsprogramme.

Abschließend wird die Bedeutung von Überwachungsprogrammen betont. Diese umfassen die Etablierung von Überwachungsprogrammen für betroffene Gebiete sowie Ortsdosisleistungsmessungen und Probenahmen zur Überwachung der Kontamination. Die Präsentation unterstreicht die Notwendigkeit der kontinuierlichen Überwachung und Sanierung von radioaktiven Altlasten zum Schutz der Gesundheit, Mensch und Umwelt.

# **VERBESSERUNG DER STRAHLENSCHUTZSITUATION DURCH DIE SANIERUNGSTÄTIGKEITEN DER WISMUT GMBH ANHAND DER FALLBEISPIELE SCHLEMA-ALBERODA UND CROSSEN**

Regner Jens

*Wismut GmbH, Chemnitz, Deutschland*

Im Zeitraum von 1946 bis 1990 wurden durch die SAG bzw. SDAG Wismut insgesamt 216 350 t Uran in die Sowjetunion geliefert. Dazu wurden in Thüringen und Sachsen ein umfangreicher Bergbau und die Aufbereitung von Uranerzen betrieben. Als Quellen für zusätzliche Strahlenexpositionen und Schadstofffreisetzungen waren im Jahr 1990 in der Verantwortung der Wismut GmbH Haldenaufschüttungen im Umfang von über 300 Millionen m<sup>3</sup> und über 160 Millionen m<sup>3</sup> Rückstände der Uranerzaufbereitung vorhanden. Insgesamt waren etwa 3 700 ha von den Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus in Anspruch genommen.

Als Fallbeispiele für die Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus dienen im Beitrag die in Sachsen gelegenen Wismut-Standorte Schlema-Alberoda und Crossen. Bei Schlema-Alberoda handelt es sich um einen Bergbaustandort, während am Standort Crossen das Uranerz aufbereitet und zu Urankonzentrat verarbeitet wurde. Die Strahlenschutzsituation am Standort Schlema-Alberoda ist vorrangig dadurch geprägt, dass umfangreiche Haldenschüttungen in unmittelbarer Nachbarschaft zu Wohngebieten und ein luftgefüllter Resthohlraum der Grube vorhanden sind. Beides hat zur Folge, dass Radon und dessen Emissionen aus den Halden und der Grube eine dominierende Rolle für den radiologischen Aspekt der Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus am Standort spielt. Am Standort Crossen mit den ehemaligen Betriebsflächen der Uranerzaufbereitung und den industriellen Absetzanlagen, auf denen die Aufbereitungsrückstände abgelagert wurden, ist dagegen die Beeinflussung des Wasserpfades der dominierende Faktor bei der Beherrschung der Umweltauswirkungen.

Die mit der Sanierung erreichten Verbesserungen der Strahlenschutzsituation werden für beide Standorte dargestellt und bewertet. Mit der Sanierung gewonnene Erfahrungen und noch zu erfüllende Verpflichtungen zur Beherrschung der Umweltauswirkungen insbesondere im Zusammenhang mit dem Übergang zu Langzeitaufgaben werden beschrieben.

**Session 10**  
**Messtechnik, Beförderung, Notfallmanagement**



# **FORTSCHRITTLICHE SENSORLÖSUNGEN ZUR NEUTRONEN- UND GAMMASTRAHLUNGSDETEKTION VON ARKTIS RADIATION DETECTORS**

Gendotti Ulisse, Tancioni Paolo

*Arktis Radiation Detectors AG, Schweiz*

Arktis Radiation Detectors hat eine Reihe fortschrittlicher Sensoren zur Detektion von Neutronen- und Gammastrahlung entwickelt. In dieser Präsentation werden die wichtigsten Unterschiede und Vorteile der Arktis-Sensortechnologien im Vergleich zu konventionellen Systemen vorgestellt.

## *Neutronenstrahlung:*

Der Arktis S-670-Schnellneutronendetektor basiert auf unter Druck stehendem Helium-4 (He-4) und bietet mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen thermischen Neutronendetektoren. Im Gegensatz zu thermischen Neutronendetektoren ermöglicht der S-670 die direkte Detektion von schnellen Neutronen und bewahrt dabei deren Energie- und Zeitinformationen. Diese Eigenschaften bieten erhebliche Vorteile in verschiedenen Anwendungen der Nuklearindustrie, die im Detail erläutert werden. Ein Vergleich mit Flüssigszintillationsdetektoren zeigt zudem die verbesserte Gamma-Unterdrückung des gasbasierten Systems sowie dessen Leistung im Vergleich zu Flüssig- und Kunststoffszintillatoren.

## *Gammastrahlung:*

Arktis hat außerdem den FPG-Detektor entwickelt – einen großflächigen Gammastrahlungssensor auf Basis von Polyvinyl-Toluol (PVT) als Szintillatormaterial. Im Gegensatz zu traditionellen Systemen, die Photomultiplier (PMTs) verwenden, nutzt der FPG Silizium-Photomultiplier (SiPMs) zur Lichtauslesung. Dieses moderne Design verbessert die Kompaktheit, Robustheit und das Ansprechverhalten des Detektors deutlich und bietet damit klare Vorteile gegenüber älteren Technologien. Diese Verbesserungen und ihre Bedeutung für den Feldeinsatz werden ebenfalls behandelt.

# KRITISCHE DISKUSSION VON “WIEDERHOLT ZÄHLENDE MESSUNGEN MIT ZUFÄLLIGEN EINFLÜSSEN“ GEMÄß DIN ISO 11929-1

Critical discussion of „repeated counting measurements with random influences“ according to DIN ISO 11929-1

Kraut Wolfgang

*Duale Hochschule Baden-Württemberg, Deutschland*

## **Zusammenfassung**

*Die in Anhang A der DIN angegebene Formel (A.1) zur Berechnung des Mittelwerts  $\bar{n}$  und dessen Unsicherheit  $u^2(\bar{n})$  aufgrund  $m$  wiederholter Messungen mit  $m \geq 4$  lautet:*

$$\bar{n} = \sum_{n_j \leq m} n_j / m \quad \text{bzw.} \quad u^2(\bar{n}) = (\bar{n} + ((m-1)/(m-3)) \cdot \bar{n} + \sum_{4 \leq j \leq m} (n_j - \bar{n})^2 / (m-3))$$

*Der Beitrag geht der Frage nach, ob sich tatsächlich nur für  $m \geq 4$  eine akzeptable Lösung des sog. hierarchisch bayes'schen Modells ergibt. In der Praxis hingegen liegen oft nur wenige Messungen vor - sind deshalb Ergebnisse für  $m=3$  oder gar etwa für  $m=2$  grundsätzlich nicht möglich? Oder ist die Einschränkung  $m \geq 4$  nur dem Modell der Herleitung der Formel (A1) geschuldet?*

*Der Beitrag erörtert in diesem Zusammenhang ebenso andere hierarchische Modelle ohne die spezielle Einschränkungen  $m \geq 4$*

## **Summary**

*This report covers the question, why according to DIN ISO 11929-1 the Gaussian hierarchical model requires the restriction ( $m \geq 4$ ) of having at least 4 definite measurement mean values to ensure the uncertainty condition  $u^2(\bar{n}) < \infty$ . This report also addresses the question if there could be nevertheless hierarchical models which apply to less than 4 necessary measurement results.*

**Schlüsselwörter** *wiederholt zählende Messungen, zufällige Einflüsse, DIN ISO 11929-1*

**Keywords** *repeated counting measurements, random influences, DIN ISO 11929-1*

**Schlüsselwörter:** *Erfahrungsrückfluss, Abschirmung, Kollektivdosis, menschlicher Fehler*

**Key words:** *Return of experience, shielding, collective dose, human error*

## **1. Einleitung**

Ergebnisse wiederholt zählender Messung ( $y_1$ - $y_k$ ) werden üblicherweise klassifiziert nach den sog. „Pooling“ Modelleigenschaften (siehe Abb. 1-3):

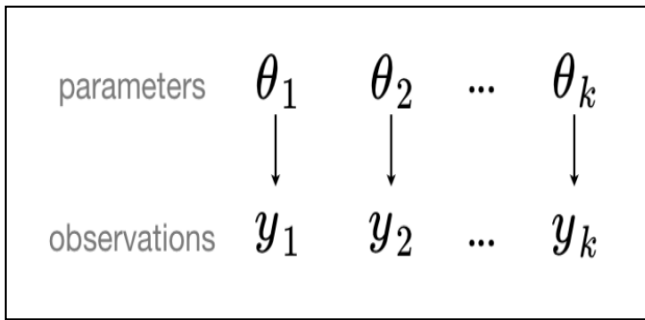


Abb. 1: No-Pooling

Das Messergebnis  $y_j$  hängt nur von den jeweiligen unabhängigen Parameter  $\theta_j$  der Messung  $j$  ab!

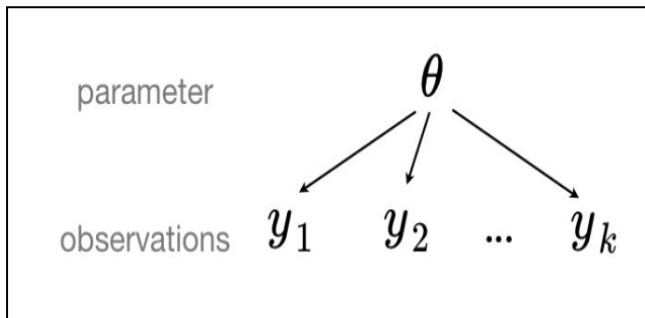


Abb. 2: Complete Pooling

Alle Messergebnisse  $y_i$  hängen jeweils immer von demselben Parameter  $\theta$  ab. Die Kombination aller Messergebnisse  $y_i$  führt deshalb immer nur auf einen Effekt-Parameter  $\theta$ .

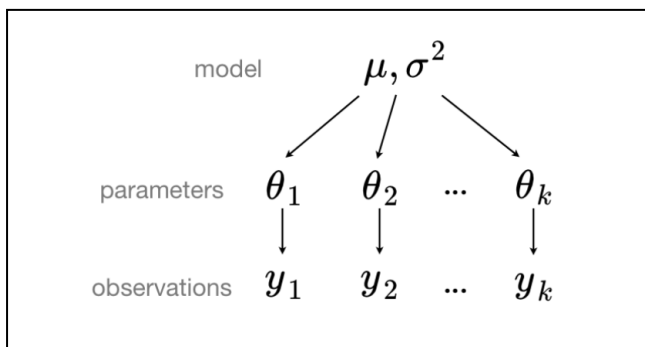


Abb. 3: Partial Pooling, hier Hierarchical-/multilevel Gauss Model

Partial pooling teilt Prior-Informationen zur Messung  $y_i$  über den jeweiligen individuellen Effekt-Parameter  $\theta_i$  und gleichzeitig aber auch noch von  $\theta_j$ ,  $j \neq i$ . Beide,  $\theta_i$  und  $\theta_j$  hängen nämlich über die sog. „Hyper-Parameter“  $\mu$  und  $\sigma^2$  voneinander ab!

Das multilevel Modell nach DIN ISO 11929-1 resultiert letztendlich aus einer Produktbildung der Posteriorverteilungen  $P^*(\mu, \sigma^2 | \dots)$  und  $P^*(\theta | \dots)$ .

## 2. Hierarchical-/multilevel Model nach DIN ISO 11929-1

DIN ISO 11929 verweist für das hierarchischen Gauß-Modell ausschließlich auf die Publikation von Weise et al. [1]. Andere Autoren, wie z.B. Gelman et al. in [2], [3], beschreiben ebenso die Anwendung hierarchischer Gauss-Modelle (z.B. für 'Radon contamination' in [3]). Die Ergebnisse der Modelle von Weise et al. bzw. Gelman et al. lassen sich jedoch nur schwer in Übereinstimmung bringen. So ergibt sich z.B. für  $m=3$  in Gelman et al. in [2] überhaupt keine Divergenz für  $u^2(n)$ . Es wird jedoch explizit darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse sehr empfindlich von der jeweiligen Wahl der a-Priori Wahrscheinlichkeit abhängen!

Nach Bayes ergibt sich eine Produktbildung einer Posteriori Verteilung  $P^*(\mu, \sigma^2, \xi | n, I)$  gemäß

$$P^*(\mu, \sigma^2, \xi | n, I) = P_1(\mu, \sigma^2 | \xi, n, I) * P_2(\xi | n, I) \equiv P_1(\mu, \sigma^2 | \xi, I) * P_2(\xi | n, I) \quad (\text{Gl. 1})$$

Nota bene: Beide Wahrscheinlichkeiten  $P_1$  und  $P_2$  hängen dabei von der gleichen a-Priori Modell- Information  $I$  ab! Umgekehrt muss deswegen auch bei einer Produktbildung, die zu einer Posterior-Verteilung  $P^*(\mu, \sigma^2, \xi | n, I)$  mit a-Priori-Information  $I$  führen sollte (siehe Weise et al. [1], p 44), (Gl. 1) ebenso erfüllt werden.

Jaynes [4, Chapt. 8.9] schreibt in diesem Zusammenhang beim Thema "Combining evidence from different sources" : "We see from this that it is valid to combine the evidence from several experiments if the prior information I ...is the same in all!"

Weise et al. ([1], p 44) kombinieren hingegen zwei verschiedene(!) a-Priori Wahrscheinlichkeiten  $I_1$  bzw.  $I_2$  bei der Produktbildung zur Posterior-Verteilung:

$$P^*(\mu, \sigma^2, \xi | n, I) = P_1(\mu, \sigma^2 | \xi, I_1) * P_2(\xi | n, I_2)$$

mit

$$I_1 \sim 1/\sigma^2 \quad \text{wegen Translationsinvarianz von } \mu\text{-}\xi \text{ bzw. der Skaleninvarianz von } \sigma, \text{ bzw.}$$

$$I_2 \sim 1/\xi \quad \text{wegen Zeitskaleninvarianz von } \xi/t \text{ der Poisson-Verteilung}$$

Damit ist aber  $I_1 \neq I_2 \neq I$ . Nach Jaynes [4]] kann das Produkt so auch nicht die Voraussetzung einer Posteriorverteilung nach Bayes (siehe Gl. 1) erfüllen. Formel (A.1), DIN ISO 11929-1 kann somit auch nicht korrekt die Bedingungen für "wiederholt zählende Messungen mit zufälligen Einflüssen" als Bayes'sche Lösung erfüllen.

### 3. Beispielberechnungen

Wir wollen bei den folgenden Beispielen ausgehen von  $m=3$  Messungen mit folgenden Impuls- werten:  $y_1=15$  ,  $y_2=20$  und  $y_3=25$  mit den jeweiligen Standardabweichungen  $\sigma_i=\sqrt{y_i}$ :

Formel (A.1) der DIN ISO 11929-1:  $\bar{y}=(15+20+25)/3 =20,0$   $\sigma^2(\bar{y}) = \infty$

Gelman et al. ([2], Gleichung 5.20, 5.21):  $\bar{y}=17,99$   $\sigma^2(\bar{y}) =158,67$

Bemerkung: Die Ergebnisse nach Gelman et al. lassen sich nicht einfach analytisch als Formel darstellen. Sie müssen mittels der gewählten a-Priori Verteilung über eine relativ aufwändige Integration gewonnen werden (siehe unten Abb. 4 Gl.5.21 „as guide for the eye“ ) . Im Gegensatz zu Weise et al. ergibt sich hier jedoch auch der Mittelwert  $\bar{y}$  nicht als üblicher arithmetischer Mittelwert sondern als varianzgewichteter arithmetischer Mittelwert (siehe ebenso Abb. 4 Gl.5.20) .

Abb. 4: Ausgangspunkt Hierarchical- /multilevel Gauss Model nach Gelman et al. [2] (Integration über  $\tau$  (Varianz  $\tau^2$ ) und a-Piori-Wahrscheinlichkeit  $p(\tau)$ )

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{j=1}^J \frac{1}{\sigma_j^2 + \tau^2} \bar{y}_{.j}}{\sum_{j=1}^J \frac{1}{\sigma_j^2 + \tau^2}} \quad \text{and} \quad V_{\mu}^{-1} = \sum_{j=1}^J \frac{1}{\sigma_j^2 + \tau^2}. \quad (5.20)$$

$$p(\tau|y) \propto \frac{p(\tau) \prod_{j=1}^J N(\bar{y}_{.j}|\hat{\mu}, \sigma_j^2 + \tau^2)}{N(\hat{\mu}|\hat{\mu}, V_{\mu})}$$

$$\propto p(\tau) V_{\mu}^{1/2} \prod_{j=1}^J (\sigma_j^2 + \tau^2)^{-1/2} \exp\left(-\frac{(\bar{y}_{.j} - \hat{\mu})^2}{2(\sigma_j^2 + \tau^2)}\right), \quad (5.21)$$

### 4. Schlussfolgerungen

- Für ein hierarchisch Gauß'sches -Modell liefert Formel (A.1) nach Anhang A, DIN ISO 11929-1 (aus den in Abschnitt 2. genannten Gründen) einen nicht korrekten Ausdruck zur Bestimmung der „Unsicherheit wiederholt zählender Messungen mit zufälligen

Einflüssen“, sowie auch für den arithmetischen Mittelwert der Messungen. Bei einer zukünftigen Revision der DIN sollte dieser Umstand berücksichtigt werden.

- Alternativ sollte von der Vorgehensweise nach Gelman et al. [2], als korrekter Lösung ausgegangen werden. Sie ist leider etwas aufwändiger, da Sie nicht direkt als Formelausdruck dargestellt werden kann, sondern als Integralgleichung gelöst werden muss. Näherungslösungen können aber angegeben werden!
- Die Frage bleibt aber durchaus vielleicht zu klären, inwieweit wir Ergebnisse für unsere Zwecke nicht auch über ein geeignetes pooling der Daten (siehe Abb.1 - Abb.3) hinreichend genau darstellen könnten. Da ein Partial Pooling oder Hierarchical-/multilevel Gauss Model in der Regel auch immer zu einem sog. „shrinking“ Effekt der Ausgangsvarianzen führt, könnte man vielleicht im Einzelfall auch darauf verzichten und mit etwas größeren Unsicherheiten arbeiten.
- Lassen sich Daten z.B. durch eine Poisson-Verteilung charakterisieren, dann würden sich auch hierarchische Modelle als Formelausdrucke gewinnen lassen (siehe Beispiele in [4], [5],[6]).

## 5. Literatur

[1] *Characteristic Values in Measuring of Ionizing Radiation - Material for a Critical Discussion on Fundamentals and Alternatives*, TÜV Media GmbH, Köln, 2013

[2] A. Gelman et al., *Bayesian Data Analysis*, 2nd. edit., Chapman&Hall, Boca Raton, 2004,  
<https://sites.stat.columbia.edu/gelman/book/BDA3.pdf>

[3] A. Gelman, J. Hill. *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge University Press, 2006

[4] E. Jaynes, *Probability Theory -The Logic of Science*, Cambridge University Press, 2003

<http://www.med.mcgill.ca/epidemiology/hanley/bios601/GaussianModel/JaynesProbabilityTheory.pdf>

[5] A. Downey, *Think Bayes 2*, Example: The Emitter-Detector Problem, 2022

[6] *A Primer on Bayesian Methods for Multilevel Modeling*, GitHub Skills, 2025

# **SICHERER TRANSPORT RADIOAKTIVER STOFFE: WAS BEI DER SCO UND LSA KLASSIFIZIERUNG ZU BEACHTEN IST**

Theinert Myriam<sup>1</sup>, Heinrichs Christina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Urenco Limited*, <sup>2</sup>*GNS mbH, Deutschland*

Mit dem fortschreitenden Rückbau von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen gewinnt der sichere und regelkonforme Transport größerer Komponenten, zusätzlich zu den regulären Transportvorgängen radioaktiver Materialien im industriellen und medizinischen Bereich, zunehmend an Relevanz. Eine zentrale Voraussetzung für den Transport solcher „gefährlicher Güter“ ist deren korrekte Klassifizierung gemäß den internationalen Gefahrgutregelwerken, insbesondere dem Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR).

In diesem Beitrag werden die beiden Klassifizierungen „Surface Contaminated Object“ (SCO) und „Low Specific Activity Material“ (LSA) detailliert gegenübergestellt. Schwerpunkt werden hierbei die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Kontaminations- und Dosisleistungsmessungen sein, insbesondere hinsichtlich der neuen UN-Nummer für SCO-III. Anhand gesetzlicher Grundlagen sowie praxisnaher Beispiele wird erläutert, welche Kriterien für die jeweilige Einstufung maßgeblich sind und welche Herausforderungen sich dabei in der Praxis ergeben.

Darüber hinaus wird die Bedeutung der sogenannten Nebengefahren bei Transporten der Klasse 7 hervorgehoben, da diese bei der Planung und Durchführung von Transporten radioaktiver Stoffe ebenfalls eine Rolle spielen und berücksichtigt werden müssen. Ziel des Beitrags ist es, ein besseres Verständnis für die komplexen Anforderungen an die Klassifizierung und Kennzeichnung radioaktiver Materialien zu schaffen und somit zur Erhöhung der Transportsicherheit beizutragen.

# **VERBESSERUNG DER ZUSAMMENARBEIT ÖSTERREICHISCHER NOTFALLEINSATZKRÄFTE DURCH ABHALTUNG VON STRAHLENSCHUTZ-WORKSHOPS**

Bayer Thomas

*Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Geschäftsfeld Strahlenschutz, Gruppe Radioökologie und Notfallvorsorge, Linz, Österreich*

Die Notfalleinsatzkräfte der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES) sind im Rahmen der gesamtstaatlichen Notfallpläne der Republik Österreich fest verankert. Sie übernehmen im Ereignisfall spezifische Aufgaben und können, sofern erforderlich, in allen relevanten Szenarien der Teilpläne auch direkt vor Ort zum Einsatz kommen und leisten dadurch essenzielle Beiträge zur Lagebewältigung. Alle Notfalleinsatzkräfte verfügen über eine 90-stündige Basisausbildung gemäß Interventionsverordnung 2020. Zur Sicherstellung ihrer Einsatzfähigkeit und Fachkompetenz sind die Notfalleinsatzkräfte gesetzlich verpflichtet, jährlich eine mindestens 16-stündige Fortbildung zu absolvieren zusätzlich erhalten sie schwerpunktabhängige Spezialschulungen.

Zur Sicherstellung der Einsatzbereitschaft organisiert die AGES regelmäßig praxisorientierte Strahlenschutzworkshops und Notfallübungen in enger Zusammenarbeit mit Behörden und anderen Einsatzorganisationen.

Im Jahr 2024 fand ein zweitägiger Strahlenschutz-Workshop für die Notfalleinsatzkräfte der AGES und der Mobilen Einsatzgruppe der Nuclear Engineering Seibersdorf statt. Aufbauend auf den Erfahrungen dieses Workshops folgte 2025 ein weiterer zweitägiger Workshop mit Strahlenspürern des Innenministeriums (BMI) und den Notfalleinsatzkräften der AGES. Ziel war es, anhand praxisnaher Szenarien neben der fachlichen Weiterbildung die Zusammenarbeit zwischen den Institutionen im radiologischen Notfall zu vertiefen und die Einsatzkoordination untereinander zu trainieren.

Diese Workshops stellen einen wesentlichen Beitrag zur kontinuierlichen Verbesserung und Koordinierung der österreichischen Notfallstrukturen dar und unterstreichen die Bedeutung regelmäßiger Fortbildungsmaßnahmen für eine effektive Krisenbewältigung auf nationaler Ebene.

In diesem Beitrag werden zuvor genannten Workshops sowie die wesentlichen Erkenntnisse daraus vorgestellt.

# URANANREICHERUNG IN DEUTSCHLAND UND DIE ZUKUNFT DES STRAHLENSCHUTZES

Buttig Felix

*Urenco Deutschland*

Die Urananreicherung stellt einen zentralen Bestandteil der nuklearen Brennstoffkreisläufe dar. In Deutschland und der Welt ist sie von signifikanter Relevanz. Die Entwicklung der Urenco in der Welt und in Deutschland sind zukunftsweisend.

In diesem Vortrag werden die Grundlagen der Urananreicherung, die Geschichte der Anreicherung, die Herkunft des Urans, die internationale Marktentwicklung, die Entwicklung der Urananreicherung sowie die Zukunftsaussichten des Standorts Deutschland und der Urenco Gruppe weltweit dargestellt.

Darüber hinaus wird ein besonderer Fokus auf die Zukunft des Strahlenschutzes gelegt. Anhand von Fallbeispielen wird demonstriert, wie Strahlenschutz in der Praxis umgesetzt wird und welche Herausforderungen sich dabei ergeben.

Das Ziel des Vortrags besteht darin, ein fundiertes Verständnis für die komplexen Zusammenhänge zwischen Technologie, Sicherheit und Regulierung im Bereich der Urananreicherung zu vermitteln.



**Session 11**  
**Entsorgung/ Abfallmanagement**



# MONTE-CARLO-SIMULATIONEN VON STRAHLUNGSFELDERN IN TIEFENGEOLOGISCHEN ENDLAGERN FÜR ABGEBRANNTE BRENNLELEMENTE UND ZUGEHÖRIGE DOSIMETRISCHE ASPEKTE

Becker Frank<sup>1</sup>, Biswas Sushant<sup>2</sup>, Dagan Ron<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland; <sup>2</sup>Universität Stuttgart, Deutschland

## **Zusammenfassung**

*Die Einlagerung von Behältern mit hochradioaktiven Abfällen in tiefengeologischen Wirtsgesteinsformationen kann mit erhöhten Strahlenbelastungen des Personals einhergehen. Es wurden verschiedene Aspekte beim Aufenthalt in Einlagerungsstrecken untersucht. Dazu gehören die Fragestellungen, wie sich der Einfluss der Neutronenstreuung auswirkt, der Dosis(leistung)verlauf vom Abstandsquadratgesetz einer Punktquelle abweicht, welche Konsequenz das Wirtsgestein mit sich bringt und welche Effekte verschiedene Stollengeometrien hervorbringen. Dazu wurden Monte-Carlo-Simulationen mit einem repräsentativen Modell eines Endlagerbehälters in Einlagerungsstrecken für verschiedene Wirtsgesteine durchgeführt. Dabei wurden auch verschiedene Stollengeometrien untersucht.*

**Schlüsselwörter** Monte-Carlo-Simulationen, hochradioaktive Abfälle, Endlager, Neutronendosis(leistung), tiefengeologische Einlagerungsstrecken

**Key words** Monte Carlo simulations, high-level radioactive waste, final repositories, neutron dose (rate), deep geological disposal facilities

## **1. Einleitung**

Die Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen aus kommerziellen Kernkraftwerken in tiefen geologischen Formationen gilt als vielversprechendes Konzept zur Lösung der komplexen Aufgabe der nuklearen Abfallentsorgung. Ein typisches Konzept für die tiefe geologische Endlagerung sieht einen Abschirmbehälter für die Abfälle vor, der wiederum unterirdisch in einem Stollen innerhalb einer Wirtsgesteinsformation eingelagert wird. Bestimmte Arbeitsvorgänge, wie beispielsweise die Platzierung des Abschirmbehälters im Stollen, die Entnahme oder Rückgewinnung der nuklearen Abfälle aus dem Endlager, können zusätzliche personenbezogene Maßnahmen in den Entsorgungsanlagen erfordern und somit zu einer erhöhten Strahlenbelastung für die beteiligten Arbeiter führen.

Das Strahlenfeld und damit die Dosis(leistung) innerhalb eines Stollens wird durch die von den umgebenden Wirtsgesteinsschichten zurückgestreuten Neutronen dominiert, wie in einer früheren Studie gezeigt wurde.

Mit dem Monte-Carlo-Code MCNP<sup>®</sup> wurde ein repräsentatives Modell eines POLLUX<sup>®</sup>-Behälters in einem Stollen für abgebrannte Brennelemente erstellt. Dieses Modell wurde verwendet, um Dosis(leistungen) bzw. Neutronenflüsse für verschiedene Stollenmaterialien und -geometrien zu berechnen.

## **2. Abgebrannte Brennelemente als Neutronenquelle**

Basierend auf dem durchschnittlichen Bestand an abgebrannten Brennelementen aus Druckwasserreaktoren in Deutschland [1] wurde eine repräsentative Abfallmenge von 90 % Uranoxid-Brennstoff und 10 % Mischoxid-Brennstoff mit einem durchschnittlichen Abbrand

von 55 GWd/t(HM) gewählt. Mit dem Online-Programm Nucleonica [2] wurde die verbleibende Aktivität der abgebrannten Brennelemente nach 50 Jahren berechnet.

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass Neutronen das Strahlungsfeld und die Exposition außerhalb des Abschirmungsbehälters dominieren [3, 4]. Der Beitrag der rückgestreuten Neutronen der Wirtsgesteinsschichten oder der Betonauskleidung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle [5]. Daher wurden nur diejenigen Isotope berücksichtigt, die einen wesentlichen Beitrag zur Neutronenaktivität leisten. Die Neutronenproduktionsraten und -spektren wurden unter Berücksichtigung von Neutronen aus spontaner Spaltung, ( $\alpha$ ,n)-Reaktionen und verzögerter Neutronenemission mit dem Code SOURCES-4C [6] bestimmt. Die Neutronenquellenstärke ergab sich daraus als  $2,13 \times 10^9$  Neutronen/s. Es wurde ein Neutronenenergiespektrum generiert, so dass eine für die abgebrannten Brennelemente repräsentative Neutronenquelle definiert werden konnte.

### 3. Monte Carlo Simulationen

Es wurde der Monte-Carlo Code MCNP<sup>®</sup> in der Version 6.2 [7] verwendet, um das Strahlungsfeld um einen POLLUX<sup>®</sup>-Einlagerungsbehälter [8, 9] zu berechnen, der mit abgebrannten Brennelementen beladen ist. Dazu wurden die oben genannten Neutronenquelleneigenschaften verwendet, um eine repräsentative Volumenquelle im POLLUX<sup>®</sup> einzusetzen. Insgesamt wurden für die Simulationen die folgenden Annahmen und Vereinfachungen getroffen: Für die Struktur des POLLUX<sup>®</sup>-Behältermodells in MCNP<sup>®</sup> wurde angenommen, dass die abgebrannten Brennelemente im Inneren des Behälters homogen in einer zylindrischen Geometrie innerhalb der aktiven Zone verteilt waren. Die inaktiven Zonen an den oberen und unteren Enden der abgebrannten Brennelemente wurden als aus Zirkalloy bestehend modelliert. Zusätzlich wurden dem Behälterdesign Finnelemente hinzugefügt, um auch diese Wärmeübertragungselemente zu berücksichtigen. Zur Berechnung der Dosisleistungen bzw. Neutronenflüsse an verschiedenen Stellen wurden Punktdetektortallies (F5) eingesetzt. Um zu vermeiden, dass der Teilchentransport durch den Behälter für verschiedene Anordnungen in Einlagerungsstrecken wiederholt berechnet werden muss, wurde eine Oberflächenquelle für einen repräsentativen POLLUX<sup>®</sup>-Behälter in freier Luft erstellt, die nur Neutronen beinhaltet, die die Außenfläche des Behälters passieren. Dies wurde mit der in MCNP<sup>®</sup> implementierten Funktion „Surface Source Write“ (SSW) erreicht. Die auf diese Weise erzeugte Neutronenoberflächenquelle konnte nun in verschiedenen Anordnungen als POLLUX<sup>®</sup>-Repräsentant wiederverwendet werden, wodurch sich die Rechenzeiten erheblich verkürzten.

Es wurden Einlagerungsszenarien untersucht, bei denen POLLUX<sup>®</sup>-Behälter horizontal in einem Stollen platziert wurden. Die Stollengeometrien orientierten sich an den generischen Tiefenlagermodellen nach Stahlmann et al. [10].

Es wurden zwei verschiedene Einlagerungsstrecken untersucht und Simulationen für einen geraden Stollen und einen Stollen mit rechtwinkliger Geometrie durchgeführt.

### 4. Ergebnisse und Diskussion

Da gestreute Neutronen eine bedeutende Rolle für das Strahlungsfeld in einem Stollen spielen, wurden die Szenarien „frei in der Luft“, „in Salz“ und „in Beton“ untersucht. Letzteres als Repräsentant für Wirtsgesteinsschichten mit Betonauskleidung. Im Vergleich zu Behältern in freier Luft ist zu den in Salzstollen platzierten Behältern ein Anstieg des Neutronenflusses für das Steinsalz-Szenario im Energiebereich von 0,02 bis 1 MeV zu verzeichnen. Dieser Anstieg ist bei größeren Abständen zum Behälter noch ausgeprägter. Das Szenario mit Betonauskleidung zeigt im Vergleich zu Steinsalz einen weniger ausgeprägten Anstieg.

Allerdings ist insbesondere bei größeren Abständen ebenfalls ein Anstieg im Vergleich zu „frei in der Luft“ sichtbar. Darüber hinaus weist das Betonszenario eine signifikante Menge an thermischen Neutronen im Bereich von  $10^{-8}$  bis  $10^{-6}$  MeV auf. Dies ist in den beiden anderen Szenarien nicht der Fall. Insgesamt tragen die von den Stollenwänden zurückgestreuten Neutronen erheblich zum Gesamtstrahlungsfeld in der Einlagerungsstrecke bei, insbesondere mit zunehmender Entfernung vom Behälter. Im Gegensatz zum Wirtsgestein Steinsalz zeichnen sich die Betonschichten durch die Erzeugung thermischer Neutronen aus. Diese Thermalisierungseigenschaft wird auf den Anteil leichter Isotope im Beton zurückgeführt. Insbesondere der Wassergehalt bzw. der Wasserstoffanteil spielt als Moderator eine wichtige Rolle.

Im Vergleich zum Szenario „frei in der Luft“, welches als Punktquelle mit dem Abstandsquadratgesetz für die Dosis(leistung) einhergeht, ist im geraden Stollen eine Annäherung an das reziproke Abstandsgesetz zu beobachten.

Im Vergleich dazu konnte für das Szenario des Stollens mit rechtwinkliger Geometrie eine Erhöhung der Dosis(leistung) im Bereich des  $90^\circ$ -Abzweigs zu beobachten. Im Vergleich zur geraden Einlagerungsstrecke ist für das Wirtsgestein Steinsalz ein Anstieg um bis zu 60% und bei Beton sogar um 90% zu verzeichnen, wenn man sich im Abzweigsbereich auf der Zentralachse des Stollens bewegt.

## 5. Fazit

Gestreute Neutronen spielen eine bedeutende Rolle für das Strahlungsfeld in einer Einlagerungsstrecke für hochradioaktive Abfälle aus kommerziellen Kernkraftwerken in tiefen geologischen Formationen.

Es konnte gezeigt werden, dass das Wirtsgestein bzw. eine Betonauskleidung einen entscheidenden Einfluss auf das Strahlungsfeld und die Dosis(leistung) haben, welches eher mit einem reziproken Abstandsgesetz anstelle des Abstandsquadratgesetzes einhergeht.

Das Szenario einer geraden Einlagerungsstrecke mit Betonauskleidung zeigt im Vergleich zum Wirtsgestein Steinsalz einen weniger ausgeprägten Anstieg. Allerdings weist das Betonszenario eine signifikante Menge an thermischen Neutronen auf. Dies kommt beim Stollen mit rechtwinkliger Geometrie zum Tragen. Es konnte gezeigt werden, dass man beim „um die Ecke gehen“ eine deutlich höhere Dosis(leistung) auftritt. Bei Abzweigungen im Stollen ist mit erhöhten Rückstreuanteilen zurechnen, so dass fast doppelt so hohe Dosis(leistungs)werte im Vergleich zu geraden Einlagerungsstrecke auftreten können.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Peiffer, F.; McStocker, A.: Abfallspezifikation und Mengengerüst, Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung. Bericht zum Arbeitspaket 3 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, 2011
- [2] Nucleonica GmbH: Nucleonica Nuclear Science Portal ([www.nucleonica.com](http://www.nucleonica.com)), Version 3.0.661, Karlsruhe, 2024
- [3] Saurí Suárez, H.: Individual dosimetry in disposal facilities for high-level nuclear waste. PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2018
- [4] Pang, B.; Saurí Suárez, H.; Becker, F.: Individual dosimetry in disposal repository of heat-generating nuclear waste. Radiation Protection Dosimetry, 170, 387-392, 2016

- [5] Saurí Suárez, H.; Pang, B.; Becker, F.; Metz, V.: Monte-Carlo based comparison of the personal dose for emplacement scenarios of spent nuclear fuel casks in generic deep geological repositories. *atw*, International Journal for Nuclear Power 62, 384-388, 2017
- [6] Wilson, W.B. et al.: SOURCES 6C: A Code for Calculating (alpha, n), Spontaneous Fission, and Delayed Neutron Sources and Spectra. Ed. by W.B. Wilson. American Nuclear Society / Radiation Protection and Shielding Division, 2022
- [7] Werner, C. J. et al.: MCNP User's Manual Code Version 6.2. Tech. rep. LA-UR-17-29981. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory. URL: <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-reporlareport/LA-UR-17-29981>, 2017
- [8] Janberg, K.; Spilker, H.: Status of the Development of Final Disposal Casks and Prospects in Germany. *Nuclear Technology* 121(2), pp. 136–147. DOI: 10.13182/NT98-A2826, 1998
- [9] Filbert, W.; Engelmann, H.J.; Heda, M.; Neydek, J.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) - Handhabungsversuche zur Streckenlagerung. Tech. rep. 82. Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 1995
- [10] Stahlmann, J.; Leon Vargas, R.; Mintzlaff, V.: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Research rep. TU-Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Germany, 2015

## **STRAHLENSCHUTZ UND ABFALLBEWIRTSCHAFTUNG BEI DER MB-MICROTEC AG**

Dubios Maxime

*mb-microtec ag, Schweiz*

Ein Beispiel für den angewandten Strahlenschutz bei der Arbeit mit Tritium in der Uhrenindustrie in der Schweiz. Welche Hauptunterschiede gibt es zur Atomindustrie oder zum medizinischen Bereich? Es werden die wichtigsten Herausforderungen bei der Arbeit mit Tritium vorgestellt: Messung der Kontamination und Auswertung der Abluft- und Abwasserabgaben, Gesetze, Bewilligungen und Grenzwerte, Dosimetrie vom strahlenexponierten Personal, Abfälle. Schließlich liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung eigener Verfahren für das Recycling oder die Konditionierung von tritiumhaltigen Abfällen.

# **FREIGABE VON BODEN – DIE FLUR VON ERDREICH, BODENFLÄCHEN UND BAUWERKEN**

Harstrick Alexander, Baschke M.

*AFRY Deutschland GmbH, Mannheim, Deutschland*

## **Zusammenfassung**

*Den Freigabewerten der Strahlenschutzverordnung liegen definierte Szenarien und Expositionspfade zu Grunde. Mit einem Verständnis dieser Szenarien können Materialien, die in der StrlSchV nicht eindeutig benannt sind, leichter einem passenden Freigabepfad und -verfahren zugeordnet werden. So sind bei der Freigabe von Boden, Bodenflächen und Bodenaushub vor allem die Materialeigenschaften entscheidend, ob diese durchwurzelbar (als fruchtbarer Oberboden/Mutterboden verwendbar) sind oder nicht. Dies bestimmt, welche Freigabewerte der StrlSchV anzuwenden sind. So kann z.B. Boden zwar im Sinne der DIN 25457 als versiegelte Bodenfläche messtechnisch zu bewerten sein, muss aber nicht zwangsläufig im Sinne der Strahlenschutzverordnung als Bodenfläche freigegeben werden.*

***Schlüsselwörter** Freigabe, Boden, Erdreich, Bodenflächen, Bauwerke, Materialeigenschaften*

## **1. Einleitung**

Vor der Entlassung des Geländes einer kerntechnischen Anlage aus dem atom- und strahlenschutzrechtlichen Geltungsbereich ist neben der Freigabe von Strukturen auch die Freigabe von (Boden-) Flächen erforderlich.

Gerade Boden erhält in mehreren Rechtsbereichen aufgrund seiner Eigenschaften und Fruchtbarkeit einen schützenswerten Status. So sind auch im Strahlenschutzrecht aufgrund der potenziellen Nachnutzungsvarianten restriktive Vorgaben vorhanden. Mit Änderungen des Strahlenschutzrechts, bspw. durch die 4. StrlSchVÄndV, haben sich insbesondere für die durchwurzelbare Bodenschicht Einschränkungen ergeben.

Die Vorgaben für Böden basieren auf unterschiedlichen Szenarien, vgl. Kapitel 0. Jedoch sind diese Szenarien teilweise nicht stringent in den verschiedenen Verordnungen, Normen und weiteren Regelungen abgebildet. Diese Lücken können zu Interpretationen führen, welche in der praktischen Umsetzung der Freigabe ggf. Herausforderungen und unnötig konservative Freigabeverfahren zur Folge haben. Sogar schützenswerter Boden könnte somit der Kreislaufwirtschaft unnötigerweise entzogen werden.

Im Folgenden wird dargelegt, was als Boden und was als Bauwerk einem Freigabeverfahren zugeführt werden sollte. Begründet wird dies u.a. auf Basis der Definitionen von Gesetzen, Verordnungen und Normen sowie insbesondere auf Basis der Materialeigenschaften, die einer in den Szenarien berücksichtigten Nutzung entsprechen.

## **2. Modellbetrachtungen als Basis für die Freigabewerte**

Die deutsche Gesetzgebung im Strahlenschutzrecht orientiert sich an den europäischen Regelungen sowie der IAEO und setzt diese um. Hierbei wurden Modellbetrachtungen für verschiedene Expositionspfade durchgeführt. Basierend darauf wurden Freigabewerte für Radionuklide und „Freigabepfade“ errechnet, sodass die Strahlenbelastung/Dosis der Bevölkerung im Bereich von 10 Mikrosievert pro Kalenderjahr liegt. Diese Dosis wird als

vernachlässigbar angesehen, insbesondere unter Berücksichtigung der zivilisatorischen und natürlichen Strahlenbelastung [1].

## 2.1 Modellbetrachtungen der IAEO, EU und BRD

In den Safety Report Series der IAEO und in den Radiation Protection Reports der Europäischen Kommission wurden für künstliche Radionuklide unterschiedliche Szenarien betrachtet. Aus diesen Szenarien heraus wurden Expositionspfade mit entsprechenden Parametern bestimmt [2]. Für Boden sind insbesondere die Berichte Safety Report Series No. 44 und Radiation Protection No. 157 relevant.

Im Rahmen der Novellierung der Strahlenschutzgesetzgebung im Jahr 2018 wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz Studien in Auftrag gegeben, die diese Szenarien, mit denen der StrlSchV zugrundeliegenden Szenarien abgleichen, vgl. BfS-Vorhaben 3614S70051 [3]. Für den Pfad der Ingestion wird folgendes beschrieben:

*„11.4 Szenarien für die Ingestion (Übersetzung von Abschnitt 4.3.3 des Safety Report 44)  
[...] Der Anbau von Pflanzen in Böden, die freigegebenes Material enthalten, kann beispielsweise in folgenden Situationen auftreten: freigegebener Bauschutt liegt im Erdreich in kleinen Anteilen vor; Erdreich, das von einem kerntechnischen Standort freigegeben wurde, wird in einem Garten oder zur Abdeckung einer Deponie verwendet, die später als Naherholungsgebiet genutzt wird; ein kerntechnischer Standort wird zur allgemeinen Nutzung freigegeben. Das Nahrungsmittelszenario RL-A deckt den Fall eines Erwachsenen ab, der Gemüse aus solchen Situationen verzehrt, analog RL-C für Kinder. [...]“*

Auch wenn in dem zuvor genannten Szenario Ingestion durch Nahrungsmittel berücksichtigt wurde, spiegelt dies nicht die Szenarien wider, die den Freigabewerten für Bodenflächen der Strahlenschutzverordnung zugrunde liegen. Diese wurden für die Strahlenschutzverordnung von 2001 [4] im Rahmen des BMU-Vorhabens SR 2271 “Stilllegung von Kernanlagen - Freigabe von Bodenflächen kerntechnischer Standorte” [5] ermittelt.

Dabei wurden mehrere Nutzungsmöglichkeiten mit entsprechenden Expositionspfaden betrachtet. Ins Strahlenschutzrecht wurde lediglich die uneingeschränkte Nutzung übernommen. Bei einer uneingeschränkten Freigabe dürfen keine Restriktionen an die spätere Nutzung, sei es als Industrie- oder Baugebiet, zur Naherholung oder zum Nahrungsmittelanbau, gestellt werden.

## 2.2 Änderungen des Strahlenschutzrechts in Bezug auf Boden

In der Novellierung der Strahlenschutzverordnung wurden basierend auf den zuvor genannten Szenarien und den damit verbundenen Parametern Korrekturen durchgeführt. Zum einen ist die Klarstellung in der Anpassung von 2018 in der Freigabe von Bauschutt von Bedeutung. Die vorherige Formulierung von „Bauschutt und Bodenaushub“ wurde in „Bauschutt“ durch Streichung des Wortes Bodenaushub angepasst, da die Szenarien, die den Grenzwerten zu Grunde liegen, lediglich anhaftenden Bodenaushub und nicht Bodenaushub im Allgemeinen berücksichtigten. [1]

Nach dieser Änderung waren für eine uneingeschränkte Verwendung von Boden/-aushub sowohl die „uneingeschränkte Freigabe“ mit den Freigabewerten der Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV als auch die „Freigabe von Bodenflächen“ mit den Freigabewerten der Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 7 StrlSchV möglich.

Da jedoch eine Freigabe (größerer Mengen) an Bodenaushub zur uneingeschränkten Freigabe eine Überschreitung des 10 Mikrosievert-Konzeptes durch Sekundäringestion zur Folge haben könnte, folgte eine weitere Korrektur. Die Entsorgungskommission schreibt in ihrem Informationspapier [6] hierzu:

*„Für die Freigabe von Bodenflächen sind die hierfür einschlägigen Freigabewerte heranzuziehen. Bei der Freigabe von Bodenaushub sind die Werte für eine uneingeschränkte Freigabe im Falle einer großflächigen Wiederverwendung des Bodenaushubs als Mutterboden/Oberboden nicht abdeckend, da dann Szenarien des Pflanzenanbaus oder der Trinkwassergewinnung zu berücksichtigen sind.“*

Mit der 4. StrlSchVÄndV [7] wurde 2024 zudem die uneingeschränkte Freigabe von Bodenaushub, der nicht als durchwurzelbare Bodenschicht verwendet werden kann, begrenzt. *„Teil B Nummer 3 legt eine Massegrenze für die uneingeschränkte Freigabe von Bodenaushub fest, wobei der Bodenaushub nicht als durchwurzelbare Schicht aufgebracht werden kann. [...] Als weitere Voraussetzung darf nur Bodenaushub uneingeschränkt freigegeben werden, wenn er aufgrund seiner stofflichen Beschaffenheit, z.B. sogenannter Unterboden, nicht als durchwurzelbare Schicht geeignet ist, auf ihm also keine Kultivierung von Pflanzen möglich ist, die in die Nahrungskette einfließen können.“*

### 2.3 DIN Normen in der Freigabe – Einteilung von Böden

Normen stellen den Stand der Technik dar und definieren u.a. technische Vorgehensweisen. In der radiologischen Freigabe ist die DIN 25457 als relevante Norm zu nennen. In diesem Zusammenhang sollen lediglich die Definitionen betrachtet werden.

In der DIN 25457-7 [8] wird das technische Vorgehen zur Freigabe von Bodenflächen und -aushub beschrieben. In Kapitel 3 der DIN 25457-7 werden die Begriffe erläutert. So finden sich folgende Definitionen:

Bodenfläche

*„alle außerhalb von Gebäuden einer Anlage liegenden Freiflächen des Anlagengeländes“.*

versiegelte Bodenfläche

*„Bodenfläche mit vollständiger oder teilweiser Abdichtung des Bodens zur Atmosphäre hin durch Deckbeläge, Baumaterial oder in den Boden eingebrachtes Fremdmaterial“*

Bodenaushub

*„Bodenmaterial, das durch Ausheben oder Abräumen von Boden oder Untergrund – auch nach Umlagerung – anfällt“*

Im Anhang D dieser Norm findet sich zum Bodenaushub zusätzlich die Fußnote

*„<sup>a</sup> Von Teilflächen des Anlagengeländes, wie sie z. B. bei Umbau oder Neubaumaßnahmen ausgekoffert werden und in Mengen vorliegen, die eine großflächige Verwendung als Mutterboden/Oberboden ausschließen.“*

In der DIN findet sich dementsprechend ebenfalls ein Zusammenhang mit der durchwurzelbaren Bodenschicht, dort als Mutterboden/Oberboden bezeichnet. Weiterhin werden versiegelte Bodenflächen erwähnt, die bauliche Anlagen darstellen, vgl. Kapitel 3.2.

In der DIN 25457-6 [9] werden Gebäude (bauliche Anlagen) behandelt. Sie beschreibt das Vorgehen bei der Freigabe von Gebäuden sowie Bauschutt und besitzt ebenfalls für die weitere Diskussion eine relevante Definition. Hier wird Bauschutt als

*„vorwiegend mineralisches Material unterschiedlicher Größe und von unregelmäßiger Struktur, das bei Abbruch- oder Änderungsarbeiten von Gebäuden anfällt“*

beschrieben. Diese Definition besitzt somit Überschneidungen mit der Definition von teilversiegelten Böden, was einen Zusammenhang zwischen Bauwerken und (teil-)versiegelten Böden darstellt.

## 3. Böden und Bauwerke

Wie im vorherigen Kapitel aufgeführt, ist für die Freigabe das Material mit seinen Eigenschaften essenziell, da bei den Szenarien und Expositionspfaden zur Ermittlung der

Freigabewerte bestimmte Materialien mit charakteristischen Eigenschaften zugrunde gelegt wurden. Um die Freigabepfade der Strahlenschutzverordnung sowie die Definitionen der DIN 25457 besser verstehen zu können, soll im Weiteren der Boden, um das sich die Freigabe bei Bodenflächen/-aushub dreht, behandelt werden.

### 3.1 Böden und ihre Eigenschaften

Die Böden liegen i.d.R. in Schichten bzw. Horizonten vor. Diese werden anhand ihrer Lage sowie der Eigenschaften charakterisiert und einem definierten Horizont zugeordnet. Der oberste Horizont ist oftmals eine Schicht, die durch einen hohen Anteil an organischem Material mit Kohlenstoff (Humus) gekennzeichnet ist, was diese so fruchtbar macht. Darauf folgt verallgemeinert in die Tiefe ein Horizont aus Mineralboden, der durch Zersetzung des anstehenden Gesteins entsteht. Die „unterste“ Schicht bildet i.d.R. das Ausgangsgestein, das kaum oder gar nicht verwittert ist.

Für diese Schichten gibt es weitere etablierte Bezeichnungen. So wird beispielsweise der Begriff „Oberboden“ für die ständig bearbeitete Schicht (Krume) von Äckern sowie die stark durchwurzelte Bodenschicht von Grünflächen verwendet. In der Praxis sind diese Schichten bei Äckern circa 35cm mächtig bzw. circa 10cm bei Grünflächen. Darunter folgt der Unterboden.

Neben den enthaltenen Bestandteilen wie Mineralien und Kohlenstoff ist für die Fruchtbarkeit das Bodenleben wesentlich. In den Hohlräumen der Böden leben Bodenorganismen, die diesen erst „aktiv“ machen. Durch die Kombination an Mineralien, organischem Material (Humus), Bodenorganismen, Durchwurzelbarkeit (Bodenstruktur) und Feuchtigkeit wird ein Boden ausreichend fruchtbar und ist zur Nahrungsmittelproduktion geeignet.

Dem gegenüber stehen Technosole, vom Menschen beeinflusste Böden bzw. versiegelte Böden. Auch diese weisen Mineralien, Feuchtigkeit und Kohlenstoffverbindungen auf. Jedoch können hier die Kohlenstoffverbindungen nicht nur förderlich (bspw. in Form von Küchenabfällen), sondern auch schädlich sein. Beispiele hierfür sind Rückstände aus der Petrochemie wie Teer. In diesen Böden findet jedoch meist kein Bodenleben statt [10, 11].

Entsprechend ist ein Schutz von natürlichem und vor allem fruchtbarem Boden erforderlich.

### 3.2 Böden und Bauwerke in rechtlichen Bestimmungen

In Deutschland gibt es aus diesem Grund u.a. das „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten“ (BBodSchG) und die „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung“ (BBodSchV).

Außerdem machen weitere Verordnungen und Regelungen Vorgaben zum Schutz der Böden. So regelt der §202 des Baugesetzbuches [12]:

*„Mutterboden, der bei der Errichtung und Änderung baulicher Anlagen sowie bei wesentlichen anderen Veränderungen der Erdoberfläche ausgehoben wird, ist in nutzbarem Zustand zu erhalten und vor Vernichtung oder Vergeudung zu schützen.“*

Um den Boden zu schützen, müssen seine Eigenschaften wie Bodenleben, Humusanteil sowie Bodenstruktur erhalten oder verbessert werden.

Neben den Böden ist für die Diskussion von Relevanz, wie sich Böden und bauliche Anlagen (Bauwerke) abgrenzen. Hierzu ist die Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO BW) eine Orientierung. In §2 Abs. 1 und Abs. 2 LBO [13] gibt es folgende Begriffsdefinitionen:

*„(1) Bauliche Anlagen sind unmittelbar mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen. Eine Verbindung mit dem Erdboden besteht auch dann, wenn die Anlage durch eigene Schwere auf dem Boden ruht oder wenn die Anlage nach ihrem*

*Verwendungszweck dazu bestimmt ist, überwiegend ortsfest benutzt zu werden. Als bauliche Anlagen gelten auch*

- 1. Aufschüttungen und Abgrabungen,*
- 2. Ausstellungs-, Abstell- und Lagerplätze,*

*[...]*

*6. Stellplätze.*

*(2) Gebäude sind selbständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen.“*

Entsprechend liegen versiegelte und teilversiegelte Böden, wie sie in der DIN 25457-7 [8] definiert sind mit dieser Definition aus dem Baurecht als bauliche Anlagen (Bauwerke) vor. Ebenso gibt es Überschneidungen mit der Definition von Technosolen.

#### **4. Diskussion – Boden als Erdreich oder Bauwerk freigeben**

In Kapitel 0 wurde kurz dargelegt, dass definierte Szenarien zu den Freigabewerten für Bodenflächen/-aushub geführt haben. Die Rahmenbedingungen aus den Szenarien, die den Freigabewerten zugrunde liegen, gehen nicht eindeutig aus dem Text der StrlSchV hervor. Trotz bisheriger Anpassungen und Konkretisierungen lässt die StrlSchV weiterhin Spielraum für Interpretationen.

Beispielsweise ist nicht eindeutig definiert, wie mit Technosolen umgegangen werden soll. Auf Industrieanlagen sind z.B. obere Bodenhorizonte vorhanden, die aufgrund ihrer Bodeneigenschaften nicht für den Nahrungsmittelanbau geeignet und als bauliche Anlagen zu betrachten sind. Diese Bodenhorizonte stimmen nicht mit den Szenarien für die Freigabe von Bodenflächen überein.

Die DIN 25457-7 befasst sich mit versiegelten Bodenflächen. Dabei geht es jedoch lediglich darum, dass das praktische Vorgehen zur radiologischen Bewertung und Freigabe von offenen und versiegelten Bodenflächen vergleichbar ist bzw. vergleichbarer als die Bewertung von Gebäuden und versiegelten Bodenflächen.

Mit den Begriffserklärungen der Landesbauordnung [13] wird erkennbar, dass versiegelte Bodenflächen per Definition zu Gebäuden bzw. Bauwerken zählen. Dies wird durch die Gegenüberstellung der erforderlichen Eigenschaften eines fruchtbaren Oberbodens zu den Eigenschaften von versiegelten Flächen oder auch Schotterschichten (vgl. Technosole) untermauert.

Weiterhin kann unterhalb von Bauwerken und Gebäuden aus mehreren Gründen kein fruchtbarer Oberboden vorhanden sein. Zum einen ist Mutterboden nicht tragfähig und entsprechend nicht als Baugrund geeignet, da er sehr viel Wasser speichert und sich setzt. Dies kann Schäden an der Bausubstanz zur Folge haben. Zum anderen muss aufgrund von gesetzlichen Vorgaben der Mutterboden vor der Baumaßnahme entfernt werden, um diesen zu schützen.

Abschließend wird deutlich, dass aufgrund zahlreicher gesetzlicher und untergesetzlicher Definitionen sowie aufgrund von unterschiedlichen Materialeigenschaften Böden unterschiedliche Freigabeverfahren beschreiten können oder müssen. Eine differenzierte Betrachtung vom vorliegenden Boden ist erforderlich, um den passenden Freigabepfad zu identifizieren. Dadurch kann nicht nur der messtechnische Aufwand und der Aufwand für eine anschließende Verwertung/Entsorgung reduziert werden, sondern es kann im Anschluss an die Freigabe Material entsprechend seinem Zweck weiter genutzt werden.

## 5. Literaturverweis

- [1] Bundesrat, *Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts*, Drucksache 423/18, ISSN 0720-2946, 2018
- [2] Dr. S. Thierfeldt et al, *Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Regelungen zur Freigabe künstlicher radioaktiver Stoffe zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht – Konzept zur Umsetzung - Vorhaben 3614R03520*, Band 1: Schlussbreicht, urn:nbn:de:0221-2018050314821, Salzgitter, 2018
- [3] Dr. S. Thierfeldt, et al, *Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Freigrenzen von radioaktiven Stoffen zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht - Vorhaben 3614S70051*, Band 2: Bericht zu AP1 und AP2, urn:nbn:de:0221-2018050314804, Salzgitter, 2018
- [4] Bundesrat, *Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz*, Drucksache 207/01, ISSN 0720-2946, 2001
- [5] Dr. S. Thierfeldt, et al, *Stilllegung von Kernanlagen - Freigabe von Bodenflächen kerntechnischer Standorte Endbericht zu Vorhaben SR 2271*, BS-Projekt-Nr. 9703-14, Aachen, 1999 (Überarbeitung von 2000)
- [6] Entsorgungskommission, *Freigabe radioaktiver Stoffe und Herausgabe nicht radioaktiver Stoffe aus dem Abbau von Kernkraftwerken*, INFORMATIONSPAPIER – Langfassung mit ausführlichen Erläuterungen, 2022
- [7] Bundesrat, *Vierte Verordnung zur Änderung der Strahlenschutzverordnung*, Drucksache 516/23, ISSN 0720-2946, 2023
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und kerntechnischen Anlagenteilen – Teil 7: Bodenflächen und Bodenaushub*, 2017
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und kerntechnischen Anlagenteilen – Teil 6: Bauschutt und Gebäude*, 2018
- [10] W. Zech, et al, *Böden der Welt - Ein Bildatlas*, 2. Auflage, ISBN 978-3-642-36575-1, Heidelberg 2002, 2014
- [11] H.-P. Blume, et al, *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Auflage, ISBN 978-3-8274-1444-1, Heidelberg, 2010
- [12] Bund, *Baugesetzbuch (BauGB)*, Neugefasst durch Bek. v. 03.11.2017 I 3634, zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 20.12.2023 I Nr. 394
- [13] Land Baden-Württemberg, *Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO)*, in der Fassung vom 05.03.2010 (GBl. S. 358, ber. S. 416), zuletzt geändert durch Art. 70 der Verordnung vom 25.01.2012 (GBl. S. 65, 73),

# **BESONDERHEITEN BEI AUSBREITUNGSBERECHNUNGEN ÜBER DEN LUFTPFAD BEI STÖRFÄLLEN AM BEISPIEL DER SCHACHTANLAGE ASSE II**

Bosco Hauke, Mandel Marcus, Voigts Florian, Gärtner Grit

*Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)*

Die Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachtanlage Asse II ist durch die Änderung des Atomgesetzes gemäß § 57b (2) AtG vor der unverzüglichen Stilllegung des Bergwerks gesetzlich verankert. Zur Durchführung der Rückholung der radioaktiven Abfälle muss die Schachtanlage Asse II erweitert werden. Hierzu bedarf es eines neuen Schachtes Asse 5 im Osten der Bestandsanlage inklusive zugehöriger Tagesanlagen, untertägiger Infrastruktur, einer Anlage zur Charakterisierung, Konditionierung und Pufferung der Abfälle sowie Technik zum Bergen, Umverpacken und Transport der Abfälle aus der Schachtanlage Asse II.

Das Genehmigungsverfahren für die Rückholung der Abfälle aus der Schachtanlage Asse II soll in mehrere sogenannte Antragskomplexe (AK) aufgeteilt werden. Im Rahmen des Vorhabens AK I soll ein Antrag gemäß §9 AtG auf eine wesentliche Änderung der bestehenden Umgangsgenehmigung für die Ableitung der Grubenwetter aus Schacht Asse 5 gestellt werden. Im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens ist die notwendige Vorsorge gegen Schäden darzulegen. Im Zuge der Planungen zur Rückholung hat die BGE mbH erste Ausbreitungsrechnungen bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit durchführen lassen.

Grundlage für die Rechnungen ist der Quellterm im Störfall der bestehenden Umgangsgenehmigung für die Schachtanlage Asse II. Die Expositions-betrachtungen für störfallbedingte Freisetzungen wurden auf Basis dieser Ausbreitungsrechnungen vorgenommen. Dabei wurden einerseits Berechnungen nach Störfallberechnungsgrundlagen durchgeführt, andererseits Berechnungen mit einem Lagrange-Partikel-Modell vorgenommen, um Einflüsse eines geänderten Berechnungsmodells zu untersuchen.

Da die unterschiedlichen Modelle abweichende Eingangsgrößen, insbesondere im Hinblick auf die Partikelgrößenklassen bedurften, wurde eine Sensitivitätsbetrachtung zur Auswirkung auf zu erwartende Dosen im Störfall durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsbetrachtung werden vorgestellt.

# DER STRAHLENSCHUTZ UND DIE ASSE

## RADIATION PROTECTION AND THE ASSE MINE

Gellermann Rainer G.

*Schwülper, Deutschland*

### **Zusammenfassung**

*15 Jahre nach dem Optionenvergleich und heftigen Diskussionen der Fachleute um die Weichenstellung zur Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II ist „die Asse“ zu einem eher regionalen Thema geworden. Weiterhin sind deutschlandweit verteilt Strahlenschutzfachleute in Planungen eingebunden und es gibt regionale Akteure, die sich mit dem Thema befassen. Der Fokus der gesellschaftlichen Diskussionen aber auch die Diskussion im FS hat sich zu anderen Fragen verschoben.*

*„Die Asse“ liefert aber weiterhin interessante Einsichten, wenn man sich für das Spannungsfeld von fachlichen Ansätzen und gesellschaftlichen Bewertungen interessiert. Die Lex Asse von 2013, die Empfehlung der SSK von 2016, ein am fehlenden Endlager gescheiterter Begleitprozesses, eine Bürgermessstelle, die interessierten Bürgern Messergebnisse zu Umweltpollen aus dem realen Lebensumfeld liefern sollte – „die Asse“ hat diverse Felder des Strahlenschutzes berührt. Die für viele regionale Akteure überraschend geringen Strahlendosen bei einem durch Vorsorgemaßnahmen vorbereiteten auslegungüberschreitenden Lösungszutritt führen zu neuen Fragen. Anhand von drei Schlüsselbegriffen – Sicherheit, Emotion und Langzeitsicherheit – werden Schnittstellen von Strahlenschutz und gesellschaftlicher Wahrnehmung im Zusammenhang mit der Endlagerung angesprochen.*

### **Summary**

*Fifteen years after the comparison of options and fierce discussions among experts about setting the course for the retrieval of radioactive waste from the Asse II mine, ‘the Asse’ has become more of a regional issue. Radiation protection experts continue to be involved in planning throughout Germany, and regional players are actively engaged in addressing these issues. The focus of public debate, as well as the discussion in the FS, has shifted to other topics. However, ‘The Asse’ continues to provide interesting insights if you are interested in the tension between technical approaches and social judgements. The Lex Asse of 2013, the SSK's recommendation of 2016, an accompanying process that failed due to the lack of a final repository, and a citizen measurement centre that was supposed to provide interested citizens with measuring results on environmental samples from the real living environment - the “Asse” has touched on various fields of radiation protection. The surprisingly low radiation doses in the case of a beyond-design-solution inflow after completion of precautionary measures yield new questions. Three key terms – safety, emotion and long-term safety - are used to describe interfaces between radiation protection and social perception in connection with final disposal.*

**Schlüsselwörter** *Strahlenschutz, radioaktiver Abfall, Endlagerung, Sicherheit, Emotion*

**Keywords** *radiation protection, radioactive waste, final disposal, safety, emotion*

## **1. Einleitung**

Seitdem im Jahr 2008 aufgrund von Unregelmäßigkeiten im Umgang mit radioaktiv kontaminierten Laugen die Schachanlage Asse II im Landkreis Wolfenbüttel unter Atomrecht

gestellt und zum 01.01.2009 das BfS als Betreiber eingesetzt wurde, ist diese Schachanlage zu einem Muster für die gesellschaftliche Diskussion um den Umgang mit radioaktiven Abfällen und die Endlagerung in Deutschland geworden.

Von 2008 bis zum Optionenvergleich [1] und dem anschließend in erstaunlichem Tempo zustande gekommene gesetzlichen Auftrag des § 57b AtG (Lex Asse) zur Rückholung radioaktiver Abfälle, war das Thema „Asse“ im Fachverband sehr präsent. Inzwischen wird seit fast 15 Jahren die Rückholung geplant. Es sind neben den Mitarbeitern der BGE, der 2017 die Betreiberaufgaben übertragen wurde, Bearbeiter diverser Unternehmen mit Planungsaufgaben befasst und es gibt regionale Akteure, die sich zu dem Thema engagieren. Der Fokus der gesellschaftlichen Diskussionen aber auch die Diskussion im FS über Strahlenrisiken und Strahlenschutz haben sich inzwischen zu anderen Fragen verschoben.

Im Jahr 2025 bekam das Thema Strahlenschutz durch die lange Zeit zurückgehaltene Vorstellung einer Konsequenzenanalyse für den Fall des Flutens der Schachanlage nach einem auslegungüberschreitenden Lösungszutritt einen neuen Impuls [2]. Plötzlich wurde öffentlich, was in Fachkreisen noch nie in Frage stand: Ein Fluten der Schachanlage führt nicht zu einer Umweltkatastrophe und einem radiologischen Notfall mit Verseuchungen fast aller norddeutscher Grundwasserleiter, sondern schlimmstenfalls zu Dosen im de-minimis-Bereich.

Um Neues zum Strahlenschutz an den Schnittstellen zur Gesellschaft denken zu können, muss man andere Grundlagen suchen, als sie in Strahlenschutzkursen vermittelt werden. In einem als Ersatz für einen „entfallenen“ Beitrag zur Jahrestagung des FS 2013 verfassten „Versuch über kein Endlager“ [1] habe ich das Thema „Asse“ an Wertbegriffen eines polnisch-schweizerischen Dominikaners gespiegelt – und ich stelle beim Lesen fest, dass diese Spiegelung auch heute noch scharfe Bilder enthält. Beim Schreiben einiger Artikel zu den Bezügen unseres Faches zu den Grundlagen des gesellschaftlichen Denkens [4] habe ich darüber hinaus gelernt, wie wichtig Worte sind. Ich möchte daher in diesem Beitrag anhand von drei Schlüsselbegriffen in einige Schnittstellen von Strahlenschutz und gesellschaftlicher Wahrnehmung im Zusammenhang mit der Schachanlage Asse II hineinleuchten.

## 2. Sicherheit

Der Term „Sicherheit“ beschreibt im Kontext von [1] ein „Sein-Sollen“ und gehört zum Standardrepertoire aller am und um das Asse-Projekt Beteiligten.

In einem viele Jahre über die übliche Dauer hinaus betriebenen Salzbergwerk, wie es die Schachanlage Asse II darstellt, ist die bergtechnische Sicherheit natürlich eine Herausforderung und das Herstellen und Bewahren dieser Sicherheit eine entscheidende Voraussetzung aller Planungen. Im hier interessierenden Strahlenschutzrecht kommt der Begriff „Sicherheit“ vor allem in Bezug auf die Sicherheit von Strahlenquellen vor; eine Legaldefinition zur Sicherheit enthält das StrlSchG nicht. Die Schachanlage Asse II wird aber unter Atomrecht betrieben. Im § 2 AtG wird *nukleare Sicherheit* definiert als „*das Erreichen und Aufrechterhalten ordnungsgemäßer Betriebsbedingungen, die Verhütung von Unfällen und die Abmilderung von Unfallfolgen, so dass Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen geschützt werden.*“ Auch wenn man die hier genutzten Begriffe „Verhütung“ und „Abmilderung“ mit den strahlenschutzrechtlichen Konzepten der Vermeidung ungerechtfertigter Expositionen und der Reduzierung von Dosen verbinden kann, ist nukleare Sicherheit prioritär auf das *Erreichen und Aufrechterhalten ordnungsgemäßer Betriebsbedingungen* ausgerichtet. Ob diese ordnungsgemäßen Betriebsbedingungen den strahlenschutzrechtlichen Grundsätzen entsprechen, ist nicht Inhalt der atomrechtlichen Sicherheitsdefinition.

Mit den strahlenschutzrechtlichen Grundsätzen befasste sich die SSK in einer 2016 verabschiedeten Empfehlung [5]. Nach einer ausführlichen Beschreibung des damaligen Sachstandes zur Schachanlage Asse II und des internationalen Strahlenschutzsystems empfahl die SSK *„dafür zu sorgen, dass bei allen zukünftigen Maßnahmen und Entscheidungen im Rahmen der Stilllegung der Schachanlage Asse II die drei Grundsätze des Strahlenschutzes, die Rechtfertigung, die Optimierung und die Begrenzung der Strahlenexposition, angemessen beachtet werden können und auch beachtet werden.“*

Es war und ist allen strahlenfachlich einigermaßen kompetenten Personen klar, dass die ausschließliche und (fast) bedingungslose Orientierung des § 57b AtG (Lex Asse) auf die *„Rückholung der radioaktiven Abfälle“* mit dem Rechtfertigungsgrundsatz des Strahlenschutzes kollidiert. Die SSK bezog sich aber mit ihrer Empfehlung nicht auf die 2016 schon in der Vergangenheit liegende politische Entscheidung zur Rückholung, sondern orientierte nach vorn. Daher ist zu fragen und zu diskutieren, was es aus gegenwärtiger Sicht heißt oder heißen könnte, die drei Grundsätze des Strahlenschutzes angemessen zu beachten.

Nachdem die BGE im Mai 2025 in einer öffentlichen Veranstaltung die sehr unterschiedlichen Inventare radioaktiver Abfälle in den Einlagerungskammern der Schachanlage Asse II öffentlich gemacht hat und die Frage der Sicherheitspriorisierung stellte [2], ist aus Sicht eines Strahlenschützers zu fragen, ob die Forderung der Lex Asse *„nach Rückholung der radioaktiven Abfälle“* in der Lex Asse *„alle“* heißt. Schon in der SSK-Empfehlung [5] wird angemerkt, dass *„davon ausgegangen werden muss, dass zumindest ein Teil der radioaktiven Stoffe, wie z. B. die in den Tiefenaufschluss verbrachten kontaminierten Lösungen und der aus nicht freigebbaren Laugen hergestellte Verfüllungsбетон, in der Schachanlage verbleiben wird.“*

Was das für die Langzeitsicherheit – einen ganz wesentlichen Teil der Sicherheit im Atomrecht! – bedeutet, ob die (staatliche?) Erklärung der erfolgten Rückholung eines fernen Tages den Langzeitsicherheitsnachweis ersetzt oder ob es doch noch einen fachtechnischen Nachweis geben muss (der dann zeigen wird, wieviel gefahrlos in der Schachanlage hätte verbleiben können?) oder ob die verbliebenen radioaktiven Stoffe überhaupt Abfälle sind - im Raum der atomrechtlichen Mystifizierungen scheint noch genügend Platz zu sein, den niemand gern betritt und der, wenn nötig, mit Behauptungen gefüllt wird, die eher dem Leitgedanken des pragmatischen Handelns als einem Abwägen strahlenschutzfachlicher Prinzipien im öffentlichen Diskurs folgen. Eine Diskussion der Fachleute außerhalb der BGE zu diesem, für die Allgemeinheit und den Steuerzahler wichtigen Aspekt der Sicherheit, findet leider nicht statt.

### **3. Emotion**

Die drei Philosophen des FS stellten am Ende ihrer Schrift [6] u.a. fest: *Sicherheit ist für viele ein Gefühl*. Der Umgang mit Gefühlen ist ein Sektor des Lebens, den wir als Praktiker und Professionals eher außerhalb unseres Berufes verorten. Unser Selbstverständnis beruht auf Wissenschaft – worunter wir Naturwissenschaft und ggf. noch Ingenieurwissenschaften verstehen. Obwohl das gedruckte Strahlenschutzrecht unser Handwerkszeug ist, ist die Rechtswissenschaft schon weit von unserem Strahlenschutzleben entfernt und alles „Geistige“, was sich sonst noch Wissenschaft nennt, jenseits unserer (beruflichen) Horizonte. Es war daher ein mutiger Schritt, der mit dem TRANSENS-Projekt beschritten wurde und der versuchte, Fragen zur Endlagerung mit einem transdisziplinären Ansatz zu erforschen [7].

Ich bin kein Forscher, sondern nur ein Beobachter, der versucht, aus persönlichen Erfahrungen Einsichten zu gewinnen. Im Wissen um die Probleme des Verstehens (s. [4], Teil 4) gehören im Themenkomplex „Asse“ die Emotionen zum Kern der Geschichte.

2013 hatte ich geschrieben: *Unabhängig davon, wie man als Fachmann oder Laie Argumentationen zu Strahlenrisiken der Asse in der Vergangenheit bewertet und diese Bewertung in Worte fasst: die gesellschaftliche Realität, dass die Entsorgung radioaktiver Abfälle, wie sie in der Asse praktiziert wurde, einen Sündenfall deutscher Demokratie darstellte, ist anzuerkennen.*

Die „Sünde“ bestand in dem hehren Versprechen der 1960er Jahre zu forschen, und dem bewussten Tun in den 1970ern des Entsorgens. Dass dieser Widerspruch schon sehr zeitig wahrgenommen wurde, zeigt die Dokumentation einer Podiumsdiskussion zur Asse im Jahr 1977 [8]. Dort fragte der Physiker Volker Taube *„wie das möglich ist, dass dort Abfälle lagern, obwohl es noch um eine Versuchslagerung geht. ... Bislang wurde behauptet, dass das alles nur Versuche seien. In meinen Augen ist das eklatanter Vertrauensbruch der Bevölkerung gegenüber. .... Und dann dürfen sie sich auch nicht wundern, wenn dann die Bevölkerung misstrauisch wird und energisch z.T. gegen diese Lagerung angeht.“* [8]

Die staatliche Erzählung über die Einlagerung radioaktiver Abfälle in der Schachanlage Asse II hat Gefühle verletzt. Ohne einen emotionslosen Blick auf die früheren und jetzigen Gefühle der Bürger, wird man Geschichte nicht verstehen und Zukunft nicht mitgestalten können. Denn auch die neuere Geschichte der Asse zeigt, wie hehre Versprechen große Erwartungen erzeugen und bittere Enttäuschungen sich anschließen. So wurde schon 2007 auf Drängen regionaler Akteure ein „Asse-II-Begleitprozess“ gestartet, mit dem das weitere Vorgehen bis zur Schließung der Schachanlage von kommunalen und zivilgesellschaftlichen Vertretern aus der Region begleitet werden sollte. Zur fachlich-wissenschaftlichen Unterstützung und Beratung dieser Vertreter wurde eine „Arbeitsgruppe Optionenvergleich“ (AGO) ins Leben gerufen [9]. Der Begleitprozess scheiterte an der Frage des Zwischenlagerstandorts, nicht weil ein assenaher Standort festgelegt wurde, sondern weil der Auswahlprozess die regionalen Emotionen ausblendete und mit einem „Basta“ aus dem damaligen BMU im Mai 2020 eine Entscheidung verkündet wurde, die allen Hoffnungen auf einen fairen Auswahlprozess den Boden unter den Füßen wegzog.

Es wurde schnell sichtbar, dass dieses „Basta“ mehr bedeutete als eine Entscheidung zu einem nötigen Zwischenschritt bei der Rückholung. In 2013 hatte ich geschrieben [3]: *Da allen Beteiligten klar ist, dass Suchen, Finden und Errichten eines völlig neuen Endlagers in Deutschland in Zeiträumen von wenigen Jahrzehnten unmöglich ist, ist die allgemein verkündete Beschränkung der Standzeit des Zwischenlagers auf 40 Jahre schon jetzt als Illusion zu bewerten.* Diese Einschätzung ist inzwischen offiziell. Alle im Zusammenhang mit der Asse abgegebenen Zeitprognosen wurden vom Zahn der Zeit nicht nur angenagt, sondern aufgefressen. Die Erzählung von einem besseren Strahlenschutz durch sichere Endlagerung nach Rückholung führt allen, die sehen wollen vor Augen, dass wohltonende Versprechen an gesellschaftlichen Realitäten scheitern - und man als Fachperson vermuten muss, dass alle die wissen wollten, dies auch von Beginn an wussten.

Eine Ursache der immer wieder neu entstehenden Zweifel ist die fehlende Demut vor der Zeit. Viele Beteiligte tun auch weiterhin so, als ob das Strahlenschutz- und Atomrecht in 50 Jahren noch genau die Sicht auf die Asse haben wird, die 2013 in die Lex-Asse gepresst wurde. In Anbetracht von Zeiträumen, die inzwischen bis ins nächste Jahrhundert reichen, ist diese fehlende Demut vor der Zeit in der Kommunikation von Betreiber, Behörden und Politik eine stetige Quelle von berechtigten Zweifeln. In [3] hatte ich geschrieben: *Die Lösungen müssen vielmehr so beschaffen sein, dass künftige Generationen nach heutigen Maßstäben nichts tun müssen – sie aber, wenn sie andere Maßstäbe anlegen, mit verhältnismäßigen Mitteln etwas tun können.* Dieser Gedanke betrifft nicht nur die technische Planung der Langzeitlagerung, sondern vor allem die Kommunikation über diese Planung. Alle Beteiligte sollten akzeptieren,

dass die Generationen am Ende dieses Jahrhunderts selbst entscheiden müssen und werden, wie sie mit den bis dahin noch weiter abgeklungenen radioaktiven Abfällen der Asse umgehen.

Ein in Fachkreisen immer gern vorgebrachter Gedanke gegen die meist negativ-kritischen Gefühle der Öffentlichkeit ist die bessere Erklärung von Radioaktivität durch Messungen. Im Rahmen des TRANSENS-Projektes wurde ein Gamma-Spektrometer in der Gemeinde Remlingen installiert und allen Bürger angeboten, selbst entnommene Proben zu analysieren. Als Beobachter dieses Projektes muss ich feststellen, dass es eines gezeigt hat: Interessenbestimmte Konflikte, die mit Fachbegriffen des Strahlenschutzes ausgetragen werden, lassen sich durch Messwerte nicht befrieden. Einzelne Personen mögen ihre Sicht auf Strahlung etwas revidieren. Die Emotionen der Öffentlichkeit ändern sich durch Messwerte nicht.

Um Gefühle positiv zu beeinflussen ist Vertrauen nötig. Die immer wieder beschworene Vertrauensbildung zwischen Fachpersonen und der Öffentlichkeit kann in Details zwar gelingen, sie scheitert aber im Großen an den unehrlichen Versprechen der politischen Akteure, die den Fachplanern ein Projekt übertragen haben, dessen Absichten noch immer hinter einem nicht gelingenden Langzeitsicherheitsnachweis verschwiegen werden (s. Punkt 4 im nächsten Kapitel).

Zu den Erfahrungen der AGO gehört (s. [9]), dass die unterschiedlichen Ebenen der Verantwortung, die atom- und bergrechtliche Verantwortung des Betreibers und die politische Verantwortung kommunaler Akteure zu Konflikten führen, die bei einem politisch aufgeladenen Projekt wie der Rückholung über die üblichen Konflikte zwischen Antragstellern und Träger öffentlicher Belange hinausreichen. Das stringente Vorgehen in Bezug auf die Zwischenlagerung an der Asse zeigt die Grenzen des partizipativen Vorgehens, das bei der Suche nach dem Standort für das Endlager für hochradioaktive Abfälle propagiert wird.

Völlig übergangen von den öffentlichen Diskussionen werden die Emotionen der Personen, die als Fachplaner in dem spannungsgeladenen Umfeld ihre hochkomplexen Arbeiten machen und die (seit einigen Jahren für mich weniger stark) in öffentlichen Veranstaltungen teilweise in einer Weise kritisiert werden, der ein Grundrespekt fehlte. Sie ähneln dem Fachpersonal bei der geplanten Rückholung, dessen höhere Exposition auch weniger Bedeutung hat als das deutlich geringere von Personen der Bevölkerung.

Last but not least ist aus fachlicher Sicht festzustellen, dass es den atomkritischen Gruppen bisher hervorragend gelungen ist, die Beibehaltung geringerer strahlenschutzrechtlicher Anforderungen und die Erhöhung zulässiger Störfallplanungswerte durch die Lex Asse aus den Emotionen der Bevölkerung herauszuhalten – und von den Fachleuten diese eigentlich wesentlichen Punkte nie thematisiert werden.

#### **4. Langzeitsicherheit**

Es ist nicht die Aufgabe von Strahlenschützer(innen), die Welt zu verändern. Unser Beruf beschränkt unsere beruflichen Aufgaben darauf, gesellschaftlich gewollte Veränderungen so umzusetzen, dass sie nach Maßstäben des Strahlenschutzes gefahrlos sind. Es sollte aber auch unsere Aufgabe sein, die Gesellschaft zu warnen, wenn Entwicklungen absehbar diesem Ziel zuwiderlaufen. Das trifft in besonderem Maße für die langzeitsichere Endlagerung zu.

In [3] hatte ich 2013 geschrieben: *Die Asse sollte ein Muster für die Machbarkeit von Endlagerung in tiefen Salzformationen sein. Als solches ist sie grandios gescheitert und hat das Gegenteil dieser Intention bewirkt.* Die neuere Geschichte der Schachanlage kann aber, und das macht sie so relevant, als Muster gesehen werden, wie Endlagerung trotz vieler schöner Worte zur Sicherheit verhindert werden kann – und vielleicht hilft die Beschäftigung mit dem

Muster, Wege zu finden, wie diese strategische Verhinderung überwunden werden kann. Dazu im Folgenden einige wenige stichpunktartige Gedanken.

1. Der Optionenvergleich behauptete kühn, dass es ein sicheres Endlager gäbe, und dieser Verweis war ein wesentliches Argument für die Vorzugsoption Rückholung. Als Referenz wird im Optionenvergleich Schacht Konrad herangezogen. Wie die Geschichte allerdings zeigt, ist bis heute nicht klar, ob Schacht-Konrad als sicheres Endlager in Betrieb genommen werden kann [10] und viele derjenigen, die das Ergebnis des Optionenvergleichs bejubelten, stellen die tiefe geologische Endlagerung und die Eignung von Schacht Konrad vehement in Frage. Als inzwischen langjähriger Beobachter stellt sich mir die Frage, ob hier nicht ein Muster sichtbar wird, das man im normalen Leben als Spiel mit gezinkten Karten bezeichnen würde und das es als solches zu benennen gälte.
2. Schon 2012 hatte ich in diversen Vorträgen in der Region Braunschweig festgestellt, dass ohne annahmefähiges Endlager das nötige Zwischenlager zu einem oberflächennahen Endlager werden könnte. Die Verwendung dieses Wortes „Endlager“ rief heftige Reaktionen hervor. Doch inzwischen ist klar, dass jedes den derzeitigen Generationen als „Zwischenlager“ verkaufte Lager für ihr persönliches Leben ein Endlager sein wird. Vor nichts fürchtet sich deshalb die Interessengruppe der Dauerlagerstrategen so sehr, wie vor der Anwendung des Begriffs „Endlager“ auf die von ihnen strategisch geplante Endlagerung übertage. Leider findet die Fachcommunity hier keinen Weg zu klarer Sprache. Vielleicht hilft ein Verweis auf den früheren Kieler Landesminister Robert Habeck, der schon 2013 seine Sorge äußerte, *„dass Zwischenlager schleichend zu Endlagern werden“* [11].
3. Um diesem schleichenden Prozess fachlich etwas entgegenzusetzen zu können, hatte ich eine Herausforderung für unser Tun-Sollen formuliert, *die darin besteht, großen Gruppen unserer Gesellschaft klarzumachen, dass sie eine langfristige Lösung des Abfallproblems wollen sollten. ... Wer also der Meinung ist, dass langfristig sichere Lösungen für den radioaktiven Abfall nötig sind, der darf nicht nur auf die politische Vernunft setzen und hoffen, dass diese gegenteiligen Bestrebungen nicht erfolgreich sein werden. Wer Wege sucht, der Öffentlichkeit wirksam zu vermitteln, dass langfristige Lösungen für den radioaktiven Abfall nötig sind, der muss als Lehre aus der Geschichte darstellen und kommunizieren, dass langfristige Sicherheit bei [oberirdischen] technischen Lagern grundsätzlich nicht möglich ist.* Leider sehe ich heute die Notwendigkeit dies zu tun fast noch mehr als vor 12 Jahren, sehe aber keine wirklich zielführenden Ansätze der Fachleute.
4. Ich bin auch immer wieder erstaunt, wie Fachpersonen die eigentlichen Gründe der Rückholung einschätzen und sie teilweise mit der Entscheidung einer einzelnen Person verknüpfen. Da ist sicherlich ein Korn Wahrheit dabei. Viel wichtiger scheint mir aber das Ergebnis meiner Auswertung des parlamentarischen Untersuchungsberichtes [12], die mich schon 2013 schlussfolgern lies: *„Eine Sorge, die durch diesen Bericht hindurchscheint, ohne natürlich genannt zu werden, ist die, dass bei einem Absaufen der Asse mit ihren radioaktiven Abfällen KEINE relevante Kontamination auftritt und damit alle gern genutzten Argumente in Hinblick auf die Unsicherheit eines Endlagers im Salz fragwürdig werden. Diese Sorge kann kein Langzeitsicherheitsnachweis auslöschen, denn sie betrifft ein politisches Ziel, den nachhaltigen (!) Ausstieg aus der Nuklear-technologie, der – nach Meinung einiger Beteiligter – in Gefahr geraten könnte, wenn Endlagerung sicher ist.“* Sich mit diesem Sachverhalt ehrlich auseinanderzusetzen wäre eine Grundlage, um die neue Geschichte der Asse zu verstehen (s. [4] Teil 4) und zur Lösung der Endlagerfragen in Deutschland konstruktiv beizutragen.

## 5. Resümee

Die Geschichte der Schachanlage Asse II als „Atommülllager“ begann mit gebrochenen Versprechen und die 15 Jahre, die seit dem Optionenvergleich im Jahr 2010 vergangen sind, haben das Scheitern vieler politischer Versprechen erneut gezeigt:

- Der Begleitprozess ist gescheitert.
- Alle Zeithorizonte ähneln dem Regenbogen: sie sind nicht festzuhalten.
- Das dem Optionenvergleich dienende „sichere Endlager“ hat seine Dienste erfüllt. Seine Realisierung ist nicht in Sicht.
- Auf dem Höhenzug der Asse ist ein Gebäude für die Aufbewahrung rückgeholter Abfälle in Planung, das sich keiner traut beim richtigen Namen, nämlich „schlechtestes Endlager“ zu nennen.

Die regionalen Akteure versuchen alte Widerstandserfahrungen auf die neue Situation anzuwenden, und spüren die Grenzen dieses Widerstandes. Die Fachplaner der BGE müssen in diesem spannungsgeladenen Umfeld ihre Arbeit machen und den Druck öffentlicher Meinungen, die die Komplexität der Fachfragen übergehen, aushalten.

Die Schachanlage Asse II sollte ein Muster für ein Endlager sein. Dieses Muster scheiterte 2008. Die daran anschließenden Entwicklungen führen inzwischen zu dem ungenuten Gefühl, dass diese Schachanlage ein Muster für das Scheitern der Endlagerung werden könnte. Es gibt viele Fragen, über die die Strahlenschutzcommunity reden müsste – und für deren Beantwortung die Argumente aus Strahlenschutzkursen nicht reichen. Einige Anregungen dazu sollte der Beitrag geben.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Optionenvergleich Asse. Fachliche Bewertung der Stilllegungsoptionen für die Schachanlage Asse II. BfS-19/10 (2010). urn:nbn:de:0221-201004141430
- [2] Asse Aktuell – Rückholung, Notfallplanung, radiologische Belastung“ BGE Veranstaltung vom 8. Mai 2025- <https://www.bge.de/de/aktuelles/veranstaltungen/nachbericht/bge-gibt-einblicke-in-erste-ergebnisse-der-konsequenzenanalysen-fuer-die-asse/>
- [3] Gellermann, R. Die Asse – Werte, Wahrheiten, Widersprüche. Versuch über kein Endlager“. 3. Auflage. epubli 2016 (ISBN 978-3-7418-0321-5)
- [4] R. Gellermann, Philosophie für Strahlenschützer. In StrahlenschutzPRAXIS Heft 2/2023 (Teil 1), Heft 3/2023 (Teil 2), Heft 4/2023 (Teil 3) Heft 1/2024 (Teil 4)
- [5] Strahlenschutz bei der Stilllegung der Schachanlage Asse II (Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 283. Sitzung der Deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) am 15. September 2016
- [6] R. Michel, B. Lorenz, H. Völkle: Strahlenschutz heute – Erfolge, Probleme, Empfehlungen für die Zukunft. Internet-Publikation des FS [https://www.fs-ev.org/fileadmin/user\\_upload/09\\_Themen/Philosophen/Zukunft\\_des\\_Strahlenschutzes\\_Gesamt\\_20180921\\_fuer\\_FS\\_Direktorium.pdf](https://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/09_Themen/Philosophen/Zukunft_des_Strahlenschutzes_Gesamt_20180921_fuer_FS_Direktorium.pdf) (abgerufen 10.07.2025)
- [7] TRANSENS. <https://www.irs.uni-hannover.de/de/forschung/transens> (abgerufen am 10.07.2025)

- [8] J. Kumlehn: Atommülldeponie Asse II. Versuchseinlagerung? – Endeinlagerung? „Wir lagern mit dem Bürger ein. Ein Einblick in die Asse II-Diskussion in den 1970er Jahren. Epubli 2024.
- [9] U. Brückner u.a. Die AGO Gutachtergruppe und der Begleitprozess zur Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II. In: DIE ARBEITSKREISE. STRAHLENSCHUTZ VON DEN GRUNDLAGEN ZUR PRAXIS. Bandherausgeber: R. Czarwinski, J.-W. Vahlbruch, M. Froning. Jahrestagung 2022. TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln 2022
- [10] <https://www.ag-schacht-konrad.de/news/newsuebersicht/schacht-konrad-am-ende>
- [11] Berliner Zeitung 28. März 2013: Atommüll: Zwischenlager dringend gesucht. <https://www.berliner-zeitung.de/wirtschaft-verantwortung/atommuell-zwischenlager-dringend-gesucht-li.53463> (abgerufen am 20.07.2025)
- [12] Niedersächsischer Landtag – 16. Wahlperiode Drucksache 16/5300: Minderheitsbericht der Ausschussmitglieder der Fraktion der Bündnis 90/Die Grünen

## **Posterbeiträge**



# **P1: KONTINUIERLICHE, ZEITAUFGELÖSTE RADONMESSUNG MIT DEM ALPHA-GUARD PQ2000 PRO**

## **CONTINUOUS, TIME-RESOLVED RADON MEASUREMENT WITH THE ALPHA-GUARD PQ2000 PRO**

Bauer Lara, Hoffmann Anna

*Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland;*

### **Zusammenfassung**

*Radon ist ein natürlich vorkommendes Edelgas, welches im Erdreich entsteht und über Undichtigkeiten in Gebäude eindringen und sich dort anreichern kann. Eine längerfristige Inhalation kann zu Schäden am Lungengewebe führen. Um die vorhandene Radonaktivitätskonzentration bestimmen, beurteilen und eventuelle Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine Messung notwendig. Diese kann mit passiven und aktiven Messgeräten durchgeführt werden.*

*Radon is a naturally occurring noble gas that is formed in the ground and can enter buildings through leaks and accumulate there. Long-term inhalation can lead to damage to lung tissue. In order to determine and assess the existing radon activity concentration and take any necessary measures, a measurement is required. This can be carried out using passive and active measuring devices.*

**Schlüsselwörter** *Radon, Lungenkrebs, passive Messung, aktive Messung, Alpha-GUARD*

**Key words** *Radon, lung cancer, passive measurement, active measurement, Alpha-GUARD*

## **1. Radon allgemein**

Radon ist ein natürlich vorkommendes radioaktives Edelgas, welches aus dem Zerfall von Uran im Erdreich entsteht und die größte Einzelquelle der natürlichen jährlichen Strahlenbelastung darstellt. Problematisch kann es werden, wenn Radon durch Undichtigkeiten wie Risse, Spalten oder Löcher in Gebäude eindringt, sich dort in der Raumluft anreichert und zu einer erhöhten bzw. hohen Radonaktivitätskonzentration führt.

### **1.1 Wie kann Radon gefährlich werden?**

Durch die Inhalation von Radon können die radioaktiven Folgeprodukte (z.B. Polonium) durch das Aussenden von Alpha-Strahlung Schäden am Lungengewebe verursachen. Langfristig verstärkt daher eine erhöhte Radonbelastung das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken. Radon ist außerdem nach dem Rauchen die zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs.

## **2. Radonmessung**

Um eine verlässliche Information über die vorhandene Radonaktivitätskonzentration in einem Gebäude zu erhalten ist eine präzise Messung notwendig. Das Karlsruher Radonlabor ist eine

behördlich bestimmte (§ 169 StrlSchG), anerkannte (§ 155 StrlSchV) Messstelle und nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert für aktive und passive Radonmessungen.

## 2.1 Passive integrierende Radonmessung (Langzeitmessung)

Passive integrierende Messverfahren werden in der Regel für Langzeitmessungen verwendet und verfügen über keine direkt ablesbare Anzeige. Das Ergebnis der Messung ist erst nach einer separaten Auswertung ersichtlich und gibt einen Mittelwert der Aktivitätskonzentration über die Messperiode an. Im Radonlabor des KIT wurde in den 80er Jahren das Karlsruher Kernspurexposimeter (s. Abb. 2) entwickelt, welches für die Messungen verwendet wird. Das Messgerät besteht aus einer Detektorkapsel, einem Filter und einem Makrofoldetektor, der mit einer Mylarfolie beschichtet ist. Das Messprinzip basiert auf der Diffusion von Radon in das Messvolumen (s. Abb. 2). Mithilfe des Filters kann sichergestellt werden, dass nur das Radon in die Messkammer gelangt und die aerosolgebundenen Folgeprodukte oder Staubpartikel aufgehalten werden. Die Zerfallsprodukte, die durch den Zerfall des Radons in der Messkammer entstehen, senden Alphateilchen aus, die Schäden am Detektor verursachen. Diese Schäden werden nach der Messung durch eine chemische und elektrochemische Ätzung aufgeweitet und sichtbar gemacht. Anschließend können die Spuren gezählt und die durchschnittliche Aktivitätskonzentration ermittelt werden.

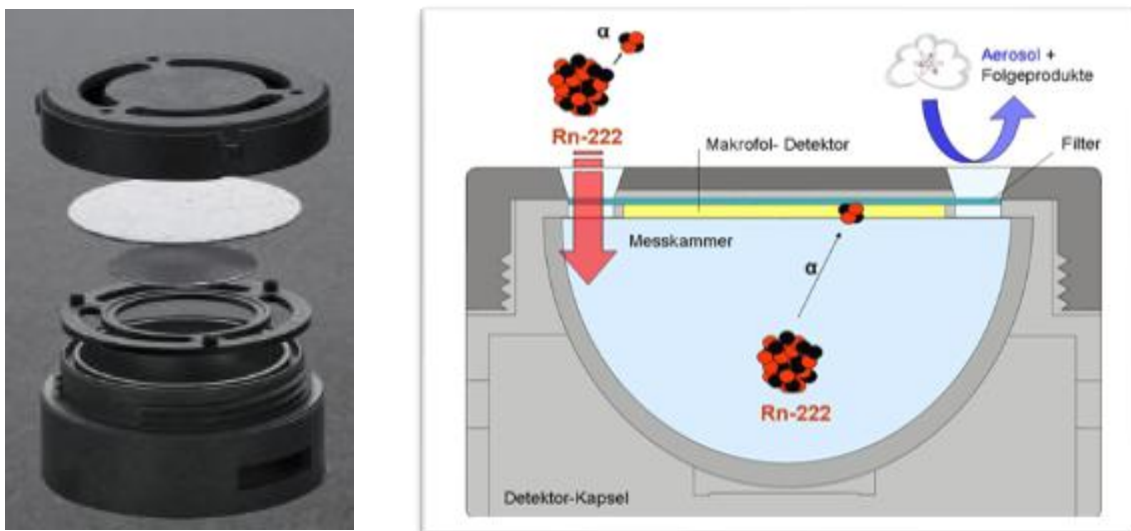


Abb. 2: Aufbau Karlsruher Radonexposimeter

Die passive Messung stellt eine günstige, einfache Methode dar, um Radon sicher nachzuweisen. Allerdings entspricht das Messergebnis lediglich einem Mittelwert über den betrachteten Zeitraum. Sollen darüberhinausgehende Informationen erhalten werden, beispielsweise über die Veränderung der Umgebungsbedingungen, wie durch das Lüften des Raumes oder sollen Eindringpfade identifiziert werden, so kommt das aktive Messverfahren zum Einsatz.

## 2.2 Aktive, kontinuierliche Radonmessung (Kurzzeitmessung)

Aktive Radonmessungen sind ideal, wenn schnelle Ergebnisse oder zeitliche Verläufe benötigt werden. Außerdem werden sie zur Lokalisierung von Radon-Eindringpfaden durch präzise Sniffingmessungen, zum Erstellen von Lüftungsprofilen, um optimale Lüftungsstrategien zu

entwickeln und für begleitende Messungen bei Sanierungsarbeiten, um die Wirksamkeit von Maßnahmen zu überprüfen, verwendet.

Die Messungen wurden bei uns am KIT mit dem Messgerät AlphaGUARD (s. Abb. 3) der Firma Bertin GmbH (ehemals: Saphymo, Genitron Instruments) durchgeführt. Das Messgerät kann in zwei verschiedenen Messmodi betrieben werden. Der erste Modus entspricht dem Diffusionsbetrieb, in dem die Raumluft in das Messgerät diffundiert und die Radonkonzentration über 10 Minuten gemittelt ausgegeben wird. Dieser Messmodus wird für eine Betrachtung der Raumluftkonzentration angewendet. Das Radon diffundiert dabei in die Messkammer (Ionisationskammer), in welcher die Luft durch die Zerfallsprodukte ionisiert wird und dadurch elektronische Ladungen entstehen. Der Alpha-GUARD misst die elektrischen Ladungen und kann so die Radonaktivitätskonzentration in der Luft bestimmen.

Der zweite Modus wird zum Suchen von Radoneindringpfaden benötigt. Hierfür kann das Messgerät im Durchflussmodus betrieben werden. Es wird eine Pumpe mit definiertem Luftdurchsatz an das Messgerät angeschlossen, sodass die Radonkonzentration aus Rissen oder Raumöffnungen in ein-minütigen Messintervallen bestimmt werden kann.

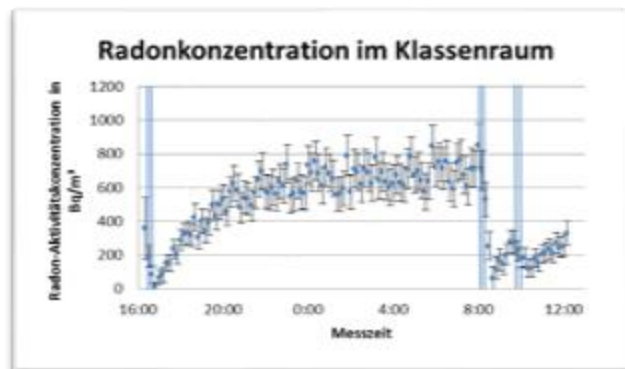


Abb. 3: Alpha-GUARD im Durchflussmodus und Lüftungsprofil

## **P2: BEWERTUNG VON STRAHLENFELDERN IN TIEFENGEOLOGISCHEN ENDLAGERN FÜR ABGEBRANNTE BRENNELEMENTE IM HINBLICK AUF VERSCHIEDENE NEUTRONENSTREUNGSFORMALISMEN**

Becker Frank<sup>1</sup>, Biswas Sushanta<sup>2</sup>, Dagan Ron<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland; <sup>2</sup>Universität Stuttgart, Deutschland

### **Zusammenfassung**

*Die Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen aus kommerziellen Kernkraftwerken in tiefen geologischen Formationen gilt als vielversprechendes Konzept zur Lösung der komplexen Aufgabe der nuklearen Abfallentsorgung. Ein typisches Konzept für die tiefe geologische Endlagerung sieht einen Abschirmbehälter für die Abfälle vor, der wiederum unterirdisch in einem Stollen innerhalb einer Wirtsgesteinsformation eingelagert wird. Das Strahlenfeld und damit die Ortsdosisleistung innerhalb eines Stollens wird durch die von den umgebenden Wirtsgesteinsschichten zurückgestreuten Neutronen dominiert. Mit dem Monte-Carlo-Code MCNP® wurde ein repräsentatives Modell eines POLLUX®-Behälters in einem Stollen für abgebrannte Brennelemente erstellt. Dieses Modell wurde verwendet, um Ortsdosisleistungen für verschiedene Stollenmaterialien zu berechnen. In diesem Beitrag wird ein Einfluss verbesserter Neutronenstreuungsformalismen auf solche Simulationsergebnisse vorgestellt. Die Resultate der Simulationen mit der, in MCNP® neu installierten, DBRC-Methode zeigen im Vergleich zur Standard-MCNP®-Option nicht zu vernachlässigende geringere Ortsdosisleistungen auf.*

**Schlüsselwörter** Monte-Carlo-Simulationen, Neutronenstreuungsformalismen, DBRC, Neutronendosisleistung, tiefengeologische Einlagerungstrecken

**Key words** Monte Carlo simulations, neutron scattering formalisms, DBRC, neutron dose rate, deep geological disposal facilities

### **1. Einleitung**

Für die tiefengeologische Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden heute vor allem drei Arten von Wirtsgesteinen in Betracht gezogen: Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein. Als Folge der Handhabung der Abfälle während der Einlagerung und Rückholungsoption muss die Frage der beruflichen Strahlenexposition im Einlagerungsstollen berücksichtigt werden. Insbesondere ist die Streuung von Neutronen an den Stollenwänden von großer Bedeutung. Daher bewertet dieser Beitrag das Strahlungsfeld in mit Salz und Beton ausgekleideten Endlagerstollen mit besonderem Augenmerk auf die Neutronenstreuung. Um Informationen über das Strahlen und die damit verbundene Dosimetrieinformation zu erhalten, wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, wobei der doppelte differentielle Streuquerschnitt für die energetische Rückstreuung von Neutronen und Photonen in den Stollen entscheidend ist. Für die Simulationen wurde ein Modell eines Abschirmbehälters verwendet und ein repräsentatives Abfallinventar entsprechend der geschätzten Gesamtmenge der in Deutschland vorhandenen abgebrannten Brennelemente bestimmt. Das Strahlungsfeld wurde im Hinblick auf die umgebenden Wirtsgesteinsschichten bzw. Betonauskleidung untersucht. Ortsdosisleistungen in der Nähe von Abschirmbehältern, die in einem horizontalen Einlagerungsstollen stehen, wurden erforscht. Neben dem bestehenden physikalischen Modell und den nuklearen Daten,

die in Monte-Carlo-Codes verwendet werden, wurden die Auswirkungen neuer Ansätze, wie das Doppler Broadening Rejection Correction (DBRC)-Modell untersucht. Dieses Modell wurde in MCNP<sup>®</sup> installiert und ersetzt das bestehende temperatur- und energieunabhängige Modell. Der Fokus liegt in diesem Beitrag also auf der Implementierung eines verbesserten Neutronenstreuungsformalismus und dessen Auswirkung auf die Ortsdosisleistung.

## 2. Abgebrannte Brennelemente als Neutronenquelle

Basierend auf dem durchschnittlichen Bestand an abgebrannten Brennelementen aus Druckwasserreaktoren in Deutschland [1] wurde eine repräsentative Abfallmenge von 90 % Uranoxid-Brennstoff und 10 % Mischoxid-Brennstoff mit einem durchschnittlichen Abbrand von 55 GWd/t(HM) gewählt. Mit dem Online-Programm Nucleonica [2] wurde die verbleibende Aktivität der abgebrannten Brennelemente nach 50 Jahren berechnet.

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass Neutronen das Strahlungsfeld und die Exposition außerhalb des Abschirmungsbehälters dominieren [3, 4]. Der Beitrag der rückgestreuten Neutronen der Wirtsgesteinsschichten oder der Betonauskleidung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle [5]. Daher wurden in dieser Studie nur diejenigen Isotope berücksichtigt, die einen wesentlichen Beitrag zur Neutronenaktivität leisten. Die Neutronenproduktionsraten und -spektren wurden unter Berücksichtigung von Neutronen aus spontaner Spaltung, ( $\alpha$ ,n)-Reaktionen und verzögerter Neutronenemission mit dem Code SOURCES-4C [6] bestimmt. Die Neutronenquellenstärke ergab sich daraus als  $2,13 \times 10^9$  Neutronen/s. Es wurde ein Neutronenenergiespektrum generiert, so dass eine für die abgebrannten Brennelemente repräsentative Neutronenquelle definiert werden konnte.

## 3. Monte Carlo Simulation und DBRC

Es wurde der Monte-Carlo-Code MCNP<sup>®</sup> in der Version 6.2 [7] verwendet, um das Strahlungsfeld um einen POLLUX<sup>®</sup>-Einlagerungsbehälter [8, 9] zu berechnen, der mit abgebrannten Brennelementen beladen ist. Dazu wurden die oben genannten Neutronenquelleneigenschaften verwendet, um eine repräsentative Volumenquelle im POLLUX<sup>®</sup> einzusetzen. Insgesamt wurden für die Simulationen die folgenden Annahmen und Vereinfachungen getroffen: Für die Struktur des POLLUX<sup>®</sup>-Behältermodells in MCNP<sup>®</sup> wurde angenommen, dass die abgebrannten Brennelemente im Inneren des Behälters homogen in einer zylindrischen Geometrie innerhalb der aktiven Zone verteilt waren. Die inaktiven Zonen an den oberen und unteren Enden der abgebrannten Brennelemente wurden als aus Zirkalloy bestehend modelliert. Zusätzlich wurden dem Behälterdesign Finnelemente hinzugefügt, um auch diese Wärmeübertragungselemente zu berücksichtigen. Zur Berechnung der Dosisleistungen bzw. Neutronenflüsse an verschiedenen Stellen wurden Punktdetektortallies (F5) eingesetzt. Es wurden Einlagerungsszenarien untersucht, bei denen POLLUX<sup>®</sup>-Behälter horizontal in einem Stollen platziert wurden. Die Stollengeometrien orientierten sich an den generischen Tiefenlagermodellen nach Stahlmann et al. [10].

Es wurden zwei verschiedene Simulationen für gleiche Szenarien durchgeführt, sowohl mit der DBRC-Methode als auch mit der Standard-MCNP<sup>®</sup>-Option, dem sogenannten „Target at Rest“ Modell, wobei eine Temperatur von 0 K und energieunabhängige Wirkungsquerschnitte angenommen werden. Demnach bedeutet DBRC eine Implementierung eines verbesserten Neutronenstreuungsformalismus, der genauere elastische Neutronenresonanzstreuungen, insbesondere für die relevanten Targetkerne der Stollenwände, berücksichtigt: durch den Effekt unterschiedlicher Querschnitte der Geschwindigkeitsverteilung von Targetkernen ergibt sich ein energie- und temperaturabhängiges Neutronenstreuungsmodell. Eine vollständige Beschreibung des doppelten Differential-, Resonanz- und temperaturabhängigen Streukerns

wurde von Rothenstein und Dagan [11] entwickelt und die Resonanzstreuungsbehandlung in Monte-Carlo-Codes von Becker [12] implementiert.

In dieser Studie wurde eine modifizierte Version von MCNP<sup>®</sup> in der Version 6.2 verwendet, wobei der DBRC-Mechanismus für einfallende Neutronen mit einer Energie von weniger als 50 keV festgelegt wurde. Für die Simulationen mit den oben genannten Vereinfachungen wurde eine Temperatur des abgebrannten Brennstoffs von 600 K angenommen, während alle anderen Materialien, einschließlich Abschirmung und Stollenwände, mit einer Temperatur von 300 K berücksichtigt wurden. Die DBRC-Methode wurde für alle Materialien einschließlich abgebrannter Brennelemente, Abschirmung und Stollenwände für einfallende Neutronen mit einer Energie von weniger als 50 keV angewendet. Die Anzahl der simulierten Teilchen betrug  $5 \times 10^8$ , um eine akzeptable statistische Genauigkeit zu erreichen.

#### **4. Ergebnisse und Diskussion**

Die Auswirkungen der energie- und temperaturabhängigen Neutronenstreuung auf die Neutronenortsdosisleistung wurde mittels MCNP<sup>®</sup>-Simulationen für einen POLLUX<sup>®</sup>-Behälters ermittelt, der in einer geraden Endlagereinlagerungsstrecke platziert wurde. Dazu wurden die Neutronenortsdosisleistungen mit Punktdetektortallies (F5) an den verschiedenen Positionen in 1/2, 1, 2, 4, 5 und 10 m Abstand vom Behälter simuliert. Zum Vergleich wurden die Rechnungen sowohl mit der DBRC-Methode als auch mit der Standard-MCNP<sup>®</sup>-Option durchgeführt. Dies wurde sowohl in einer Salzeinlagerungsstrecke als auch in einem mit Beton auskleideten Stollen berechnet.

In beiden Fällen ist die Neutronenortsdosisleistung bei der Berechnung mit DBRC etwas niedriger. Zum Beispiel ergab sich bei den DBRC-Resultaten in 5 m Entfernung vom Behälter eine Neutronenortsdosisleistung, die im Salzstollen um 1,4 % und bei Betonauskleidung um 1,9 % geringer ausfällt. Die statistische Unsicherheit der Simulationen in 5 m Entfernung betrug etwa 0,5 %. Somit ist die Auswirkung der energie- und temperaturabhängigen Rechnungen mit DBRC zwar erkennbar, aber dennoch ziemlich gering. Allerdings war die Temperatur der Stollenwände mit 300 K vergleichsweise niedrig, so dass sich die diesbezügliche Auswirkung auf die DBRC-Methode nur leicht bemerkbar macht. Außerdem beinhaltet das Neutronenstreuenspektrum auch Energien bis in den MeV-Bereich. Bei hohen Energien ist der Einfluss der DBRC-Korrektur im Vergleich zu thermischen Neutronen vernachlässigbar klein. Für die Zukunft ist geplant, ein geeignetes Modell, das bekannte Blatt-Biedenharn-Modell [13], anzuwenden, welches theoretisch für Energien bis 1-2 MeV geeignet ist, aber in der praktischen Anwendung Schwierigkeiten bereitet.

#### **5. Literaturverzeichnis**

- [1] Peiffer, F.; McStocker, A.: Abfallspezifikation und Mengengerüst, Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung. Bericht zum Arbeitspaket 3 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, 2011
- [2] Nucleonica GmbH: Nucleonica Nuclear Science Portal ([www.nucleonica.com](http://www.nucleonica.com)), Version 3.0.661, Karlsruhe, 2024
- [3] Saurí Suárez, H.: Individual dosimetry in disposal facilities for high-level nuclear waste. PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2018
- [4] Pang, B.; Saurí Suárez, H.; Becker, F.: Individual dosimetry in disposal repository of heat-generating nuclear waste. Radiation Protection Dosimetry, 170, 387-392, 2016

- [5] Saurí Suárez, H.; Pang, B.; Becker, F.; Metz, V.: Monte-Carlo based comparison of the personal dose for emplacement scenarios of spent nuclear fuel casks in generic deep geological repositories. *atw*, International Journal for Nuclear Power 62, 384-388, 2017
- [6] Wilson, W.B. et al.: SOURCES 6C: A Code for Calculating (alpha, n), Spontaneous Fission, and Delayed Neutron Sources and Spectra. Ed. by W.B. Wilson. American Nuclear Society / Radiation Protection and Shielding Division, 2022
- [7] Werner, C. J. et al.: MCNP User's Manual Code Version 6.2. Tech. rep. LA-UR-17-29981. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory. URL: <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-reporlareport/LA-UR-17-29981>, 2017
- [8] Janberg, K.; Spilker, H.: Status of the Development of Final Disposal Casks and Prospects in Germany. *Nuclear Technology* 121(2), pp. 136–147. DOI: 10.13182/NT98-A2826, 1998
- [9] Filbert, W.; Engelmann, H.J.; Heda, M.; Neydek, J.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) - Handhabungsversuche zur Streckenlagerung. Tech. rep. 82. Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 1995
- [10] Stahlmann, J.; Leon Vargas, R.; Mintzlaff, V.: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Research rep. TU-Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Germany, 2015
- [11] Rothenstein, W.; Dagan, R.: Ideal gas scattering kernel for energy dependent cross-sections. *Annals of Nuclear Energy* 25(4), pp. 209–222. ISSN: 0306-4549. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(97\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00063-7), 1998.
- [12] Becker, B.: On the influence of the resonance scattering treatment in Monte Carlo codes on high temperature reactor characteristics. PhD thesis. University of Stuttgart, 2010
- [13] Blatt, J. M.; Biedenharn, L.C.: The Angular Distribution of Scattering and Reaction Cross Sections, *Rev. Mod. Phys.* 24, 258, 1952

### **P3: Entwicklung eines Messaufbaus für Flash-Effekt-Untersuchungen am Elektronenbeschleuniger FLUTE**

Pehlivan Johanna<sup>1</sup>, Nasse Michael J.<sup>2</sup>, Borkowski Till<sup>2</sup>, Leichtle Dieter<sup>1</sup>, Nordmeyer Hans<sup>2</sup>, Ruprecht Robert<sup>2</sup>, Serikov Arkady<sup>1</sup>, Smale Nigel J.<sup>2</sup>, Jäkel Oliver<sup>3,4</sup>, Holzapfel Bernhard<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Eggenstein-Leopoldshafen, <sup>2</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Beschleunigerphysik und Technologie, Eggenstein-Leopoldshafen, <sup>3</sup>Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Abteilung Medizinische Physik in der Strahlentherapie, Heidelberg, <sup>4</sup>Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT), Universitätsklinikum Heidelberg, <sup>5</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Physik (ITEP), Eggenstein-Leopoldshafen

Die Flash-Strahlentherapie ist ein vielversprechender neuer Ansatz, der präklinisch mit ultrahohen Dosisleistungen (>40 Gy/s) eine vergleichbare Tumorkontrolle wie die konventionelle Strahlentherapie (~0.1 Gy/s) ermöglicht, dabei jedoch weniger Nebenwirkungen im gesunden Gewebe verursacht. Für eine klinische Anwendung müssen jedoch noch wesentliche Herausforderungen überwunden werden, etwa die Aufklärung der biologischen Mechanismen und potenzieller Langzeiteffekte, die klinische Dosimetrie und die Verfügbarkeit geeigneter Beschleuniger.

Am Linearbeschleuniger FLUTE (Ferninfrarot Linac- Und Test-Experiment) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wird ein Messaufbau entwickelt, der die Untersuchung von Dosimetriesystemen und biologischen Proben unter Flash-Bedingungen ermöglicht. FLUTE zeichnet sich durch seine flexibel einstellbaren Strahlparameter aus, die eine Vielzahl experimenteller Konfigurationen ermöglichen. Besonders hervorzuheben ist die variabel einstellbare Pulslänge bis in den Femtosekundenbereich oder Ladungen von bis zu 1 nC, wodurch außergewöhnlich hohe Pulsdosisleistungen erzielt werden. Der Beschleuniger ist auf Elektronenenergien von bis zu 90 MeV ausgelegt. Ziel des Messaufbaus ist es, grundlegende Fragestellungen zur Flash-Dosimetrie zu untersuchen und erste radiochemische und radiobiologische Experimente in Wasser, Zellmedien oder Zellkulturen durchzuführen.

Ein zentraler Aspekt des Messaufbaus ist seine variable Konfiguration, die eine flexible Platzierung unterschiedlicher Proben und Detektoren erlaubt. Zusätzlich wird ein System zur automatisierten sequentiellen Bestrahlung mehrerer Proben entwickelt. Zur Optimierung des Versuchsaufbaus und zur Gewährleistung des Strahlenschutzes wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Aufgrund der besonderen Herausforderungen durch hohe Elektronenenergien, extreme Dosisleistungen, gepulste Strahlung und kleine Bestrahlungsfelder wurden Dosimetriemessungen mit verschiedenen Detektorsystemen durchgeführt, darunter eine Ionisationskammer, ein Flash-Diamantdetektor, Radiochromfilme, Thermolumineszenzdosimeter (TLD) und optisch stimulierte Lumineszenzdosimeter (OSLD).

## **P4: METHODENENTWICKLUNG FÜR DIE INKORPORATIONSÜBERWACHUNG VON BERUFLICH EXPONIERTE PERSONEN IM ZUGE DER ZIELGERICHTETEN ALPHATHERAPIE**

### **DEVELOPMENT OF METHODS FOR INTERNAL DOSIMETRY OF OCCUPATIONALLY EXPOSED PERSONS IN THE COURSE OF TARGETED ALPHA THERAPY**

Ulakanathan-Thavarajah Raashina<sup>1</sup>, Wanke Carsten<sup>2</sup>, Geworski Lilli<sup>2</sup>, Hartmann Sven<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin, Deutschland, <sup>2</sup>Medizinische Hochschule Hannover,

#### **Zusammenfassung**

*Das alphaemittierende Radionuklid Ac-225 ist ein vielversprechender Kandidat in der Nuklearmedizin für die Behandlung von Krebs im Zuge der zielgerichteten Alphatherapie. In den letzten Jahren vermehrte sich dessen Einsatz in der Forschung und Entwicklung als Radiopharmakon, sodass sich eine erhöhte Nachfrage nach Ac-225 ergibt. Während der Produktion und des Einsatzes von Ac-225 können Umgangsaktivitäten bis hin zu einigen hundert MBq vorliegen. In Kombination mit dem hohen Dosiskoeffizienten von Ac-225 kann eine Inkorporation zu einer potentiellen effektiven Dosis von  $\geq 1$  mSv pro Jahr führen. Daraus folgt in Deutschland das Erfordernis einer regelmäßigen Inkorporationsüberwachung für beruflich exponierte Personen.*

*Eine bereits veröffentlichte Methode zur Analyse der Ausscheidung von Ac-225 mit dem Urin, welche nicht alle Anforderungen erfüllt, wurde als Grundlage für weitere Optimierungen verwendet. Des Weiteren wurde der Einfluss der Verwendung verschiedener Säulenmaterialien für die Festphasenextraktion getestet.*

*Erste Ergebnisse, die mit dieser optimierten Methode gewonnen wurden, zeigen höhere Ausbeuten des internen Standards Am-243. Als Säulenmaterial zeigen RE und TK222 Resin bessere Ergebnisse als das bisher verwendete DGA branched Resin. In den nächsten Schritten wird zunächst der Einfluss unterschiedlicher Verfahren der Fällung überprüft. Die optimierte Methode soll dann mit Ac-225 validiert und anschließend an Proben von Humanurin beruflich exponierter Personen getestet werden.*

*The alpha-emitting radionuclide Ac-225 is a promising candidate in nuclear medicine for the treatment of cancer in course of targeted alpha therapy. In recent years, its use in research and development as a radiopharmaceutical has increased, resulting in a surge in demand for Ac-225. During the production and use of Ac-225, handling activities of up to several hundred MBq can occur. In combination with the high dose coefficient of Ac-225, incorporation can lead to a potential effective dose of  $\geq 1$  mSv per year. Consequently, regular internal dosimetry for occupationally exposed individuals is mandated in Germany.*

*A previously published method for analyzing excretion of Ac-225 in urine, which did not fully meet all requirements, was used as a basis for further optimization. We specifically investigated the impact of various column materials for solid-phase extraction.*

*Initial results from this optimized method show higher yields for the internal standard Am-243. As column material, RE and TK222 resin show better results compared to the previously used DGA branched resin. Future work will explore the influence of different precipitation methods.*

*The optimized method will then undergo validation with Ac-225 and subsequent testing on human urine samples from occupationally exposed persons.*

**Schlüsselwörter** Actinium-225, Inkorporationsüberwachung, Alphaspektrometrie, zielgerichtete Alphatherapie

**Keywords** actinium-225, internal dosimetry, alpha spectrometry, targeted alpha therapy

## 1. Einleitung

In der zielgerichteten Alphatherapie wird ein alphaemittierendes Radionuklid über ein chelatierendes Molekül, welches kovalent mit einem Liganden, wie z. B. einem Antikörper oder spezifischen Peptid, verbunden ist, verknüpft. Der Ligand weist hierbei eine hohe Affinität zu Bereichen der Krebszelle auf, beispielsweise spezifische Bindungsstellen auf der äußeren Zellmembran. So kann das Radionuklid in unmittelbare Umgebung der Krebszelle gebracht werden und diese durch strahleninduzierte DNA-Doppelstrangbrüche zerstören. Die kurze Reichweite der Alphateilchen führt zu geringeren Kollateralschäden am umliegenden gesunden Gewebe [1].

Ein vielversprechendes alphaemittierendes Radionuklid ist Ac-225. Ac-225 hat eine Halbwertszeit von etwa zehn Tagen und zerfällt in weitere fünf kurzlebige Tochternuklide, von denen drei ebenfalls Alphastrahlung emittieren. In den letzten Jahren vermehrte sich dessen Einsatz in der Forschung und Entwicklung als Radiopharmakon, sodass sich eine erhöhte Nachfrage nach Ac-225 ergibt [2].

Während der Produktion und des Einsatzes von Ac-225 können Umgangsaktivitäten bis hin zu einigen hundert MBq vorliegen. In Kombination mit dem hohen Dosiskoeffizienten von Ac-225 kann eine Inkorporation, z. B. durch Inhalation, auch bei geringen Aktivitäten schon zu einer potentiellen effektiven Dosis von  $\geq 1$  mSv pro Jahr führen. Daraus folgt in Deutschland das Erfordernis einer regelmäßigen Inkorporationsüberwachung für beruflich exponierte Personen [3].

Hartmann et al. haben eine Methode zur Ausscheidungsanalyse von Ac-225 aus Urin beschrieben, die im beruflichen Strahlenschutz zum Einsatz kommen kann [4]. Diese kombiniert eine Festphasenextraktion mit einer Alphaspektrometrie, jedoch werden nicht alle Anforderungen für eine regelmäßige In-vitro-Inkorporationsüberwachung erfüllt. Für die Inkorporationsüberwachung gibt es folgende Anforderungen: Bei einer wöchentlichen Inkorporationsüberwachung ist eine Nachweisgrenze von  $< 1$  mBq erforderlich. Dabei sollten der interne Standard und das Ac-225 ein konstantes Verhalten bei der chemischen Aufarbeitung aufweisen. Für die Methode sollten nur kommerziell erhältliche Chemikalien, Materialien und Geräte zum Einsatz kommen, um eine breite Anwendbarkeit und Zugänglichkeit für verschiedene Messstellen zu gewährleisten.

Die Methode von Hartmann et al. wurde als Grundlage für die hier präsentierten Forschungsarbeiten verwendet. Dabei wurden unter anderem die Einflüsse verschiedener Säulenmaterialien für die Festphasenextraktion und verschiedene Verfahren zur Kopräzipitation getestet.

## 2. Methode

Die von Hartmann et al. beschriebene Ausscheidungsanalyse von Ac-225 aus 24-Stunden-Urin besteht aus vier Schritten: Fällung, Trennung, Messpräparatsherstellung und Messung.

Die Kopräzipitation wird durchgeführt, um das Volumen der Probe zu minimieren und um organisches Material zu entfernen. Daraufhin wird die restliche organische Matrix zersetzt. Anschließend erfolgt für die Trennung der gesuchten Radionukliden aus der Lösung über eine Festphasenextraktion. Nach Herstellung des Messpräparates durch elektrolytische Abscheidung wird das Präparat im Alphaspektrometer gemessen. Als interner Standard wird Am-243 verwendet.

Für die Auswertung der erhaltenen Spektren werden die Impulse der spezifischen Energiebereiche (Am-243 und Ac-225) verwendet.

In dieser Arbeit wurde zunächst die komplette Analyse von Hartmann et al. mit Humanurin durchgeführt. Außerdem wurden bei den einzelnen Schritten synthetische Lösungen verwendet, um mögliche Optimierungspunkte unter kontrollierten Bedingungen zu identifizieren.

Aufgrund der Ergebnisse mit der bisher genutzten Säule DGA branched ergab sich die Vermutung, dass DGA branched Resin den Anforderungen für die Separation von Actinium nicht genügt. Die Kommunikation mit dem Hersteller deutet daraufhin, dass eine Separation von Americium und Actinium durch die DGA branched Säule nicht gleichermaßen möglich ist. Um die Ionenchromatographie zu optimieren, wurden daher verschiedene in Frage kommende Säulenmaterialien (RE, TK221 und TK222 von TrisKem International) getestet.

Anschließend wurde die komplette Analyse mit den als geeignet identifizierten Säulenmaterialien durchgeführt, um die Kompatibilität mit Humanurin zu untersuchen.

## 3. Ergebnisse

Die Methode von Hartmann et al. wurde erfolgreich reproduziert (s. Abb. 1). Bei den Schritten „Messpräparatsherstellung“ und „Trennung“ lagen die chemischen Ausbeuten von Am-243 bei ca. 80 % und sind mit den Angaben von Hartmann et al. vergleichbar. Bei der Durchführung der kompletten Analyse ergab sich eine deutlich höhere Ausbeute (s. Abb. 1).

Bei der Untersuchung der Festphasenextraktion zeigten alle drei getesteten Säulenmaterialien (RE, TK221 und TK222) sehr gute Ausbeuten mit über 80 % (s. Abb. 1).

Bei der Untersuchung der Säulenmaterialien in der kompletten Analyse mit Humanurin wurde die geringste chemische Ausbeute mit ca. 45 % bei der Nutzung von DGA branched Resin erzielt, sodass sich bisherige Vermutungen zum Säulenmaterial DGA branched bestätigten. Die Am-243-Ausbeute von TK221 Resin betrug im Durchschnitt ca. 56 %. Bei Nutzung der Säulenmaterialien RE und TK222 wurde eine Am-243-Ausbeute von bis zu 82 % erreicht, sodass diese beiden Säulenmaterialien vielversprechend für die Nutzung in der Ausscheidungsanalyse von Ac-225 aus Urin sind (s. Abb. 1).

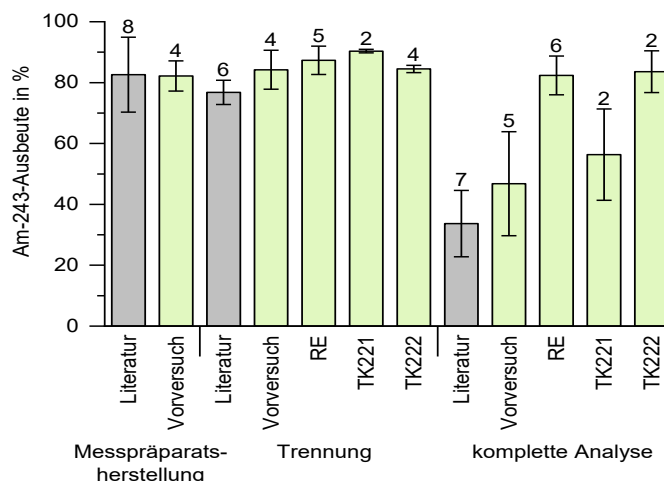


Abbildung 4: Mittelwerte und Standardabweichungen der chemischen Ausbeuten von Am-243 ab den verschiedenen Anfangsschritten und den verschiedenen Säulenmaterialien. Die Anzahl der Replikate ist über den jeweiligen Balken angegeben. Bei den grauen Balken handelt es sich um Ergebnisse aus der veröffentlichten Literatur von Hartmann et al., 2024.

#### 4. Fazit und Ausblick

Erste Ergebnisse zeigen höhere Ausbeuten des internen Standards Am-243 als von Hartmann et al. berichtet. Beim Testen von verschiedenen Säulenmaterialien stellten sich alle drei Säulenmaterialien (RE, TK221 und TK222) mit einer Am-243-Ausbeute von über 85 % als geeignet heraus. Bei Nutzung dieser Säulenmaterialien in der kompletten Methode der Ausscheidungsanalyse zeigte sich eine Am-243-Ausbeute von über 80 % für die Materialien RE und TK222. In den nächsten Schritten sollen diese Säulenmaterialien mit Ac-225 getestet werden, um festzustellen, ob die chemischen Ausbeuten in ähnlicher Größenordnung befinden, wie der interne Standard, oder drastisch sinken, wie in der Literatur bei der Nutzung von DGA branched Resin. Nachdem diese Untersuchung erfolgt ist, wird in den nächsten Schritten der Einfluss unterschiedlicher Kopräzipitationsverfahren überprüft.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Y.-S. Kim, M W. Brechbiel, An overview of targeted alpha therapy, *Tumor Biology*, 33, p. 573-590, 2012
- [2] C. Kratochwil, L. Apostolidis, H. Rathke, C. Apostolidis, F. Bicu, F. Bruchertseifer, P. L. Choyke, U. Haberkorn, F. L. Giesel, A. Morgenstern, Dosing <sup>225</sup>Ac-DOTATOC in patients with somatostatin-receptor-positive solid tumors: 5-year follow-up of hematological and renal toxicity, *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 49, p. 54-63, 2021
- [3] Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil 2: Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Inkorporationsüberwachung) (§§ 40, 41 und 42 StrlSchV) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007
- [4] S. Hartmann, K. Taubner, T. Vogt, O. Meisenberg, U.-K. Schkade, C. Steyer, M. Meckel, C. Kesenheimer, Actinium-225 as an example for monitoring of internal exposure of occupational intakes of radionuclides in face of new nuclear-medical applications for short-lived alpha emitting particles, *Radiation and Environmental Biophysics*, 63, 385-394, 2024

# **P5: BEWERTUNG DER BERÄUMTEN AUFSTANDSFLÄCHE DER LOKHALDE AM STANDORT SEELINGSTÄDT DER WISMUT GMBH**

Brottka Kristina, Kohlhepp Bernd

*Wismut GmbH, Deutschland*

## **Zusammenfassung**

*Am Sanierungsstandort Seelingstädt der Wismut GmbH können Halden des Uranbergbaus bei der In-situ Verwahrung der Industriellen Absetzanlage (IAA) Culmitzsch eingebaut werden. Die Lokhalde wird vollständig abgetragen und die Aufstandsfläche freigelegt. Das Haldenmaterial birgt sehr unterschiedliches Potenzial hinsichtlich mobilisierbarer Schadstoffe wie Uran, Radium-226, Arsen und Schwermetalle. Durch die jahrzehntelange Liegezeit können durch Sickerwasser Schadstoffe in den geogenen Untergrund gelangt sein. Im Hinblick auf die Nachnutzung, ist eine Umweltbewertung zur Charakterisierung der von der Fläche ausgehenden Umweltbeeinflussung zu erstellen. Im Beitrag werden die Methoden zur Charakterisierung und ihre Ergebnisse vorgestellt. Es wurden radiologische In-situ-Messungen sowie Laboranalytik an Feststoffproben durchgeführt. Die geologische bzw. bodenkundliche Kartierung ist ein wesentlicher Bestandteil der Charakterisierung der Haldenaufstandsfläche. Für die bisher freigelegte Teilfläche konnte nachgewiesen werden, dass aus radiologischer Sicht und aus Sicht des Bodenschutzes keine Einschränkungen für eine Nachnutzung vorliegen.*

**Schlüsselwörter** *Strahlenschutz, Radioökologie, Haldenaufstandsfläche, Wiedernutzbarmachung*

**Key words** *Radiation protection, Radioecology, Remediation*

## **1. Einleitung**

Die Umlagerung von Halden ist eine der möglichen Sanierungsoptionen für die Hinterlassenschaften des Uranbergbaus. Die Umlagerung bietet den Vorteil einer Wiederherstellung der Landschaft, setzt aber voraus, dass es Kapazitäten für die Einlagerung der Massen an einem anderen Ort gibt. Am Sanierungsstandort Seelingstädt der Wismut GmbH besteht durch die In-situ Verwahrung der Industriellen Absetzanlage (IAA) Culmitzsch die Möglichkeit, Material der umliegenden Halden auf der IAA einzubauen. Das Haldenmaterial birgt sehr unterschiedliches Potenzial hinsichtlich mobilisierbarer Schadstoffe wie Uran, Radium-226, Arsen und Schwermetalle. Durch die jahrzehntelange Liegezeit können durch Sickerwasser Schadstoffe in den geogenen Untergrund gelangt sein. Im Hinblick auf die Nachnutzung, ist eine Umweltbewertung zur Charakterisierung der von der Fläche ausgehenden Umweltbeeinflussung zu erstellen. Die Bewertungsgrundlagen nach Strahlenschutz und Bundesbodenschutz sowie die Beurteilung der Bewuchsfähigkeit erfordern ein interdisziplinäres Vorgehen. [1], [2], [3], [4], [5]

## **2. Zur Geschichte der Lokhalde**

Die Lokhalde wurde auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen aus Abraum des Tagebaus Culmitzsch (Uranerzgewinnung) aufgeschüttet. Das Material der Halde bestand bzw. besteht größtenteils aus Sandsteinen, Schluffsteinen, Tonsteinen, Konglomeraten und Tonschiefern sowie Dolomiten. Die Verkipfung auf der Lokhalde erfolgte bis 1964. Mit dem

Beginn der Sanierung der Industriellen Absetzanlage (IAA) Culmitzsch und der IAA Trünzig wurde Lokhaldenmaterial zur Abdeckung der freifallenden Spülränder und Tailingsflächen eingesetzt, der Stand 1992 ist im Luftbild der Abb. 1 zu sehen. Mit fortschreitender Sanierung kam Lokhaldenmaterial dann als Konturierungs- und Abdeckmaterial zum Einsatz. Seit 2004 ist der vollständige Abtrag der Lokhalde bis zur ursprünglichen Topografie genehmigt. Die Abtragsarbeiten sind noch nicht abgeschlossen (siehe Abb. 2). Da die Flächen für Erdstofflager benötigt werden, wird die Charakterisierung fortlaufend nach Abtragsfortschritt vorgenommen.



*Abb. 5: IAA Culmitzsch und die Lokhalde (links im Bild) in einer Luftaufnahme aus dem Jahr 1992*



*Abb. 6: Abtragsarbeiten auf der Lokhalde im April 2024*

### **3. Methodik zur Charakterisierung der Haldenaufstandsfläche**

Für die Charakterisierung von Haldenaufstandsflächen hat sich ein stufenweises Vorgehen bewährt. In einem ersten Schritt werden Rastermessungen der Gamma- und Betastrahlung in einem 10 m x 10 m Raster vorgenommen. Gleichzeitig wird eine Kartierung durchgeführt. Bei Auffälligkeiten der Rastermessung oder der Kartierung können zeitnah Feststoffproben aus der

obersten Bodenschicht entnommen und gammaspektrometrisch analysiert werden. Die ersten Feststoffproben dienen auch zur Überprüfung der Kalibrierfaktoren für die Auswertung der Rastermessungen bezüglich der Nuklide Uran-238, Radium-226 und Kalium-40. Mit Hilfe von Baggerschürfen kann eine Erkundung des oberflächennahen geogenen Untergrunds durchgeführt werden. Die Verteilung der Schürfe erfolgt nach radiologischen Gesichtspunkten und unter Beachtung einer gleichmäßigen Verteilung auf der Fläche. Es erfolgt eine geologische Kartierung, eine bodenkundliche Ansprache sowie eine Probenahme jeder geologischen Einheit. Die Feststoffproben werden wiederum mit Hilfe der Gammaskpektrometrie auf ihren Nuklidgehalt hin untersucht. Weiterhin finden an den gleichen Proben Untersuchungen nach [4] und die Bestimmung der Bodenreaktion sowie von bodenphysikalischen Parametern statt. Der aus radiologischer Sicht zu bewertende Luftpfad wird mit Messdaten des sanierungsbegleitenden Monitorings und des Basismonitorings beurteilt.

#### 4. Ergebnisse der Untersuchungen

Bisher wurde eine Fläche von ca. 3,9 ha der mehr als 80 ha umfassenden Aufstandsfläche der Lokhalde bewertet. Die Messungen und Kartierungen auf der bisher freigelegten Aufstandsfläche (siehe Abb. 3) wurden zwischen Oktober 2023 und Juli 2024 durchgeführt.



*Abb. 7: Freigelegte Haldenaufstandsfläche, anstehend Tonschieferzersatz, die quartären Deckschichten fehlen*

Die Rastermessungen umfassten 404 Messpunkte. Die Gammamessung ergab Werte zwischen 106 nSv/h und 198 nSv/h bei einem Mittelwert von 143 nSv/h. Daraus ergibt sich kein Hinweis auf eine Radium-226-Kontamination. Die Betamessung ergab keine Hinweise auf Urankontaminationen. Da die Rastermessungen keine Hinweise auf das Vorliegen radioaktiver Kontaminationen lieferten, wurde eine relativ geringe Anzahl von 12 Spatenproben genommen und ausgewertet. Weiterhin wurden zehn Baggerschürfe zur Erkundung angelegt. Die geologische Kartierung ergab das Vorliegen von Tonschieferzersatz mit nur noch teilweiser Auflage der quartären Lösslehmerde.

Alle Feststoffproben wurden gammaspektrometrisch untersucht. Der Mittelwert über alle Feststoffproben beträgt für Uran-238 0,05 Bq/g und für Radium-226 0,06 Bq/g. Für die Feststoffproben aus den Baggerschürfen kann die spezifische Aktivität für Proben aus dem Lösslehmhorizont und für Proben der Tonschieferverwitterung getrennt betrachtet werden. Die Mittelwerte liegen für Lösslehm bei 0,05 Bq/g für Uran-238 und 0,06 Bq/g für Radium-226.

Proben aus dem Tonschieferverwitterungshorizont weisen Mittelwerte von 0,06 Bq/g für Uran-238 und 0,06 Bq/g für Radium-226 auf. Trotz der geringen Abweichung im Mittelwert der beiden Nuklide kann von einem radioaktiven Gleichgewicht in den Proben ausgegangen werden. Die Werte übersteigen nicht den Prüfwert von 0,2 Bq/g für die Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232 nach [2]. Die spezifischen Aktivitäten entsprechen den natürlichen Hintergrundwerten und geben keinen Hinweis auf eine Beeinflussung durch das Haldenmaterial.

Neben den radiologischen Gesichtspunkten ist die Beurteilung nach [3] wesentlich für die Ableitung von Sanierungsmaßnahmen. Es wurde der Gehalt an anorganischen Schadstoffen im Feststoff, der Anteil wasserlöslicher Stoffanteile im Eluat und die Bodenreaktion bestimmt. Die Ergebnisse zeigen keine wesentliche Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen. Lediglich für Arsen wurde mit dem Maximalwert von 58,7 mg/kg ein Wert über den in [4] vorgegebenen Prüfwerten ermittelt. Im Mittel liegt der Arsengehalt bei 16,9 mg/kg, so dass nicht von einer schädlichen Bodenveränderung ausgegangen wird. Die Auswertung der Bodenreaktion ergab Werte im leicht sauren Bereich. In den Eluaten wurden nur geringe Schadstoffkonzentrationen nachgewiesen. Die Einschätzung der Bewuchsfähigkeit nach [5] ergab für den Tonschieferzersatz und die Lösslehme gute Eigenschaften mit ausreichend nutzbarer Feldkapazität.

## 5. Schlussfolgerung

Auf dem bereits freigelegten Teil der Aufstandsfläche der Lokhalde erfolgte ein umfangreiches Messprogramm zur Charakterisierung der eventuell durch die Liegezeit des Haldenmaterials eingetretenen Beeinflussungen. Das Ziel war eine Erfassung der nun durch die Aufstandsfläche selbst ausgehenden Umweltbeeinflussung. Darauf aufbauend sollten notwendige Maßnahmen der Sanierung und Wiedernutzbarmachung abgeleitet werden. Die Auswertung der Messungen ergab, dass in diesem Teilbereich der Lokhalden-Aufstandsfläche keine wesentliche Beeinflussung stattgefunden hat. Alle Werte bewegen sich im Bereich des natürlichen Hintergrundes. Für die geplante Nachnutzung als Grünfläche sind keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich. Es ist denkbar, eine höherwertige Nutzung, wie z.B. die Weidenutzung, zuzulassen.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist
- [2] Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist
- [3] Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.
- [4] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- [5] Scheffer, F., Schachtschnabel, P., Lehrbuch der Bodenkunde, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1992

## **P6: WE'RE OPEN! DIE NEUE RADON / THORON KALIBRIERKAMMER BEIM BFS - VORAUSSETZUNGEN FÜR RÜCKFÜHRBARE THORON-FOLGEPRODUKT-MESSUNGEN**

Feige Sebastian, Tugnoli Francesca

*Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Deutschland*

Gemäß Artikel 100 der Richtlinie 2013/59/EURATOM sind die EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um bestehende Expositionssituationen unter Berücksichtigung der Exposition gegenüber Radon zu ermitteln und zu bewerten sowie die entsprechenden Expositionen von Berufstätigen und Personen der Bevölkerung zu bestimmen. Die Anforderungen aus Artikel 103 gelten in gleicher Weise auch für die Thoron (Radon-220)-Exposition und fordern eine strategische Berücksichtigung von Rn-220 und Rn-220-Folgeprodukten in nationalen Radon-Aktionsplänen. Zentrale Frage ist: Ist die Exposition durch Thoron und seine Folgeprodukte bedenklich oder nicht? Die Voraussetzungen für die Entwicklung, Validierung und Kalibrierung geeigneter Messgeräte zur Bestimmung der Thoron-/Thoron-Zerfallsproduktexposition sind im Vergleich zu den umfangreichen Erfahrungen aus der Radonüberwachung weniger weit fortgeschritten. Rückgeführte Messungen von Thoron-Folgeprodukten sind derzeit nicht möglich. Zur Vorbereitung bundesweiter Erhebungen der Thoron-/Thoron-Folgeproduktkonzentrationen in Innenräumen hat das BfS die messtechnischen Möglichkeiten und Voraussetzungen für die Schaffung von Referenzatmosphären und die Kalibrierung im Rahmen des Forschungsvorhabens RadoNom zusammen mit polnischen Kolleginnen und Kollegen des GIG erörtert. Nach theoretischen Überlegungen nutzt das BfS nun auch die Erfahrungen aus dem RadoNorm-Projekt, um im nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Radon-Kalibrierlabor des BfS eine Thoron-/Thoron-Folgeprodukt-Referenzkalibrierkammer in Betrieb zu setzen. Diese soll in naher Zukunft eine qualitätsgesicherte messtechnische Rückführungen der Bestimmung der Thoron / Thoron-Folgeprodukt-Exposition gewährleisten und auch die Untersuchung messtechnischer Eigenschaften von Radon-Messgeräten ermöglichen. Wir stellen den erreichten Stand sowie weitere Planungen der Arbeiten vor.

## **P7: UNTERSUCHUNG DER RADONEXPOSITION VON BESCHÄFTIGTEN IN VERSCHIEDENEN UNTERTÄGIGEN ARBEITSBEREICHEN IN ÖSTERREICH**

Kunte Angelika, Gruber Valeria, Gräser Joachim

*Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Österreich*

Untertägige Arbeitsbereiche in Bergwerken, Schächten, Stollen, Tunneln und Höhlen sowie Schaubergwerken und -höhlen können eine erhöhte Radonkonzentration aufweisen. Sie unterliegen deshalb in Österreich bereits seit 2008 der gesetzlichen Verpflichtung zur Durchführung von Radonmessungen zum Schutz der Beschäftigten. Ausgenommen davon sind in Österreich Betriebsstätten, in denen eine künstliche Bewetterung nach dem Stand der Technik eingesetzt wird. Ebenso fallen Vereine als Betreiber vieler Schauhöhlen und Schaubergwerke nicht in die Radonmessverpflichtung. Außerdem ausgenommen sind Betriebe, in denen sich kein Beschäftigter mehr als 30 Stunden pro Jahr in den untertägigen Arbeitsbereichen aufhält. Bis 2023 gab es daher in Österreich wenige Daten zur Radonexposition von Beschäftigten in untertägigen Arbeitsbereichen. Im Rahmen des vom BMLUK finanzierten Projektes, dessen Ergebnisse als Poster im Rahmen der Tagung präsentiert werden sollen, wurden insgesamt 23 Betriebsstätten in unterschiedlichem Ausmaß zur Verfolgung nachstehend angeführter Ziele untersucht:

- Schaffung einer erweiterten, belastbaren Datengrundlage zur Radonsituation in untertägigen Arbeitsbereichen in Österreich
- Durchführung von Vergleichsmessungen von Radon und seiner Folgeprodukte in untertägigen Arbeitsbereichen zur Evaluierung des bislang bei der Dosisberechnung berücksichtigten Gleichgewichtsfaktors
- Erweiterung des aktuellen Kenntnisstandes hinsichtlich der Abschätzung der zu erwartenden Radonkonzentrationen und Radonexpositionen der Beschäftigten in den untertägigen Arbeitsbereichen
- Evaluierung des tatsächlichen Einflusses einer künstlichen Bewetterung der Stollen auf die Radonkonzentration sowie die Konzentration der Radon Folgeprodukte
- Untersuchung und Bewertung weiterer Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration in untertägigen Arbeitsbereichen

Evaluierung der aktuellen gesetzlichen Vorgaben insbesondere der oben angeführten Ausnahmekriterien für untertägige Arbeitsbereiche.

## **P8: NORMs and beyond**

REQUIREMENTS FOR THE RADIATION PROTECTION FOR RADON TIGHT  
REMEDICATION OF HEAPS OF THE URANIUM MINING LYING CLOSE TO LIVING  
AREAS

Stroncik Nicole

*Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Deutschland*

Today many scientists around the world are engaged in a discussion if the time we are living in should be defined as a new geological epoch, called Anthropocene, starting with the industrial revolution. Regardless if we call it Anthropocene it is beyond doubt and widely accepted that our species, has such a significant impact on Earth and its inhabitants that we will have a lasting - and potentially irreversible – influence. The most prominent impact is the one on climate and biodiversity, but our species changes the face of our planet in many different ways. NORM being one of them. Not only are NORMs used in different technologies but e.g. in mining operations or energy production we redistribute large amounts of NORMs often resulting in an artificial enrichment or making it available for interaction processes with rain or groundwater. In this context we have to ask our self's if our species is even in the middle of creating new "NORMs". In this contribution I will evaluate this question based on globally available data from IAEA and other sources on the production and application of radiopharmaceuticals around the world focusing on radionuclides such as I-131 or Tc-99.

# PRÄSENTATION: VIRTUAL REALITY TRAINING FÜR DIE STRAHLENSCHUTZAUSBILDUNG

Koslowski David<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dornier Hinneburg GmbH, <sup>2</sup>Fakultät für Erziehungswissenschaften, Institut für Berufspädagogik und Berufliche Didaktiken, Technische Universität Dresden, Deutschland

## **Zusammenfassung**

Die Arbeit in radiologischen Umgebungen stellt hohe Anforderungen an die Sicherheit und das Qualifikationsniveau des Personals, während das reale Arbeitsumfeld als praktischer Lernort häufig ungeeignet ist. Der Einsatz von Virtual Reality-Technologie zur Simulation von Arbeitsumgebungen und -prozessen bietet einen technologiegestützten, ressourcenschonenden Lösungsansatz, der ein realitätsnahes, expositionsfreies Training unabhängig von Ort und Zeit ermöglicht. Um VR-Trainings als Instrument in der Lehre wirksam einzusetzen, ist eine lernzielorientierte Gestaltung des didaktischen Designs sowie eine sinnvolle curriculare Einbindung notwendig. In diesem Beitrag wird zunächst der projektbezogene Forschungshintergrund beschrieben, bevor die VR-Trainings aus dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt K.I.S.S. kurz vorgestellt werden, die im Rahmen der Jahrestagung in einem interaktiven Format präsentiert werden.

**Schlüsselwörter** Strahlenschutz, Virtual Reality, Ausbildung und Training  
**Key words** Radiation protection, Virtual Reality, Education & Training

## **1. Einleitung**

Virtual Reality (VR) bezeichnet die computergenerierte Darstellung interaktiver 3D-Umgebungen, in denen Nutzer mittels Head-Mounted Displays (z. B. VR-Brillen) in eine digitale Umgebung immersiv eintauchen können. Im Bereich der beruflichen Aus- und Weiterbildung werden VR-Trainingswelten eingesetzt, um prozedurales Wissen über komplexe oder gesundheitsgefährdende Arbeitsprozesse durch immersive Lernszenarien zu vermitteln [1]. Der Einsatz von VR-Technologie in der Strahlenschutzausbildung bietet aus didaktischer Perspektive verschiedene Potenziale, um praktische Ausbildungsprozesse qualitativ zu unterstützen. Durch eine originalgetreue Simulation der Arbeitsumgebung ermöglichen VR-Trainings ein praxisnahes, expositionsfreies Training unabhängig von Ort und Zeit. Die Rolle des didaktischen Designs sowie dessen Ausrichtung auf konkrete Lernziele wird im aktuellen Forschungsstand für ein erfolgreiches Training betont; gleichzeitig kann ein Bedarf an didaktischen Frameworks und empirisch fundierten Gestaltungsempfehlungen festgestellt werden [2]. Basierend auf dieser Erkenntnis werden im Rahmen einer Promotionsarbeit an der Fakultät für Erziehungswissenschaften am Institut für Berufspädagogik und Berufliche Didaktiken der TU Dresden theoretische Annahmen über Wirkungszusammenhänge didaktischer Gestaltungsfaktoren in VR-Trainings in der Praxis überprüft und basierend auf den Ergebnissen ein Gestaltungsempfehlungs-Framework für die Entwicklung und Integration von VR-Trainings für die Strahlenschutzausbildung in kerntechnischen Anlagen entwickelt.

## **2. Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen für das didaktische Design**

Um die Digitalisierung von Ausbildungsprozessen durch Virtual Reality zu unterstützen, werden theoretische Annahmen und Modelle zu Wirkungszusammenhängen des didaktischen

Designs auf den Lernprozess in der Praxis untersucht, relevante Gestaltungsfaktoren für den Anwendungsbereich Strahlenschutz identifiziert und konkrete Gestaltungsempfehlungen für das didaktische Design in einem adaptierbaren Framework modelliert. Als Datengrundlage dient neben der Fachliteratur die Beteiligung an verschiedenen Entwicklungsprojekten für VR-Trainings mit dem Schwerpunkt auf drei Use Cases:

1. Operativer Strahlenschutz: VR-Trainings für Mess- und Dekontaminationsprozesse in kerntechnischen Anlagen (*Forschungsprojekt K.I.S.S.*)
2. Nuclear Safeguards: VR-Training für Siegelprüfung und Siegeltausch an CASTOR-Behältern (*Forschungsprojekt K.I.S.S.*)
3. Praktikumsvorbereitung in der Lehre: Ergänzendes VR-Training für die Arbeitssicherheits- und Strahlenschutzunterweisung für die Reaktorpraktika am AKR-2 der TU Dresden (*Forschungsvorhaben*)

Anhand der entwickelten VR-Trainings werden durch Nutzertests der Einfluss verschiedener Gestaltungsfaktoren auf den Lernerfolg untersucht. Einen zentralen Untersuchungsgegenstand stellt dabei das Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL) dar, welches als theoretisches Framework beschreibt, wie affektive und kognitive Faktoren in immersiven Lernumgebungen das Lernergebnis beeinflussen [3]. Im speziellen werden aus dem CAMIL-Modell die Einflussfaktoren Präsenzerleben (subjektives Gefühl, wirklich in der VR anwesend zu sein) und Verkörperung (subjektives Gefühl, einen virtuellen Körper zu haben) fokussiert und deren Einfluss auf die Sensibilisierung für Strahlenschutz durch das VR-Training untersucht. Methodisch werden qualitative Nutzertests mit den VR-Trainings durchgeführt, die mithilfe von Fragebögen, Tiefeninterviews und Trainingsbeobachtungen den Einfluss des didaktischen Designs auf den Lernerfolg erfassen. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen werden relevante Gestaltungsfaktoren identifiziert, deren mögliche Ausprägungen im Strahlenschutzkontext charakterisiert und ein erstes Prototyp-Modell an Gestaltungsempfehlungen entwickelt.

Im zweiten Untersuchungsteil der Forschungsarbeit wird das Prototyp-Modell im Rahmen einer partizipativen Konzeptentwicklung mit einer Fokusgruppe aus Strahlenschutzexperten, VR-Trainern und Softwareentwicklern evaluiert und zu einem adaptierbaren, didaktisch fundierten Gestaltungsempfehlungs-Framework für VR-Trainings in der Strahlenschutzausbildung in kerntechnischen Anlagen weiterentwickelt.

### **3. Entwicklung von VR-Trainings im F&E Verbundprojekt K.I.S.S.**

Auf der Jahrestagung des Fachverbandes werden die VR-Trainings aus dem Forschungsprojekt K.I.S.S. vor Ort präsentiert und können im Rahmen eines interaktiven Formates von den Teilnehmern eigenständig erprobt werden. Die Entwicklung der VR-Trainings stellt dabei einen Teilbereich des Projektes K.I.S.S. dar, das im Folgenden näher vorgestellt wird.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „K.I.S.S. - Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz.“ beschäftigt sich mit Entwicklung von digitalen und KI-gestützten Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kerntechnischer Anlagen. Das Forschungsprojekt K.I.S.S. wird über das Förderkonzept „Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (FORKA)“ vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert (Förderkennzeichen: 15S9448G) und hat eine Laufzeit von drei Jahren seit Mai 2024. Die sieben Verbundpartner actimondo eG, Advanced Nuclear Fuels GmbH, Dornier Hinneburg GmbH, F.I.R. an der RWTH Aachen, Forschungszentrum Jülich GmbH (Institut IFN-2), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH und Technische Universität Dresden (Center for Open Digital Innovation and Participation) entwickeln in vier Arbeitsbereichen praxisorientierte Softwarelösungen:

- Entwicklung einer Community-Plattform für die kerntechnische Branche, inklusive Information- und Learning-Area sowie einer mobilen Trainingsstation mit VR-Trainings für kerntechnische Anlagen
- Entwicklung einer digitalen Plattform, die atomrechtliche Aufsichts- und Genehmigungsverfahren durch den Einsatz von Blockchain-Technologie transparenter, reversionssicherer und ressourcenschonender für die beteiligten Stakeholder gestaltet.
- Entwicklung eines KI-gestützten Rückbaumangementsystems, zur Analyse von Dokumenten und Anlagendaten zur Verbesserung der Entscheidungsgrundlage für die Planung und Durchführung. [4]

Die VR-Trainings aus dem ersten Arbeitsbereich umfassen jeweils zwei Trainingsszenarien zu den Use Cases „Operativer Strahlenschutz“ und „Nuclear Safeguards“. Sie ermöglichen es den Anwendern unter Anleitung eines Trainers, interaktive Prozessabläufe in fiktiven, aber realitätsnahen kerntechnischen Anlagen immersiv zu durchlaufen. In den Trainingsszenarien für den „Operativen Strahlenschutz“ müssen die Anwender nach korrekter Auswahl der persönlichen Schutzausrüstung und Werkzeuge zunächst Kontamination mithilfe geeigneter Messgeräte lokalisieren, den Dekontaminationsprozess mit den entsprechenden Werkzeugen durchführen und nach einer Abschlussmessung die vorschriftsgemäße Entsorgung vornehmen. Bei den „Nuclear Safeguards“ Trainingsszenarien steht die Prüfung und der Austausch von Siegeln an CASTOR-Behältern im Vordergrund. Die Anwender führen zunächst die Arbeitsvorbereitung durch und absolvieren anschließend im virtuellen Zwischenlager oder der Reaktorhalle die einzelnen Prozessschritte am Siegel. Die Entwicklung der VR-Szenarien befindet sich derzeit in der Endphase und wird noch im Jahr 2025 abgeschlossen werden.

#### 4. Literaturverzeichnis

- [1] Wölfel, M. (2023): *Immersive Virtuelle Realität – Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg: 329-333. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66908-2>
- [2] Pakarinen, S., Laarni, J., Kosikinen, H., Passi, T., Liinasuo, M. & Salonen, T.-T. (2024) *Virtual-Reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review*. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 169: 10-11. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105104>
- [3] Makransky, G. & Petersen, G. B. (2021) *The cognitive affective model of immersive learning (CAMIL): a theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality*. *Educational Psychology Review*, 33(3): 937-958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
- [4] Kettler, J., Wippler, D., Anthofer, A., Grauel, B., Koslowski, D., Göpel, C., Nester, A., Löwig, M., Hammoud, R., Ibeawuchi, P., Grahlmann, J., Wiesel, H., Rathaus, A., Seher, H., Mönig, H., Dierschow, F., Spanier, R., Dewald, M., Britz, S., ... Thomas, A. (2025). *Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kerntechnischer Anlagen-Das Forschungs-und Entwicklungsvorhaben „KISS“*. *Atw-International Journal for Nuclear Power*, 70(1), 41-48.

## Autorenindex

- A**
- Acker M. 29  
Alisch-Mark M. 72  
Antignani S. 45
- B**
- Balanov M. 45  
Baschke M. 115  
Bauer L. 132  
Bauer M. 65  
Baumann S. 79  
Bayer T. 105  
Becker F. 110, 135  
Birkhan J. 7  
Biswas S. 110, 135  
Bochicchio F. 45  
Borkowski T. 139  
Bothe M. 7  
Breckow J. 11  
Brottka K. 144  
Buttig F. 106
- C**
- Carpentieri C. 45  
Cinelli G. 45  
Collatz R. 7
- D**
- Dagan R. 110, 135  
Dangl V. 95  
Dehnert J. 50  
Di Carlo C. 45  
Döker R. 15, 25  
Drobot B. 29  
Dubios M. 114
- E**
- Engelhardt J. 50
- F**
- Feige S. 148  
Feinhals J. 7, 83  
Fleischhammer M. 46  
Friedemann S. 72  
Funke L. 7
- G**
- Gärtner G. 121  
Gaskin J. 45  
Geib T. 72  
Gellermann R. G. 7, 122  
Gendotti U. 99  
Geworski L. 15, 25, 140
- Götzendorfer A. 79  
Gräser J. 79, 149  
Grimm V. 65  
Gruber V. 41, 45, 79, 149  
Guhr A. 50
- H**
- Harstrick A. 115  
Hauko B. 121  
Heinrich T. 72  
Heinrichs C. 104  
Heller A. 29  
Hellhammer R. 41  
Himmelbauer K. 79  
Hoffmann A. 132  
Hofmann R. 46  
Holzapfel B. 139  
Hosoda M. 45
- I**
- Ielsch G. 45
- J**
- Jäkel O. 139  
Janik M. 45  
Jankuhn S. 73
- K**
- Kabrt F. 95  
Kaden T. 7  
Kahle P. 29  
Kalmbach P. 65  
Katzlberger C. 95  
Kerker S. 65  
Kieschnick M. 73  
Kohlhepp B. 144  
Koletzko G. 41  
Komorowski K. 15  
Kormoll T. 29  
Koslowksi D. 151  
Kraft-Bermuth S. 65  
Kraut W. 100  
Kunte A. 79, 149  
Kwasseau A. 65
- L**
- Lange A. 33  
Lange H.-J. 7, 25, 140  
Leichtle D. 139  
Linder R. 89
- M**
- Mandel M. 121  
Maringer F. J. 56  
Moubea C. 65

	<b>N</b>	Smale N. 139	
Nagels S. 41		Staubus S. 21	
Nasse M. 139		Stroncik N. 150	
Neunzig M. 33		Szermerski B. 15	
Nordmeyer H. 139			<b>T</b>
	<b>P</b>	Tancioni P. 99	
Pehlivan J. 41, 139		Tate B. 45	
Petermann E. 45		Taut S. 29	
Pezenka J. 72		Theinert M. 104	
Pianski J. 72		Trautmannsheimer M. 41	
Poetsch M. 21		Tugnoli F. 148	
	<b>R</b>		<b>U</b>
Rabung T. 7		Ulakanathan-Thavarajah R. 140	
Rechenberger 95			<b>V</b>
Regner J. 96		Vahlbruch J.-W. 33	
Ringer W. 79		Voigts F. 121	
Ringer W. 45			<b>W</b>
Rudolf F. 15		Walther D. 29	
Ruprecht R. 139		Wanke C. 25, 140	
	<b>S</b>	Wilhelm C. 7	
Sahoo Bijay K. 45		Wurm G. 79	
Schlösser D. 41			<b>Z</b>
Schulz S. 73		Zapata K. 65	
Sedigheh S. 45		Zöchling R. 37	
Senn A.-C. 89			
Senwitz C. 29			
Serikov A. 139			