

Strahlentelex

Unabhängiges Informationsblatt zu Radioaktivität, Strahlung, Radon-Belastungen sowie aktuellen Umweltproblemen

ISSN 2749-8417 (print)
2748-873X (online)

www.kirchengemeinde-ronneburg.de



Ausgabe 02/2024
Preis: 2,40 €
Nr. 12
15.06.2024

Nuklearmedizin
Unterschätzung von Gesundheitsschäden durch Radioaktivität und Röntgen
Seite 3-7

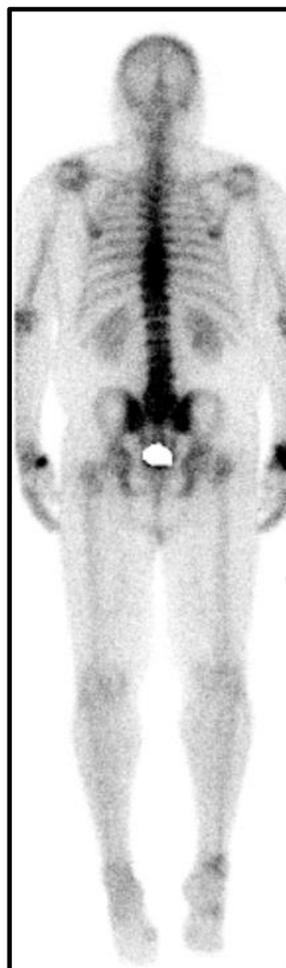
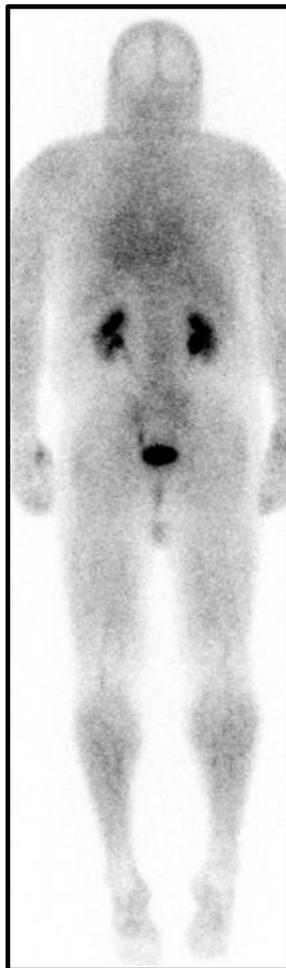
Medizinische Strahlenschäden
Beiträge zur Strahlenbelastung radiologischer und nuklearmedizinischer Diagnosen und Behandlungen
Seite 7-14

Atomwirtschaft
Small Modular Reactors
Seite 14/15

Uranbergbausanierung
Rückblick safeND 2023 in Berlin S. 16/17

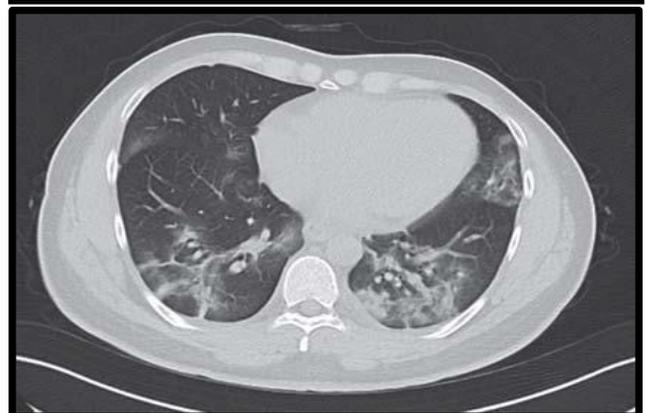
Regionales:
Inhouse-Radon in Ronneburg
auf Seite 18/19

Medizinische Strahlenbelastung



Eine Gammakamera in einem Computertomografen nimmt eine Ganzkörper-Mehrphasen-Szintigrafie des Skeletts eines Patienten auf, dem zuvor ein radioaktives Isotop verabreicht wurde (links). Im unteren Bild werden mit der gleichen Medizintechnik gefächerte Röntgenstrahlung im Bauchraum aufgenommen. Wo erfolgt die höhere Strahlungsbelastung des Patienten und wie relevant ist sie? Antworten finden sich in den Fachbeiträgen ab Seite 3.

A gamma camera in a CT scanner takes a whole-body multiphase scintigraphy of the skeleton of a patient who has previously been given a radioactive isotope (left). In the picture below, the same medical technology is used to take a fanned X-ray radiation in the abdominal cavity. Where does the patient's higher radiation load occur and how relevant is it? Answers can be found in the technical articles starting on page 3.



Darstellung einer Mehrphasen-Skelettszintigrafie in der Früh- und Spätphase (Beitrag S. 11)
Bildquelle Kirchlicher Umweltkreis

Ausschnitt einer schichtweisen Röntgenaufnahme der Computertomographie

informativ

Medizintechnische Strahlenbelastung

Um 130 Millionen Mal werden jährlich in Deutschland Röntgenaufnahmen realisiert; fast die Hälfte beim Zahnarzt incl. Kieferorthopädie. Der Anteil der strahlungsintensiven Computertomographie (CT) beträgt in etwa 10 %, dabei hat sie aber zwei Drittel der medizinisch verabreichten Strahlungsdosen zu verantworten. Hingegen verursachen die ca. 52 Mio. zahnmedizinischen Röntgenuntersuchungen lediglich 0,3%. Über 36 Mio. Skelett-Röntgenaufnahmen tragen rund 7% der effektiven Strahlungsdosen bei. Jede Aufnahme liegt meist deutlich unter 1 mSv, während CT die Palette bis rund 20 mSv belegt. Die dritte Kategorie der radiologischen Medizintechnik betrifft nuklearmedizinische Untersuchungen, deren Strahlungsdosen dazwischen einzuordnen wären. Studien weisen ein generelles Krebs-Risiko von 25% aus. Eine Röntgenaufnahme würde es statistisch auf 25,005% „heben“. Alle medizinischen Untersuchungen eines Menschenlebens aufsummiert ergeben 25,5%. „Hinweise“ auf Schäden sieht man in Bezug zu möglichen Schwangerschaftsfolgen ab 100 mSv. Jedoch räumt man ein, dass die DNA-Schädigungen entsprechend Zellteilungsrate und Zellstärkung der Organe exorbitant ansteigen können. Kein Grund zur Verniedlichung der Strahlungsgefahren. Der Individualfall ist maßgebender als statistische Auslegungen.

Endlagersuche für hochradioaktiven Abfall in Deutschland:

Zum zweiten internationalen Forschungssymposium für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung safeND, das vom 13. – 15.09.23 in Berlin mit über 300 Personen aus 15 Ländern stattfand, veröffentlichte BASE einen kurzen zusammenfassenden Rückblick (www.base.bund.de). Eine ausführlichere Darstellung ist für den Strahlentelex vom Bundesamt zur Verfügung gestellt worden (auf Seite 16/17).

Geophysikalischen Messmethoden der Endlagersuche: Das Forschungsprojekt „GeoMetEr“ soll die Eignung und Aussagefähigkeit von Methodenkombinationen in zwei Forschungsregionen untersuchen, um festzustellen, wie verlässlich Aussagen zur geologischen Situation zu erzielen sind. „**Seismische“ Schwingungsvibrationen**, erzeugt an der Erdoberfläche, können von unterschiedlichen Gesteinen und Materialien reflektiert werden. Daraus zieht man Schlüsse über die Geologie und Struktur des Untergrunds. **Messungen** des Erdmagnetfeldes **aus der Luft** erfassen magnetisierte Gesteine im Untergrund und können geologische Störungen abbilden. Bei den elektromagnetischen Messungen wird ein im Untergrund induziertes Magnetfeld ausgewertet. Da unterschiedliche Gesteine verschiedene Leitfähigkeiten aufweisen, lassen sich so Rückschlüsse auf die Geologie und Gesteinsarten ziehen. Zwei **Forschungsbohrungen** in zwei Forschungsregionen von bis zu 600 bzw. 1.500 Metern Tiefe sollen die oberflächennahen Messergebnisse bestätigen oder verwerfen und gleichzeitig die Erkundung geologischer Schichten in verschiedenen Tiefen testen (Gesteinsproben für Laboruntersuchungen). Die erste Forschungsbohrung soll in der erzgebirgischen Gemeinde Langenweißbach niedergebracht werden. Der dort vorhandene geologisch kristalline Untergrund mit Störungszonen soll nach Erfahrungen der Bergakademie Freiberg als „Lernobjekt“ besonders geeignet sein. *„Mit diesem sollen geophysikalische Messverfahren für übertägige Erkundungsprogramme entwickelt und untersucht werden, mit deren Hilfe in der nächsten Phase des Standortauswahlverfahrens die sogenannten Standortregionen minimalinvasiv, ohne nachhaltige Schädigung der tieferen Gesteinsschichten, erkundet werden können.“*
www.bge.de/de/endlagersuche/forschung/geometer

In dieser Ausgabe: Unser Titelthema leitet Frau Prof. Schmitz-Feuerhake mit einer Auswertung der aktuellen internationalen Studienlage zum Sachstand der Unterschätzung radioaktiver Niedrigstrahlung, des CT-Scannens und dem Röntgen ein. Im Anschluss folgen erklärende Beiträge zur radioaktiven Dosis in der Medizintechnik und deren Größenordnungen in den verschiedenen medizinischen Anwendungsbereichen. Somit kann der interessierte Leser eine Einordnung vornehmen, welche Strahlungsdosen ihn in medizinischen Vor-/Haupt- und Nachuntersuchungen sowie Behandlungen treffen können incl. seines gesundheitlichen Risiko. Anna Stender (Hamburg) fasst einen aktuellen Sachstand zum Hype um die kleinen **Atomreaktoren** zusammen. Die studierte Fachübersetzerin wertet hierzu internationale Statements und Veröffentlichungen der Atomwirtschaft aus. Die **Uranbergbausanierung** war 2023 Gegenstand mehrerer Symposien mit hoher internationaler Beteiligung, die eine Nachlese im Strahlentelex verdienen; heute dazu ein Beitrag von Carlo Dietl (BASE) zur wissenschaftlichen Tagung 13.-15.09.23 in Berlin. Die in der print-Ausgabe enthaltene **Beilage** setzt die Information zur aktuellen Lage der Kernkraftwerke in der Ukraine und die radioaktive Kühlwasserentsorgung in Fukushima fort. **Regionalthema** ist ein Beitrag zur **Radon-Inhouse- Belastung** in Ronneburg. Die Beilage erscheint online nur mit internationalem Teil und dort in englischer Sprache.

Impressum: Herausgeber Kirchlicher Umweltkreis Ronneburg (gegründet 1988); Erscheinungsort: Ronneburg (Deutschland); alle Rechte liegen bei dem jeweiligen Verfasser. Erscheint 4/a zum Druckkostenpreis der kolorierten print-Ausgabe; © Copyright 2024 by Frank Lange. Die hier und auf unserer Webseite veröffentlichten Inhalte und Werke unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Für den Inhalt sind die jeweiligen Autoren verantwortlich. Druck: Nicolaus & Partner - 04626 Nöbdenitz; Die online-Ausgabe erscheint s/w und mit englischer Beilage ab 15.06.2024 auf der Internetseite der Kirchengemeinde Ronneburg und vorab im Abo. **ISSN 2748-873X (online) 2749-8417 (Druckausgabe)** Unser besonderer Dank gilt **Herrn Thomas Dersee**, dem Herausgeber des Strahlentelex von 1987-2018, für seine stete Unterstützung unseres Projektes.

Medizinische Strahlenschäden

Neue Studien bestätigen die offizielle Unterschätzung von Gesundheitsschäden durch Radioaktivität und Röntgen

Inge Schmitz-Feuerhake, Hannover
Gesellschaft für Strahlenschutz e.V.

Einleitung

Atomenergie wird in politischen und wirtschaftlichen Kreisen erneut gepriesen, um als Übergangstechnik zur Bewältigung der Klimakrise zu dienen und auch als Kompensation des wegen des Ukrainekrieges untersagten Bezugs von russischem Gas. Man beruft sich dabei auf die WHO und andere internationale Komitees, nach deren Meinung die Reaktorunfälle von Tschernobyl und Fukushima keine nennenswerten Gesundheitsschäden in den betroffenen Bevölkerungen erzeugt haben. Auch hält man die zukünftige Gefahr großer Unfälle durch neue Generationen von Reaktoren für vernachlässigbar und die sichere Endlagerung für unproblematisch.

Diese Haltung hat in der Atomdiskussion eine lange Tradition (1). Schädliche Emissionen und ihre Folgen wurden offiziell stets bestritten oder relativiert und der Strahlenschutz von Arbeitnehmer:innen weitgehend der Obhut der jeweiligen Betreiber überlassen. In Deutschland hat Kanzlerin Merkel den Ausstiegsbeschluss 2013 mit der Gefahr großer Unfälle (Fukushima 2011) begrün-

det, aber nicht vergessen zu betonen, dass die deutschen Kernkraftwerke zu den sichersten der Welt gehören.

Röntgen- und radioaktive Strahlen gelten als „energiereiche“ Strahlung, d.h. ein einzelnes Strahlenquant kann das Erbmaterial in einer Körperzelle verändern. Darauf hat bereits der U.S. Genetiker und Nobelpreisträger Herman Joseph Muller (1890-1967) hingewiesen, der entdeckte, dass Röntgenbestrahlung bei Tauflieden zu Fehlbildungen bei den Nachkommen führt. Primär erzeugt sie u.a. sichtbare Verformungen von Chromosomen, die als Träger des Erbmaterials in Zellen schon früh bekannt waren. Muller beschrieb des Weiteren die Entstehung von strahleninduziertem Krebs aus einer einzelnen mutierten Körper-(Soma-) Zelle, von der eine unkontrollierte Wucherung ausgehen kann. Er wies darauf hin, dass auch die natürliche Umgebungsstrahlung mutagen und karzinogen ist, und warnte vor einer Anhäufung von künstlich erzeugter Radioaktivität in der Umwelt.

Mullers Erkenntnisse wa-

ren nach dem 2. Weltkrieg unerwünscht und er wurde als Kommunist und Staatsfeind verunglimpft. Sie führten jedoch zur Einführung der sog. LNT-Hypothese (Linear-No-Threshold) durch die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP, deren Empfehlungen die Grundlage für unsere Strahlenschutzgesetzgebung bilden. Damit ist gemeint, dass bei Bestrahlung einer großen Personengruppe mit niedriger Dosis die Anzahl verursachter Schäden proportional zur Gesamtdosis ist, also zur Summe aller einzelnen Dosen (Kollektivdosis). Es bedeutet, dass jeweils bei halber Dosis noch der halbe Effekt zu erwarten ist und es keine unschädliche Dosis bzw. Dosischwelle (Threshold) geben kann, das bekannte Argument der Antiatombewegung.

Es bedeutet auch, dass jedweder Dosisgrenzwert im Strahlenschutz den Tod oder die Erkrankung einer realen Anzahl von Personen zulässt, und gerechtfertigt werden muss. Als Bezugsgröße dient die natürliche Umgebungsstrahlung, deren Dosis bei uns mit **2-3 mSv** (Millisievert) pro Jahr beziffert wird.

Gegen die LNT-Hypothese führen die Atomlobby und etliche wissenschaftliche Expert:innen seit Langem einen heftigen Kampf. Und tatsächlich ist das Strahlenkomitee der Vereinten Nationen UNSCEAR¹, auf deren Datenerhebungen sich die ICRP stützt, seit 2016 darum bemüht, eine

praktische Dosischwelle von **100 mSv** für Effekte durch ionisierende Strahlung durchzusetzen. Sie behaupten, bei Dosen unterhalb von 100 mSv sei ein signifikanter Anstieg für die meisten Tumorarten nicht erkennbar (2). Zum genetischen Strahlenrisiko behaupten sie sowie auch im Gefolge die ICRP, beim Menschen liege kein Nachweis dafür vor, dass Kinder von bestrahlten Eltern einen Schaden davontragen (3). Fehlbildungen nach vorgeburtlicher Exposition (in utero) – ein klassischer Strahleneffekt – soll es nach ICRP neuerdings unterhalb einer Uterusdosis von 100 mSv auch nicht geben (4).

Die deutschen Fachinstanzen für den Strahlenschutz der Bevölkerung, das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK), Beraterin der Bundesumweltminister:in, haben mit dem Konzept von UNSCEAR und ICRP kein erkennbares Problem. Damit bleibt nicht nur eine Fülle von historischen Befunden nach Röntgendiagnostik und Umweltkontaminationen unbeachtet, sondern man ignoriert zahlreiche große Studien aus dem Berufsmilieu und nach Röntgendiagnostik aus den letzten 2 Jahrzehnten, die genau das Gegenteil zeigen (5;6).

Neue Ergebnisse zum somatischen Strahlenrisiko

Als Referenz für das Risiko pro Doseinheit werden weiterhin nur die Befunde

¹ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

an den japanischen Atom-bombenüberlebenden herangezogen (7;8). Auch diese zeigen jedoch keine Schwellendosis und das international hochangesehene Forschungsinstitut in Hiroshima weist darauf hin, dass Krebserkrankungen auch im Dosisbereich 0-100 mSv signifikant erhöht auftreten und nicht geringer sind, als es einem dosisproportionalen Risiko entspräche (9; 10).

Die LNT-Leugnung hätte spätestens aufgegeben werden müssen, nachdem ab den 1990er Jahren international etliche epidemiologische Studien an Werkträgern aus der Nuklearindustrie vorgelegt wurden, die bei durchschnittlichen Dosen im Kollektiv von nur 10-30 mSv deutliche Erhöhungen der Krebsmortalität zeigten. Dies führte zur Etablierung des Projektes INWORKS² bei der International Agency for Research on Cancer (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Lyon, in dem sich Institutionen aus mehreren europäischen Ländern und den USA zusammenschließen. Dadurch wurde seit 2015 in Meta-studien bestätigt, dass ein real erhöhtes Krebsrisiko für Arbeitnehmer:innen auch dann besteht, wenn die gesetzlichen Dosisgrenzwerte eingehalten werden.

Die neueste Analyse von INWORKS 2023 befasst sich speziell mit dem Dosisbereich 0-100 mSv (11). Sie ergibt, dass sich das Risiko eines berufsbedingten Krebstodes verdoppelt

gegenüber dem Risiko, das sich aus dem gesamten Dosisbereich bestimmen lässt. Im Niedrigdosisbereich zeigt sich, dass 10 mSv Arbeitszeitdosis das Risiko um 1 % erhöht. **Die Autoren weisen auf die Bedeutung für den Strahlenschutz hin.** Deutsche Daten sind in die Metaanalyse nicht eingeflossen.

In Deutschland veröffentlichte Prof. Dr. Michael Hauptmann von der Med. Hochschule Brandenburg Theodor Fontane zusammen mit 15 Kolleg:innen aus europäischen Ländern und den USA 2020 die Ergebnisse einer Metaanalyse anhand von 26 epidemiologischen Studien aus dem Niedrigdosisbereich über Krebserkrankungen, die nach 2006 erschienen sind (12). Alle untersuchten Kollektive wiesen eine mittlere Dosis unterhalb von 100 mSv auf. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Untersuchungen reale Erhöhungen des Strahlenrisikos durch sehr niedrige Dosen belegen.

Weitere Belege für Krebserkrankungen durch Niedrigdosisexposition liefert von jeher die Röntgendiagnostik. 1956 veröffentlichte die englische Epidemiologin Alice Stewart, dass das Röntgen von Schwangeren – damals ausgeführt bei Lageanomalien oder Zwillingsverdacht – Leukämie bei den später geborenen Kindern auslösen kann (13). Es ergab sich, dass eine einzige Röntgenaufnahme mit damaliger Dosis – etwa 5 mSv –

das Leukämierisiko verdoppelt, also um 100 % erhöht. Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprogramms über die Ursachen von Krebserkrankungen bei Kindern fortgesetzt und zeigten, dass auch andere Krebserkrankungen erzeugt werden können. Erst 40 Jahre später wurden diese Ergebnisse von der ICRP akzeptiert.

Während die Dosis von normalen Röntgenaufnahmen mit der Zeit gesenkt werden konnte, traten ab 1970 die CT- (Computer-Tomographie) Scanner auf den Plan, mit denen aus einer Vielzahl von Röntgenaufnahmen ein Querschnittsbild erstellt wird. **Nach Angaben des BfS entspricht die Dosis eines CT-Scans in Deutschland im Mittel etwa der Dosis von 30 konventionellen Röntgenaufnahmen**, s. unten. Daher liegen international inzwischen Ergebnisse über Krebserkrankungen nach CT bei Kindern und Erwachsenen vor (5).

2011 wurde bei der IARC ein Projekt EPI-CT (von „EPIdemologisch“) gegründet, um die Risiken durch pädiatrische CT zu untersuchen. Hauptmann und 20 weitere Autor:innen befassten sich mit dem Zusammenhang zwischen malignen Hirntumoren und CT-Untersuchungen des Kopfes bei Kindern und Jugendlichen anhand von Daten aus 8 europäischen Ländern (14). Die Ergebnisse, publiziert 2023, zeigen einen dosisproportionalen Zusammenhang und

die Autoren bestätigen ausdrücklich die LNT-Hypothese. Bei einer mittleren Hirndosis des Kollektivs von 47,4 mSv zeigten sich die malignen Tumore um 60 % erhöht und die Verdopplungsdosis³ ergibt sich somit zu 79 mSv.

Hauptmann ist auch Mitautor der jüngst erschienenen Auswertung der EPI-CT-Daten, die sich mit Leukämie und anderen Blutkrebserkrankungen befasst (15). Die Verdopplungsdosis ergibt sich zu 51 mSv, die mittlere Dosis pro Untersuchung in Deutschland zu 23 mSv.

Aus der Fachliteratur ist zudem seit Langem bekannt, dass auch nicht maligne Erkrankungen durch niedrige Dosen ionisierender Strahlung erzeugt werden können, dazu gehören gutartige Tumoren in verschiedenen Organen und Geweben, Herz/Kreislauf-leiden, Erkrankungen des Blutes, des Atemtrakts, der Harnwege, der Leber, des Magen/Darm-Trakts und der Augen sowie Schädigungen des Immunsystems und Entzündungsreaktionen (5; 6).

Zur Frage strahleninduzierter Herz-Kreislauf-Erkrankungen berichtete 2023 der Medizinstatistiker Mark P. Little zusammen mit 15 internationalen Kolleg:innen über eine weitergehende Metaanalyse (16). Erfasst wurden vier Krankheitsgruppen an Erkrankungen von Herz- oder Hirngefäßen sowie anderen Herz-Kreislauf-Erkrankungen aus 93 Artikeln der wissenschaft-

² International Nuclear Workers Study

³ Die Verdopplungsdosis ist diejenige Dosis, bei der sich

die Krebsrate um 100 % gegenüber dem

Normalvorkommen erhöht, also verdoppelt.

lichen Literatur. Die Expositionen waren durch medizinische Anwendungen, berufliche Exposition oder Umweltkontaminationen erfolgt. Die Studie bestätigt die grundsätzliche Induzierbarkeit von tödlichen Herzinfarkten und Schlaganfällen durch ionisierende Strahlung. Bei niedriger Dosis sind die Ergebnisse weniger kompatibel. Jedoch nahmen die Effekte pro Dosisleistung, also bei chronischer Bestrahlung, zu. **Die Autor:innen kommen zu dem Schluss, dass das Strahlenrisiko bisher wahrscheinlich unterschätzt worden ist und fordern, dass der Strahlenschutz und die Bemühungen zur Dosissenkung überdacht werden sollten.**

Neue Ergebnisse zum genetischen Strahlenrisiko

Die groteske Leugnung eines Strahlenrisikos für die Kinder bestrahlter Eltern durch UNSCEAR und ICRP (1) stützt sich auf Befunde von den japanischen Atombombenüberlebenden. Bei ihnen wird eine einmalige Exposition während der Explosion angenommen. Strahlenkritiker haben darauf hingewiesen, dass die unterschiedliche Empfindlichkeit der Keimzellen in ihren verschiedenen Entwicklungsstadien beachtet werden muss (5).

Die Stammzellen in den Gonaden sind bei beiden Geschlechtern relativ unempfindlich gegenüber der Ausbildung lebensfähiger Mutationen. Bis zur Entstehung der reifen Spermien bei Männern durchlaufen

die Tochterzellen verschiedene Teilungsstadien bis sie durch die sogenannte Reifeteilung (Meiose) in solche mit halbem Chromosomensatz übergehen (haploid). Die Zeitdauer der Spermatogenese beträgt etwa 86 Tage. Nach Erkenntnissen der Strahlenbiologie muss man Erbschäden besonders nach Exposition in einem Zeitraum kurz vor der Zeugung erwarten, bei den Atombombenüberlebenden also bei Konzeptionen kurz nach der Explosion. Die systematische Untersuchung der gesundheitlichen Folgen in Hiroshima begann aber erst 5 Jahre nach den Explosionen. Außerdem waren die Überlebenden in Japan eine sozial geächtete Population und es ist anzunehmen, dass betroffene Eltern Schädigungen bei ihren Kindern verschwiegen haben, so dass das wahre Ausmaß in den späteren Studien unterschätzt wurde.

Die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit der Spermien wird durch Arbeiten einer deutschen Forschungsgruppe bestätigt (17). Prof. Dr. Björn Schumacher vom *Institut für Genomstabilität in Alterung und Erkrankung* der Universität zu Köln leitet das Projekt, das von der Deutschen Krebshilfe gefördert wurde. Für die Autoren besteht kein Zweifel, dass es genetisch generierte Strahlenschäden beim Menschen gibt. Nach ihren Angaben entstehen etwa 80% der aus der Elterngeneration übertragenen Mutationen in der männlichen Keimbahn. Die Arbeit diene der Aufklärung der zu Grunde

liegenden Prozesse. Ihre Experimente führten sie zunächst an einem Fadenwurm als Modellsystem aus und konnten sie später auf menschliche Zellen übertragen. Sie fanden heraus, dass die reifen Spermien besonders strahlenempfindlich sind, weil aufgrund ihrer spezifischen Struktur Reparatursysteme ausfallen. **Sie fordern den Schutz vor mutagenen Expositionen besonders in den zwei Monaten vor Konzeption.** Ihre weiteren Forschungen sollen von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert werden.

Ihre Forderung entspricht der in den BUND-Stellungnahmen zum genetischen Strahlenrisiko (1; 5) vorgetragenen Notwendigkeit der Beachtung der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit der Keimzellen während der Spermatogenese. Diese wurde auch nicht in der 2021 publizierten Studie von Yeager et al. (18) berücksichtigt, in der die genetischen Effekte bei Nachkommen schlicht abgestritten werden. Sie stützt sich auf unspezifische Abweichungen im Vergleich von DNA-Analysen bei Eltern und Kindern von sog. Liquidatoren, die mit Dekontaminationsaufgaben nach dem Reaktorunfall 1986 in Tschernobyl beschäftigt waren.

Ein anderer Entstehungsmechanismus liegt beim Down-Syndrom vor, das ebenfalls durch ionisierende Strahlung – vornehmlich bei der Mutter – erzeugt werden kann. Dies hatte sich insbesondere nach Tschernobyl gezeigt.

Darüber berichten Sperling, Scherb und Neitzel 2023 und fordern ein Monitoring (19).

Schlussfolgerungen

Die LNT-Hypothese ist keine äußerst vorsichtig und konservativ angenommene Schutzannahme für den Umgang mit ionisierender Strahlung, die nach Ansicht früherer SSK-Mitglieder aus statistischen Gründen niemals bewiesen werden kann und wahrscheinlich gar nicht zutrifft, sondern sie ist biologisch und biophysikalisch begründet und wird in großen epidemiologischen Studien überzeugend belegt. Darüber hinaus ergibt sich aus diesen Studien durchweg ein deutlich höheres Strahlenrisiko für Krebs als es offiziell anhand der japanischen Daten angenommen wird, in der Studie INWORKS von 2023 etwa 3-mal so hoch (11). Die oben dargestellten Ergebnisse zeigen ferner, dass nicht nur Krebserkrankungen als die entscheidende Strahlengefahr bei niedrigen Dosen gelten dürfen, wie noch im Jahre 2023 von der SSK angesetzt wird (7), sondern ein reichhaltiges Spektrum an weiteren somatischen Erkrankungen sowie insbesondere auch die mit Sicherheit anzunehmenden gravierenden Schädigungen der Nachkommen.

Wir müssen davon ausgehen, dass man im offiziellen Strahlenschutz keinen Handlungsbedarf zur Verringerung von Strahlenbelastungen der Bevölkerung sieht, da man ja internationale Standards einhält. Im Jahr 2011 (!) hatten Forscher:innen an Hand des

Geburtenregisters Mainzer Modell erhöhte Fehlbildungsraten bei Kindern von Frauen gefunden, die in der Radiologie gearbeitet hatten (20). In der Folgestudie wiesen bei 27 Geburten 8 Neugeborene schwere Fehlbildungen auf (21). Dies entspricht im Vergleich zur Kontrollrate einer Erhöhung um 380%! Dieser alarmierende Befund, der aber den offiziellen Annahmen über vorgeburtlich erzeugte Strahlenfolgen widerspricht, fand kein Forschungsinteresse bei SSK und BfS. Stattdessen wurde das Geburtenregister in Mainz nicht weitergeführt.

Dieses Desinteresse dient nicht nur den Propagandisten für Kernenergie als Klimaretter und dem nicht so peniblen Umgang mit den Relikten dieser Technik. Es dient auch einem zu wenig kritischen Umgang mit Röntgen- und nuklearmedizinischen Untersuchungen in der Medizindiagnostik.

Das BfS berichtet im Jahr 2023, dass etwa 13 Millionen CT-Untersuchungen jährlich in der BRD durchgeführt werden, die mittlere effektive⁴ Dosis pro Untersuchung sei durch den Einsatz moderner Techniken auf 5,9 mSv gesenkt worden gegenüber 7 mSv von früher. Das bedeutet, dass im Mittel jede Bürger:in alle 6,4 Jahre eine CT-Untersuchung erfährt, in 70 Jahren dann auf 11 CTs zurückblicken kann (64,9mSv). Das gälte dann, wenn die Zahl der

CTs nicht noch weiter ansteigen würde.

Für die mittlere effektive Dosis von konventionellen Röntgenuntersuchungen wird vom BfS ein Wert von 0,22 mSv angegeben (22).

Es geht nicht darum, das diagnostische Röntgen abzuschaffen, es ist anscheinend unverzichtbar. Jedoch bleibt das Prinzip der „rechtfertigenden Indikation“, dem genügt werden soll, eine hohle Phrase, wenn den Ärzt:innen nicht bekannt gemacht wird, dass konkrete schwerwiegende Strahlenschäden durch niedrige Strahlenexpositionen tatsächlich erzeugt werden und nicht nur eine übervorsichtig angenommene äußerst seltene Nebenwirkung darstellen.

Das Argument, dass die absolute Anzahl an Schädigungen bei sehr niedriger Dosis nur sehr gering sei, berücksichtigt nicht, dass z.B. die gesamten CT-Befunde nur in beschränkten Zeitfenstern erhoben wurden, in der Hirntumorstudie von Hauptmann et al. (14) betrug es im Mittel nur 5-6 Jahre. Bekanntlich können strahleninduzierte Krebserkrankungen aber lebenslang auftreten. Bei Krebs im Kindesalter war das medizinische Streben stets darauf gerichtet, die Fallzahlen trotz ihrer relativen Seltenheit zu reduzieren. Stattdessen sind sie seit den 1970-er Jahren erheblich angestiegen.

Man geht davon aus, dass die meisten Untersuchungen bei alten Menschen erfolgen, wo dann Spätfolgen nicht mehr eintreten. Da die letzten spezifischen Angaben des BfS dazu nur bis in das Jahr 2014 reichen und einen erheblichen CT-Anstieg in allen Altersklassen zeigen (22), gibt es dazu aber keine gesicherten Zahlen.

Neuerdings empfiehlt das BfS auch das Lungenkrebscreening für Raucher durch „Low-dose“ CT. Das halte ich für unverantwortlich. Denn Niedrigdosis-CT kann es gar nicht geben, da eine CT immer mehrfache Röntgenaufnahmen am Objekt erfordert. Screeningprogramme mittels Röntgen bedürfen der Genehmigung, da sie an gesunden Personen durchgeführt werden. Bisher war das einzige zugelassene Screening in Deutschland dasjenige mit Mammographie (MSP). Dieses wurde 2005 eingeführt mit der Erwartung, dass die Sterblichkeit an Brustkrebs dadurch um 30% gesenkt werden könne. Bereits vor dieser Zeit begann die Brustkrebssterblichkeit (altersstandardisiert) geringfügig aber kontinuierlich zu sinken, was auf verbesserte Therapien zurückgeführt wird. Seit der Jahrhundertwende bis 2020 ist sie um etwa 19 % gesunken. Bisher fehlt jedoch der Nachweis, dass das MSP dazu irgendeinen Beitrag liefert (s. Berichte des Robert Koch-Instituts zum

Krebsgeschehen in Deutschland 2013 bis 2020).

Das BfS hat 2017 ein Forschungsprojekt zur Evaluierung des MSP begonnen, ein Ergebnis wird für 2025 angekündigt. Warum wird dieses nicht abgewartet, bevor man ein neues karzinogenes „Vorsorgeprogramm“ befürwortet? Wir wissen aus den Radonstudien, dass die Lunge zu den strahlenempfindlichsten Organen gehört, erst recht bei Rauchern mit einer vorgeschädigten Lunge. Dosisangaben zu dem Projekt habe ich bisher nicht gefunden. Bei der Brustkrebsmammographie werden neuerdings tomografische Verfahren eingesetzt, die wiederum mit einer Dosiserhöhung einhergehen.

Die Arbeiten von Hauptmann etc. zeigen erneut die Unsinnigkeit auf, das Strahlenrisiko des Röntgens durch die **effektive** Dosis zu beschreiben. Über die genetische Belastung erfährt man dadurch z.B. gar nichts.

Dringend zu fordern ist daher die Berücksichtigung des aktuellen Standes der Wissenschaft zum Strahlenrisiko im Niedrigdosisbereich und damit die Korrektur von überholten, fehlerhaften und unzutreffenden Annahmen im offiziellen Strahlenschutz.

Unsere Autorin **Frau Prof. Dr. rer. nat. Inge Schmitz-Feuerhake** ist

⁴ Die effektive Dosis wurde als Maß für das Strahlenrisiko eingeführt, um alle

Teilkörperbestrahlungen bezüglich der Folgen vergleichbar machen. Sie bezieht sich aber überwiegend nur auf die

Krebsmortalität. Zur Ermittlung wird die jeweilige Organ dosis je nach Strahlenempfindlichkeit mit einem

Gewebswichtungsfaktor versehen, die Summe aller so gewichteten Teilkörperdosen ergibt die effektive Dosis.

Präsidentin der Gesellschaft für Strahlenschutz e.V. und emeritierte Hochschullehrerin für Physik an der Universität Bremen.

1. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND): Unsichtbare Opfer der Atomkraftnutzung. Strahlende Arbeitsplätze und Umgebungskontaminationen. Autoren Schmitz-Feuerhake I, Hoffmann W, Becker O, Wurzbacher K, Berlin Sept. 2022, 61 S.
2. UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UN-SCEAR 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes Vol. II, Annex D (Health effects due to radiation from the Chernobyl accident) Corrigendum to Sales No.E.11.IX.3, May 18, Page 183, § D251, United Nations New York, 2011
3. International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the ICRP. ICRP-Publication 103, Ann ICRP 37 Nos. 2-4 (2008)
4. International Commission on Radiological Protection: Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90 Ann ICRP 33 (2003) No.1-2
5. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.: BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes. Autoren Hoffmann W et al., Berlin 24.03.2017, zur Anhörung vor dem Bundestagsausschuss für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit am 27.03.2017, Ausschussdrucksache 18(16)539-G, 29 S.
6. Mämpel W, Pflugbeil S, Schmitz R, Schmitz-Feuerhake I: Unterschätzte Gesundheitsgefahren durch Radioaktivität am Beispiel der Radarsoldaten. Berichte des Otto-Hug-Strahleninstituts, Bericht Nr. 25 (2015) Gesellschaft für Strahlenschutz e.V.

www.strahlenschutz-gesellschaft.de

7. Strahlenschutzkommission: Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten der Strahlenexposition für die Bevölkerung. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission vom 9.Mai 2023, 23 S.
8. Schmitz-Feuerhake I, Frenzel-Beyme R, Wolff R: Berufskrankheiten durch ionisierende Strahlen – Erfahrungen mit der Anerkennungspraxis in Deutschland. Umwelt Medizin Gesellschaft 34/2 2021, 34-51 (auch Open Access)
9. Pierce DA, Preston DL: Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. Radiat Res 154 (2000) 178-186
10. Grant EJ et al: Solid cancer incidence among the Life Span Study of atomic bomb survivors: 1958-2009. Radiat Res 2017; 187: 513-537
11. Richardson D et al: Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS); cohort study. Brit Med J 382 (2023) e074529
12. Hauptmann M, Daniels RD, Cardis E et al: Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis. J Natl Cancer Inst Monogr 2020 (2020) 188-200
13. Stewart A, Webb J, Giles D, Hewitt D: Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero. Lancet 1956;2 :447
14. Hauptmann M et al: Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study. Lancet Oncology 2023 Jan;24(1):45-53/online Dec.2022
15. Bosch de Basea M et al: Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in Children, adolescents and young adults. Nature Medicine, published online 09 November

2023, <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02620-0>

16. Little MP et al: Ionising radiation and cardiovascular disease: Systematic review and meta-analysis. Brit Med J 2023;380:e072924 <https://doi.org/10.101136/bmj-2022-072924>
17. Wang S, Meyer DH, Schumacher B: Inheritance of paternal DNA damage by histone-mediated repair restriction (Vererbung väterlicher DNS-Schäden durch Hemmung der histongesteuerten Reparatur) Nature 613 (2023) 365-374 Open Access
18. Yeager M et al: Lack of transgenerational effects of ionizing radiation exposure from the Chernobyl accident. Science 372 (2021)725 -729
19. Sperling K, Scherb H, Neitzel H: Population monitoring of trisomy 21: problems and approaches. Molecular Cytogenetics (2023)16.6 <https://doi.org/10.1186/s13039-023-00637-1>
20. Wiesel A, Spix C, Mergenthaler A, Queißer-Luft A: Maternal occupational exposure to ionizing radiation and birth defects. Radiat Environ Biophys 50 (2011) 325-328
21. Wiesel A, Stolz G, Queisser-Wahrendorf A: Evidence for a teratogenic risk in the offspring of health personnel exposed to ionizing radiation? Birth Defects Research (Part A) 106 (2016) 475-479
22. Nekolla EA, Schegerer AA, Griebel J, Brix G: Häufigkeit und Dosis diagnostischer und interventioneller Röntgenanwendungen. Trends zwischen 2007 und 2014. Radiologie 7 (2017) 555-562

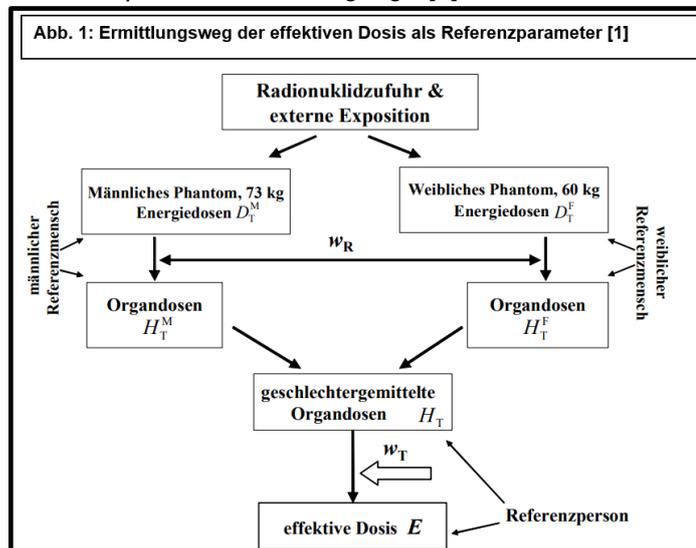
Strahlungsdosis in Radiologie und Nuklearmedizin

Nuklearmedizinische und radiologische Leistungen finden breite Anwendung bei diagnostischen Untersuchungen und therapeutischen Maßnahmen.

Das Röntgen wirkt kurzzeitig für eine 2D-Aufnahme, die fächerförmige axiale Röntgenstrahlung der Computertomografie (CT) liefert 3D-Bilder über einen eingestellten Untersuchungszeitraum. Eine Abschätzung der Dosis ist durch teilexponierte und heterogene Organ- bzw. Gewebeuntersuchungen erschwert. Die Strahlendosis bei einer nuklearmedizinischen Untersuchung hängt von der applizierten Aktivitätsmenge ab, die für ausreichende diagnostischen Informationen oder dem angestrebten Therapieeffekt benötigt wird. Die Strahlendosis ist auch hierbei zeitabhängig, zusätzlich bestimmt durch Art, Halbwertszeit, Anwendungsstellen und Verbleib der verwendeten Isotope u.a.m. Die relevante Größe zur Einschätzung der Exposition von Patienten und zur sinnvollen Risiko-Nutzen-Bewertung ist die Energiedosis im bestrahlten Gewebe. Messbar sind die Dosen, egal ob als Organ- oder errechnete Effektivdosis ohnehin nicht, so dass Hilfsgrößen zur Schätzung eingeführt wurden. Die effektive Dosis (Abb. 1) dient der Vergleichbarkeit von Dosen unterschiedlicher ionisierter Diagnoseverfahren, ähnlicher Techniken oder Verfahren sowie deren Anwendung in verschiedenen medizinischen Einrichtungen. Die Berechnung beruht auf der jeweils eingesetzten Energiedosis, auf Wichtungsfaktoren (Strahlungsartenzuordnung wR und Gewebewichtung wT) zzgl. körperbezogener Referenzwerte. „Daher basiert die effektive

Strahlentheorie einmal anders, trivial aber allgemeinverständlich als „floristisches“ **Gleichnis**. Als **Synonym** für effektive Dosis soll hierbei die jährliche Niederschlagsmenge im Garten dienen: Pflanzen (so vielfältig wie die Menschen) eines Gartens erfahren im Laufe der Vegetationsphasen Regen unterschiedlicher Intensität (Wichtungsfaktor w_R), der sowohl über Blätter als auch die Wurzeln unterschiedlich aufgenommen und an den Pflanzenorganismus weitergegeben wird (Wichtungsfaktor w_T) und dabei je nach Pflanzenart verschieden (biologische Wirksamkeit). Die Wasseraufnahme aller Regenereignisse (Einzel-Energiedosen) ergeben eine Gesamtgröße aus der Differenz von Regenmenge und Versickerung/Verdunstung, die für die Pflanzen jeweils gleich berechnet werden (effektive Dosis) aber praktisch nie gleich sind. Der Standort im Beet kann unterschiedlich beschattet sein, ein Starkregenereignis wird je nach Wuchsstand unterschiedlich verkraftet, der Flüssigkeitsbedarf unterliegt Schwankungen, gießen wirkt anders als natürlicher Regen u.a.m. Die Gesamtniederschlagsmenge mag für die Pflanzen des Gartens gleich groß sein, sie beschreibt nicht deren unterschiedlichen Wuchs. Aus den Niederschlagsereignissen lassen sich statistisch Mittel- u. Perzentilwerte ableiten und daraus dann Bedarfsmengen, deren Unter-/Überschreitung vermieden werden sollte (Richtwerte, Risikowerte).

Dosis nicht auf Daten von für einen einzelnen Menschlichen, sondern nur die Dosis für eine Referenzperson unter einer bestimmten Expositionsbedingung.“ [1]



Insofern sind Aussagen, dass z.B. die Strahlenbelastung eines potentiell krebserkrankten Patienten, der einer 5malige CT-Untersuchung des Bauchraumes unterzogen wurde, ca. $5 \times 8 \text{ mSv} = 40 \text{ mSv}$ beträgt, lediglich eine orientierende Größe, da die Angabe als effektive Dosis den ganzen Körper (einer Referenzperson) betrifft. Der schlussfolgernde, völlig unmedizinische Vergleich, dass damit eine Exposition unter 100 mSv vorläge und ungefährlich sei bzw. sich im Rahmen zulässiger Richtwerte bewege, ist spekulativ und wird individuell weder Wirkung noch Höhe der Strahlenbelastung gerecht (vgl. Info-Kasten).

Auch die in ihrer Höhe zwischen Röntgen und computertomografischen Aufnahmen angegebenen Dosisbelastungen nuklearmedizinischer Diagnosen und Behandlungen lassen sich mit solcherart gemittelten effektiven Dosen nur „unspezifisch“ wiedergeben. Die Behandlungen basieren i.d.R. auf dem Einbringen radioaktiver Substanzen in Organe und Gewebe, deren Zerfall zur

Feststellung/ Sichtbarmachung von Stoffwechselaktivitäten, Entzündungsherden, Tumoren und Metastasen verwendet wird (Teilgebiet Szintigraphie). Die Dauer der Strahlenwirkung auf Gewebe/Organe hängt von den physikalischen Halbwertszeiten und der biologischen Verweildauer der verwendeten Radionuklide im Körper ab. Sie können

Effektive Dosen die aus bestrahlten Organen/Geweben abgeleitet und auf den Ganzkörper bezogen wurden, gelten lediglich als Referenzparameter (Stichwort IRCP 60) zur organspezifischen Risikoabschätzung. Die Verwendung der effektiven Dosisparameter ist nach Aussage der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) „... für Bewertung von Gewebereaktionen und detaillierte spezifische retrospektive Untersuchungen der Exposition einer Person und des individuellen Risikos nicht geeignet. Für diese Zwecke soll die Energiedosis zusammen mit den jeweils am besten geeigneten biokinetischen Daten für biologische Wirksamkeit und Risikofaktoren verwendet werden. Organ- bzw. Gewebedosen (nicht die effektiven Dosen) werden benötigt, um die Wahrscheinlichkeit einer Krebsinduktion bei exponierten Personen zu ermitteln. In solchen Fällen ist es notwendig, die Energiedosis abzuschätzen und die entsprechenden RBW-Faktoren (biologische Referenz-Wirkungsfaktoren) als Grundlage für die Abschätzung der Wirkung der Strahlung zu berücksichtigen.“ [1] S. 71

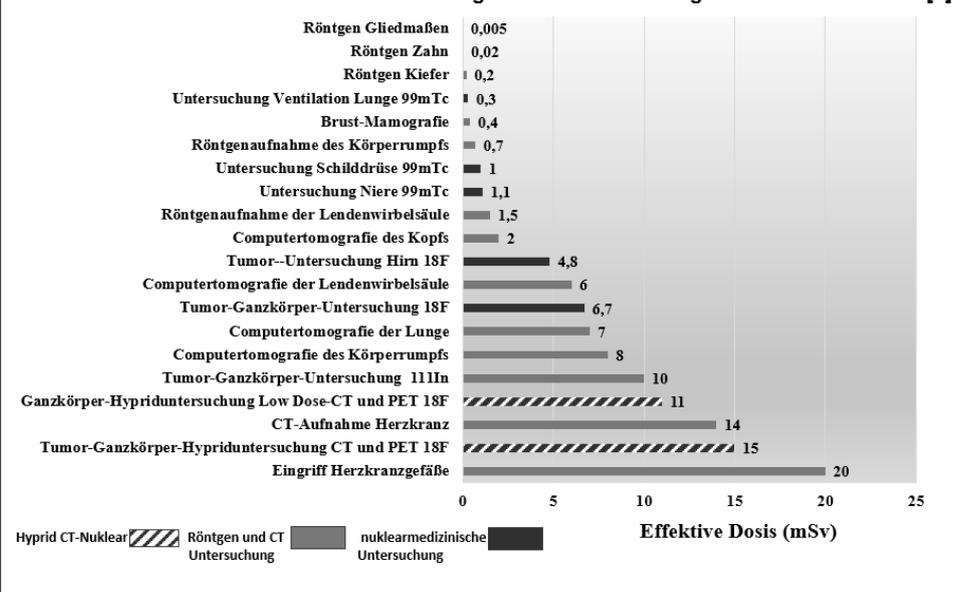
entsprechend dem verwendeten Tracer Tage bis Monate oder sogar Jahre nach der Aufnahme Dosis-

belastungen verursachen. Diese Dosen werden zu- meist als innere Exposition geschätzt. Hierfür bemüht man biokinetischer Modelle. Unter Verwendung „empfohlener“ Dosiskoeffizienten, ev. differenziert nach Altersgruppen wird dann die effektive Dosis aus der Zufuhrenergie berechnet. Alternative Möglichkeiten sind indirekte Messungen (z.B. Urin- oder Stuhlproben).

Die durch ein aufgenommenes Radionuklid verursachte Folgedosis bewirkt die Gesamtdosis, die über die Zeit des radioaktiven Zerfalls zu erwarten ist.

Eine individuelle Expositionserfassung durch direkte Strahlungsmessungen der applizierten Körperteile, Gewebestellen

Abb. 2: Übersicht zur effektiven Dosis radiologischer/nuklearer Diagnostik in der Schweiz [2]



oder Organe erfolgt nicht. Die Praxisbeispiele der Folgebeiträge unterstreichen die Defizite.

In Abb. 2 sind effektive Dosen vergleichend für in der

Schweiz statistisch ausgewertete Verfahren dargestellt.

F. L.

[1] Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP) von

2007, ICRP-Veröffentlichung 103, S. 66

[2] Bundesamt für Gesundheit der Schweizer Eidgenossenschaft; „Strahlendosen in der Medizin“ vom 04.03.2020 unter www.bag.admin.ch

Strahlungsintensität radiologischer Diagnostik
Frank Lange

Die Diagnostik kann sowohl radiologisch als auch nuklear erfolgen. Nachfolgender Beitrag wendet sich zunächst der Radiologie zu.

Röntgen/ CT

Die Strahlungsexposition durch das Röntgen ist umso grösser, je länger die Untersuchung dauert, je grösser das untersuchte Körpervolumen ist, je strahlenempfindlicher die untersuchten Organe sind und je durchdringender die Röntgenstrahlung ist. Letzteres gilt insbesondere für das Schichtröntgen mittels Computertomographie (CT) - vgl. Abb. 3. CT als bildgebendes diagnostisches Verfahren ist

aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenken, etwa 10 % aller Röntgenuntersuchungen erfolgen durch CT. Die häufigsten Anwendungen erfolgen über alle Altersgruppen hinweg im Kopf- und Brustkorbbereich. Abbildung 1 verdeutlicht das in Auswertung von 13.513 kinderradiologischen Untersuchungen an 66 deutschen medizinischen Einrichtungen, darunter 25 Uni-Kliniken [1]. In Bezug auf die Strahlenbelastung besteht folgende medizinische Praxis: *„Keinesfalls dürfen notwendige CT-Untersuchungen aufgrund der Strahlenexposition unterlassen werden, da der potentielle Nutzen oft um ein Vielfaches höher ist als das potenzielle Strahlenrisiko. Nichtsdestotrotz ist eine sorgfältige Prüfung der rechtfertigenden Indikation durchzuführen und zu prüfen, ob alternative ...*

Verfahren zum Einsatz kommen können.“ [2]

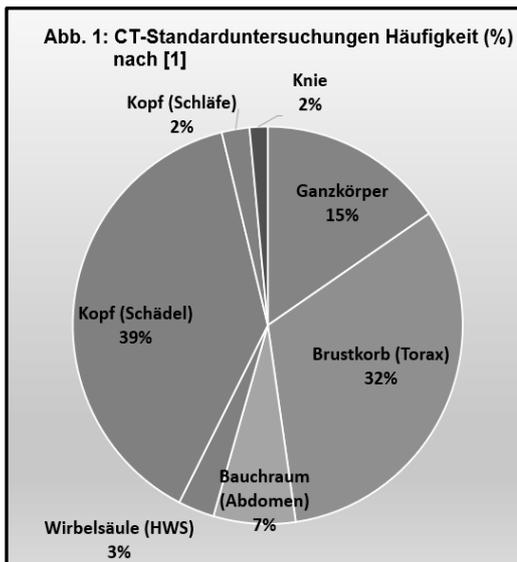
Dosisbelastung

Die Einschätzung der Strahlenbelastung basiert auf Erfassung diverser Parameter. Es sind Kenngrößen, die die durchschnittliche Strahlenexposition der eingesetzten Gerätetechnik und jeweilige Untersuchungsbereiche betreffen. Aus einer Vielzahl solcher gemittelten Messdaten berechnet man verschiedene Perzentile, die als sogenannte Referenzwerte gelten und sich (meist) auf 75%- Perzentil beziehen. Erläuterungen hierzu enthält z. B. [4].

Nach § 125 Absatz 1 Satz 1 der StrlSchV erfolgt durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) die Ermittlung und Veröffentlichung dieser diagnostischen Referenzwerte (DRW). In [3] Tabelle 7 und

8 werden für Untersuchungsbereiche (Scanbereiche) des menschlichen Körpers ein Dosisindex $CTDI_{vol}$ (in mGy) und die Scanlänge (in cm) ausgewiesen und möglichst alle 3 Jahre aktualisiert. Die DRW gelten als Richtwerte, die in den Praxen und Kliniken wiederum als 75%iges Perzentil anzustreben wären.

Die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Organe gegenüber der ionisierenden Strahlung werden mit (nicht unumstrittenen) empirischen Gewebegewichtungsfaktoren berücksichtigt, was dann zur Ausweisung von den gebräuchlichen effektiven Dosiswerten in Millisievert (mSv) führt. Die durchschnittliche Strahlenbelastung einer CT-Untersuchung beträgt statistisch 5,9 mSv. Der Wert bezieht sich auf 2014 und soll 2010



noch 6,8 mSv betragen haben. Zur tatsächlichen Belastung eines Patienten sagt die Zahl nichts aus, da die konkrete Bestrahlung bzw. Behandlung maßgebend ist. So bewegt sich eine Brustkorbuntersuchung möglicherweise zwischen 1,7 und 5,1 mSv je nach Intensitätseinstellung und Bereichsauswahl. Eine Schädeluntersuchung wird derzeit im Ø mit 1,6 mSv angegeben und geht ebenfalls „von bis“. Eine umfassende Diagnose über die Hauptschlagader kann 10 mSv weit übersteigen. Im Bauchbereich (Abb. 2) treten etwa 8 mSv auf, die Untersuchung auf das Becken ausgedehnt, schlägt dann mit durchschnittlichen 11 mSv zu Buche.

Abb. 2: Bauch-CT Gallen-Bereich

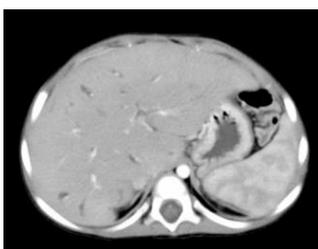


Abb. 3 versucht, einen Dosis-Überblick für in

Deutschland typische Untersuchungen zu geben, allerdings ohne Beachtung von Alter, Geschlecht oder Konstitution. Neudeutsch ausgedrückt, ist die Resilienz der CT-Behandlungen prioritär zu betrachten, also die Möglichkeiten des geringsten Risikos zu erschließen und danach zu handeln.

Dosisreduktion

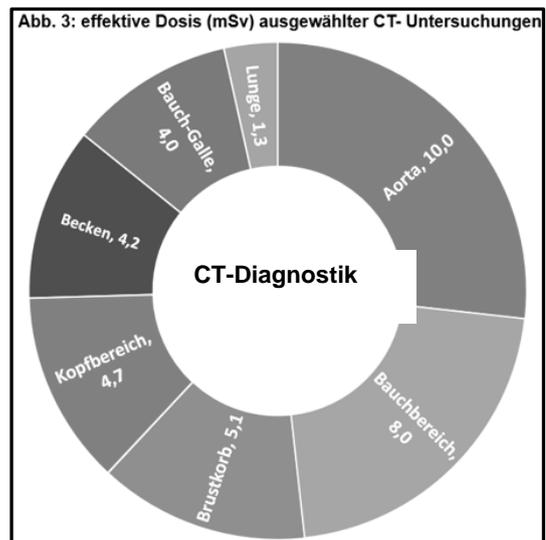
„Vor dem Hintergrund einer allgemein erhöhten Strahlensensibilität im Kindesalter und der für Strahlenschutz-Zwecke etablierten Annahme einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert (National Council on Radiation Protection and Measurements 1993, 2001) ist das Ziel der fortwährenden Dosisoptimierung auch im Niedrigdosisbereich wichtig.“ [1] S. 8. Das Zitat unterstreicht nochmals den medizinischen Standpunkt, dass es hier nicht um Zellzerstörung mittels schwellenwertbezogener Strahlungsdosen (100 mSv) geht, sondern um die Sensibilität bei DNA-Veränderungen in stochastischen Strahlungsbereichen, die letztlich krebsauslösend wirken. „Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hängt von der Dosis ab. Die Schwere des Schadens, wie z.B. die Ausprägung der

Kreberkrankung, ist dosisunabhängig. Zudem gibt es im Gegensatz zu den deterministischen Strahlenschäden keine Schwellendosis.“ [2] S. 136. Im Wesentlichen ist von drei „Reduktionskategorien“ auszugehen. Soweit „strahlungsfreie“ Alternativen wie das MRT nicht anwendbar sind oder nicht ausreichen, ist zu-

Filterungen. Allgemein statistisch betrachtet konnte die kollektive effektive Dosis der CT-Technik gesenkt werden, d.h. der starke Anstieg der CT-Untersuchungen der letzten Jahre war von geringem Anstieg in der Dosisbelastung bekleidet als er-

nächst eine Reduzierung des Untersuchungsumfanges auf das unbedingt Notwendige im Rahmen der medizinischen Indikation vorzunehmen. „Es kommt auf die passende Auswahl des CT-Protokolls für die richtige und konkrete Fragestellung an, um die Dosis zu optimieren und eine ausreichende Bildqualität zu erreichen“ [2] S. 138. Das Protokoll lässt sich in verschiedene Dosishöhen klassifizieren und der erforderlichen Bildqualität zuordnen. Die kontinuierliche Anpassung der Gerätetechnik an den Stand der Technik stellt eine Mindestanforderung dar, die tatsächlich sinkende Strahlungsintensität im Wechsel der Gerätegeneration aufzuweisen hat. Moderne CT-Scanner verfügen zudem über effektivere Detektoren und

wartet. Letztlich entscheidet eine richtige Patientenlagerung und die Scanner-Zentrierung über die Höhe des Volumen-CT-Dosisindex. Der Dreiklang Indikation – Gerätegeneration – Geräteeinsatz beeinflusst die radiologischen Kenngrößen. Zu ergänzen wäre aktuell der Einzug KI-basierter Bildanalysen [5], die zumindest indirekt durch effektivere Auswertungen zu weniger Strahlenbelastung beitragen könnten. Die errechneten Dosisparameter beschreiben kollektive Belastungen und umfassen nicht die individuellen Strahlenbelastungen von Patienten, insbesondere nicht die krankheitsbedingt häufigeren Spezial- und Nachuntersuchungen. Bei der Durchführung von medizinischen



nuklearen Behandlungen und erst recht bei Strahlungstherapien treten höhere Parameterkategorien auf.

[1] „Erfassung der relativen Häufigkeiten und Strahlendosen von

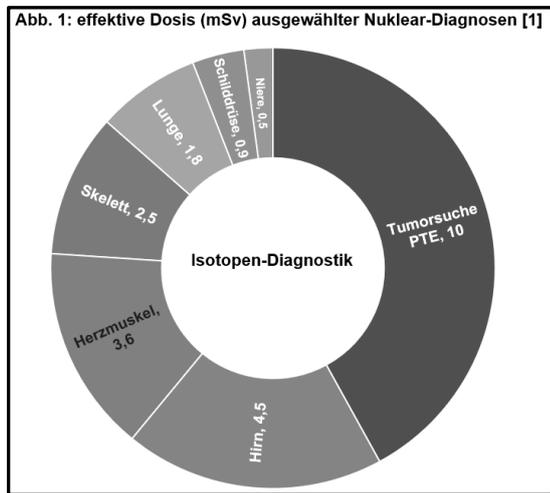
Röntgenanwendungen in der pädiatrischen Radiologie - Vorhaben 3617S 42441“
 urn:nbn:de:0221-2020092123034 Salzgitter, September 2020
 [2] Bos D, Guberina N, Zensen S, Opitz M, Forsting M, Wetter A: Radiation exposure in computed tomography.

Dtsch. Arztebl. Int 2023; 120: 135–41. DOI: 10.3238/arztebl.m2022.0395
 [3] „Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenanwendungen vom 17. November 2022“ des BfS
 [4] Schegegerer A, Loose R, Heuser LJ et al. Diagnostic

Reference Levels for Diagnostic and Interventional X-Ray Procedures in Germany: Update and Handling. Fortschr Röntgenstr., 2019; 191: 739–751
 [5] KI-gestützte Bildanalyse; Deutsches Ärzteblatt | Jg. 121 | Heft 5 | 8. März 2024 S. A 3

Strahlungsintensität nuklearmedizinischer Diagnosen und Behandlungen
 Frank Lange

Für diagnostische und therapeutische Maßnahmen kommen verschiedenartige, i.d.R. künstliche radioaktive Isotope zum Einsatz. Oft handelt es sich um zusammengestellte Radiopharmazeutika aus mehreren Komponenten. Starke Anwendung findet die **Radiosynoviorthese** (RSO), ein nuklearmedizi-



nisches Verfahren zur Behandlung von chronisch-entzündlichen Gelenkerkrankungen, z. B. rheumatoider Arthritis oder Arthrose. Das Radionuklid Rhenium 186 (¹⁸⁶Re) wird bei vielen Schmerzbehandlungen im Gelenkbereich verwendet; Yttrium 90 (⁹⁰Y) ist für Kniegelenke

prädestiniert; bei kleinen Gelenken (wie Finger) Erbiumcitrat 169. Alles β -Strahler (mit einem Gammaanteil), die mit ≈ 1 Megaelektronenvolt (MeV) bei ¹⁸⁶Re bzw. 2,28 MeV bei ⁹⁰Y in 3,7 bzw. 2,7 Tagen Halbwertszeit zerfallen. Dabei kommt es zur Zellgewebeerstörung der injizierten Entzündungsherde an den Gelenken, was zur (zeitlich begrenzten) Schmerzlinderung führt. Zur Reduzierung der Strahlungsdosen und Strahlennekrosen (Zelltötung), sind durch Voruntersuchungen die Entzündungsherde exakt zu lokalisieren. Für diese Diagnosen finden die Gammastrahler mit kurzer Verweil-/Halbwertszeit Anwendung. Abbildung 1 enthält gemittelte effektive Dosen der Nukleardiagnostik.

Praxisbeispiel einer nuklearmedizinischen Diagnose

Im gewählten Praxisbeispiel einer Ganzkörper-Skelett-Szintigrafie (s. Abbildung auf dem Titelblatt) kommt i.d.R. das künst-

liche radioaktive Isotop Technetium-99m (^{99m}Tc) zum Einsatz. Mit einer Gammaemission von 6 Stunden ist es nach 24 Stunden zu 97,5% abgebaut. Es werden zwischen 500 und 750 MBq ^{99m}Tc verschiedener Konfiguration appliziert. Empfehlungen des BfS beschränken es derzeit auf eine Richtgröße von 8 MBq/kg Körpergewicht [3]. Mittels Gamma-Kamera erfasst das CT-Gerät die nicht im Körper absorbierte Gammastrahlung, die wiederum eine ausreichende Bilderfassung liefern soll. Im Beispiel werden 506,42 MBq ^{99m}Tc HDP (eines Phosphonat-Tracers) intravenös eingesetzt. Eine therapeutische Wirkung wird noch nicht erzielt; dafür ist der zeitliche Verbleib im Körper noch zu kurz. Dennoch führt die absorbierte Strahlung eine effektive Dosisbelastung in Größenordnung der späteren Therapie herbei. Abbildung 3 dokumentiert eine mit dem ^{99m}Tc-Tracer vorgenommene Dreiphasen-Ganzkörper-Szintigraphie. Der theoretischen Abbauzeit über zwei Tage ist eine gemessene „äußere“ biologische Halbwertszeit gegenübergestellt. Im zeitlichen Verlauf stimmen Theorie und Praxis überein; in der Dosishöhe nicht. Praktisch gemessen wurde lediglich die „Abstrahlung“ des Patienten in der Folgezeit bis zum völligen Abklingen nach 2 Tagen, was

aufsummiert eine „Abstrahl-Dosis“ von 0,54 mSv ergab. Die implizierte Dosis lässt sich auf 2,9 mSv berechnen (nicht messen). Von 70 kg auf tatsächliche 95 kg übertragen, ergeben sich 2,2 mSv. Die Differenz zu 0,54 mSv gibt eine Vorstellung für die absorbierte Strahlungsgröße.

Zu ergänzen wäre noch, dass der Patient in einem „Abklingraum“ viel Flüssigkeit zu sich nehmen muss, um die hohe Anfangsdosis schneller auszuscheiden.

In Abb. 1 sind für eine Skelettszintigrafie Ø 2,5 mSv statistisch ermittelt worden. Vor 20 Jahren gab man noch 5-6 mSv an.

Die Auswahl der Radionuklide bestimmt den Grad der Belastung aber auch die Qualität der Aufnahmen. Die Darstellung auf dem Titelblatt zeigt bildlich Beginn und Ende der Voruntersuchung. Nach einer bestimmten Einwirkzeit (Spätphase) bilden sich dunkle Skelettzonen aus, die damit Entzündungsherde offenlegen. Das besonders dunkle rechte Handgelenk (vgl. auch Abb. 2), für das im Vorfeld chronische Arthritis Synovitis (entzündete Schleimhäute der Gelenkkapseln) diagnostiziert war, wurde für eine nachfolgende **Radiosynoviorthese** ausgewählt.

**Abb. 2: Sichtbar-
machung Entzündungs-
herd Handgelenk mit-
tels Tc-99m**



Praxisbeispiel einer nuklearmedizinischen Behandlung

Hierfür wurden mit einer Stunde Abstand 2 mal 1 ml ¹⁸⁶Re (58,94 MBq und 56,79 MBq Aktivität) in das rechte Handwurzelgelenk gespritzt. Die ebenfalls betroffenen Kniegelenke sah man für eine spätere und dreifach höhere Therapie mit Yttrium-90 vor.

Abbildung 4 zeigt die gemessene (im Vergleich zur theoretisch berechneten) Dosisbelastung in der Handwurzel inclusive der temporär wirkenden Folgedosis entsprechend des radioaktiven Zerfalls entlang der Halbwertszeit des Isotops. Nach 25 Tagen summierte sich die Dosis auf rund 25 mSv um nach 40 Tagen bei etwa 30 mSv auszuklingen, wobei es sich auch hier lediglich um die abgestrahlte, direkt auf der Haut des Handgelenks gemessene Dosis handelt. Bezogen auf den gesamten Körper würden über den Gewebewichtungsfaktor von 0,05 (Knochengewebe) „nur“ eine effektive Dosis von 1,5 mSv abzuschätzen sein. Auch hier wäre also die implizierte Dosis höher anzusetzen; statistische Erfahrungswerte liegen nicht

Abb. 3: Gammastrahlung des Isotopenzerfalls Tc-99m (µSv/h) – theoretischer Verlauf und "äußere Wahrnehmung"

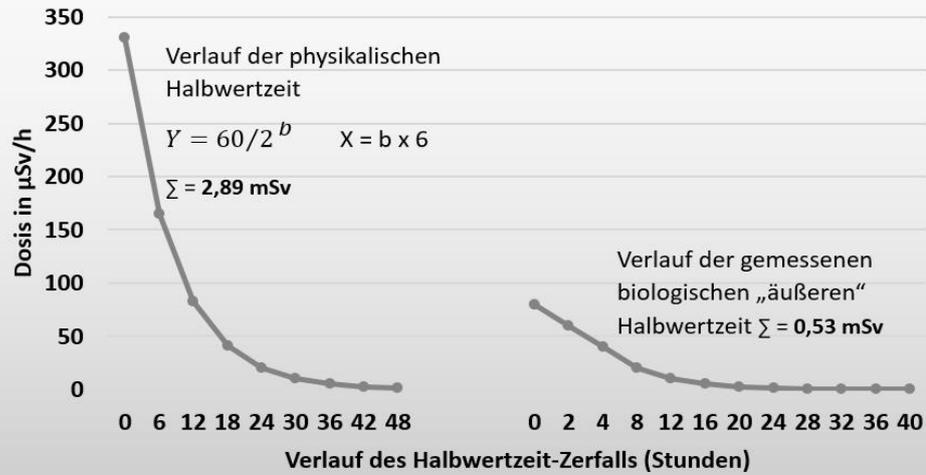
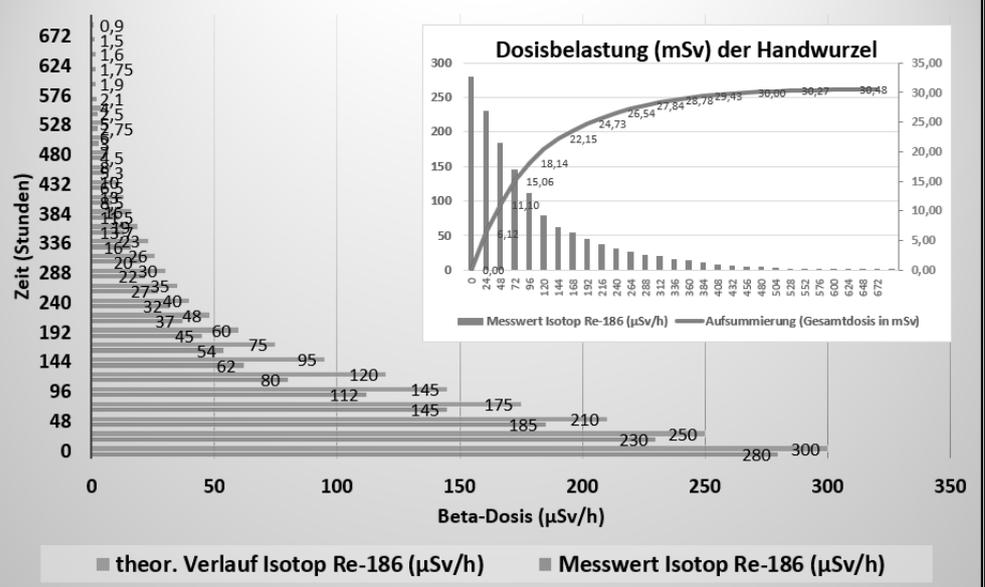


Abb. 4: Isotop Rhenium-186 Sulfid (mSv/h) injiziert in Handwurzel



vor. Allgemein geben die ausführenden Einrichtungen nur an, dass die Strahlenexposition unbedenklich sei. „Eine prätherapeutische, individualisierte Dosimetrie ist derzeit nicht regelhaft möglich, da die absorbierte Dosis nicht nur vom verwendeten Radionuklid (Halbwertszeit, -Energie) und der applizierten Aktivität abhängig ist, sondern auch von Faktoren wie der intraartikulären Nuklidverteilung sowie der Dicke und der oft ausgeprägt zottenförmigen Beschaffenheit der Synovialis

(Schleimhäute)“ [4]. Es gibt empirische Ermittlungen und diverse Dosisfaktoren. Die Ergebnisse bewegen sich je nach Dosisprofil und Therapie zwischen 0,2 - 100 mSv! Die Knietherapie im vorliegenden Beispielfall steuert eine dreifach höhere Exposition bei und Wiederholungen nach 6 Monaten sind je nach Therapie erforderlich. Bei Ausdehnung auf Entzündungsherde an Bandscheiben und Hüfte summiert sich die Gesamtkörperdosis in den Bereich onkologischer

Behandlung. Daher strebt man die Streckung der Behandlung über mehrere Halbjahre an. Es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass aus chirurgischer Sicht nuklearmedizinische Gelenkbehandlungen kritisch bewertet werden. Um hohen Strahlendosen entgegen zu wirken, werden erforderliche Nachuntersuchungen im CT auf die behandelten Körperteile reduziert oder man weicht auf das strahlungsfreie MRT aus, sofern dessen Bildqualität ausreicht.

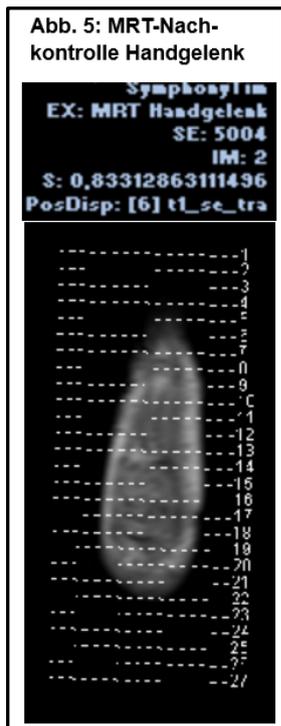


Abb. 5 belegt, dass man dafür sehr geübt sein muss.

Generell ist die effektive Dosis (im Beispiel waren es 1,5 mSv) nicht aussagekräftig für eine individuelle Risikobewertung: „Zur Planung der Exposition von Patienten und zur Risiko-Nutzen-Abschätzung eignen sich jedoch ausschließlich die Organdosis oder die Energiedosis im bestrahlten Gewebe.“, postuliert selbst ICRP in [1], S. 70.

Die Festlegung von Radionuklidart und -menge entsprechend der Gelenkgrößen ist für die resultierende Energiedosis entscheidend.

Organspezifische Behandlungen erreichen höhere Belastungen, was ebenfalls statistisch unzureichend fassbar ist und jeweils separat zu betrachten und zu bewerten wäre.

Nuklearmedizinische Krebsbehandlung

Bei der direkten Krebsbehandlung handelt es sich nicht mehr um

Niedrigstrahlung, man spricht hier vom deterministischen Wirkungsbereich. Die Bestrahlungsdosen sind deutlich höher und betragen gegenüber oben genannten Nukleartherapien das tausend- bis zehntausendfache der eingesetzten Energiedosen. Es geht nicht mehr um Zellbeeinflussung und (vermeintlich) punktuelle Zerstörung, sondern um unmittelbare Abtötung des von Metastasen befallenen Gewebes. Energiedosen von 40-70 Gray/Sievert (Gy/ Sv) werden verordnet und in Einzeldosen von 1,8 bis 2 Gy, 2-3 Gy usw. bis 8 Gy angewandt; Bestrahlungen erfolgen über die Haut oder direkt ins Tumorgewebe. Beispiel: Aus einer Lungenbestrahlung mit einem Gewebewichtungsfaktor von 0,12 und der Therapie-Einzeldosis von 2 Gy errechnet sich eine effektive Dosis von 0,24 Sv, also 240 mSv. Diese Größenordnung wirkt auch deterministisch auf den umgebenden Körper, d.h. es kommt zu direkten Schädigungen (z.B. Blutbildveränderung). Bezogen auf den Ganzkörper wirkt eine Energiedosis von 10 – 20 Gy tödlich; 4 – 5 Gy bzw. Sv wirken in der Folgezeit definitiv tödlich. Man bewegt sich mit der Gesamt-Therapie schnell am Rande des Abgrunds. Auch kombinierte Strahlentherapien kommen zum Einsatz, oft in Form einer Radiochemotherapie oder ergänzend zu einer laufenden Strahlentherapie. Beispiel: „Die prophylaktische Ganzhirnbestrahlung (PCI) beim kleinzelligen Lungenkarzinom (SCLC) im Stadium Limited Disease (LD) hat aufgrund von Metaanalysen einen festen Stellenwert in aktuellen Leitlinien in

Europa und den USA.“ [2] Für die Betroffenen ist im fortgeschrittenen Erkrankungsstadium sicher jede lebensverlängernde Maßnahme wichtig. Die Effekte sind jedoch sehr bescheiden. Für das genannte Beispiel der ergänzenden Hirnbestrahlung sinkt das Risiko für Hirnmetastasen, allerdings bei einem bescheidenen Anstieg des Gesamtüberlebens von 5,4 auf 6,7 Monate. Unbedingte Beachtung erfordern die negativen Begleiterscheinungen der Bestrahlung. Die Palette der Nebenwirkungen ist enorm und reicht von starken Kopfschmerzen bis zum Tod innerhalb 24 Stunden z.B. durch plötzliche Hirnschwellungen. Die Nebenwirkungen veranlassen Reduzierungen der eingesetzten Gesamtenergiedosen z.B. auf einen 25/30 Gy-Standard [2]. Die Tumorart bestimmt im Wesentlichen die Zusammensetzung der Strahlentherapien, die Isotopenwahl, den Geräteinsatz u.a.m.; die Therapien sind vielfältig und komplex. Dennoch ist jeder Fall spezifisch zu behandeln. Fakt ist, dass bei etwa jedem zweiten Krebsfall früher oder später eine Strahlentherapie zum Einsatz kommt.

Zusammenfassung zur Strahlenbelastung

Röntgen-, Gamma- und Betastrahlung bilden die radioaktive Basis der seit Jahrzehnten genutzten radiologischen und nuklearmedizinischen Diagnostik und Behandlung.

Röntgenaufnahmen sind unerlässlich und haben meist Strahlendosen weit unter 1 mSv und selten mehr als 2 mSv aufzuweisen. Das Risiko steigt mit der Dosis, kann aber nicht

durch Schwellwertfestlegung ausgeschlossen werden. „Physikalisch“ geprägte Diskussionen sehen den Risikobeginn bei 100 mSv, wobei ab 250 mSv Schädigungen sozusagen nicht zufallsbedingt nachweisbar werden. Es ist zu beachten, dass der menschliche Körper Strahlendosen zwar abbaut, aber im Sinne des Schadensrisikos aufsummiert. Daraus wurden z.B. Berufsdosenbegrenzungen abgeleitet.

Das schichtenweise Röntgen der **Computertomografie** bewegt sich körperorgangebunden in einem Spektrum bis 20 mSv je Untersuchung; der statistische Ø in Deutschland liegt um 6 mSv.

Die **Isotopenanwendung** ist für die **Diagnostik** durch Gammastrahler mit kurzen Halbwertszeiten geprägt. Strahlenbelastungen liegen im CT-Bereich oder u.U. darunter. Die **Isotopenanwendung zu Therapiezwecken** erfolgt im Regelfall mit weniger intensiven Betastrahlern aber vergleichsweise höheren Halbwertszeiten zur Erlangung bestimmter Langzeiteffekte (Stichwort Schmerzlinderung). Die punktuell deutlichen Strahlungsdosen im zwei- und dreistelligen mSv-Bereich fallen ganzkörperbezogen umgerechnet nicht immer unter die oft genannte Belastungsgröße zwischen normalen Röntgenaufnahmen und intensiverer CT-Untersuchung. Hinzu kommen ionisierte Voruntersuchungen und mitunter ergänzende Untersuchungen mittels CT-Röntgens. Häufige nuklearmedizinische Behandlungen erhöhen das dosisbezogene Krebsrisiko signifikant.

Nicht mehr im mSv, sondern im Sv-Bereich

befinden sich die **Strahlentherapien der Krebsbehandlung**; kennzeichnend sind hohe Strahlungs Dosen, die daher überaus präzise Dosierung und Zuordnung erfordern. Dennoch erreichen die auf den ganzen Körper umgerechneten effektiven Dosen sehr schnell den deterministischen Strahlungsdosisbereich über 250

mSv, der von Folgeschäden (z.B. Haarausfall) geprägt ist. Die organbezogene gewünschte deterministische Strahlenwirkung, wie Zerstörung von Krebsgewebe, wirkt im Körper an anderen Stellen, u.U. abgeschwächt aber unkontrolliert bzw. nicht beeinflussbar (Stichwort Nebenwirkungen). Das zu verhindern oder

einzu-schränken bleibt eine Hauptaufgabe dieser nuklearmedizinischen Teildisziplin und Forschung.

[1] Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) ICRP-Veröffentlichung 103 (2007)
[2] „Pro und Contra: Prophylaktische Schädelbestrahlung beim kleinzelligen Lungenkarzinom-Limited Disease“,

Meldung vom 27.02.24 im Dtsch. Ärzteblatt
[3] BfS-Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen vom 15.06.2021
[4] Gemeinsame Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie) von DGN, OGNMB und SGNM* Radiosynoviorthese Stand: 9/2019 – AWMF-Registernummer: 031-023

Atomwirtschaft

Small Modular Reactors

Anna Stender, Hamburg

„Small Modular Reactors“ sind die Seifenblasen der Atomkraft: Bunt schillernde Projektionsflächen, dahinter ziemlich viel Luft. Die ernstzunehmendste der Blasen ist jetzt geplatzt.

Sie waren weiter als alle anderen, hatten ausgearbeitete Pläne ihres Reaktors, technisch nicht innovativ, aber mit Zulassung der US-Atomaufsicht – zumindest für ein konkretes Projekt und einen zahlungskräftigen Projektpartner. UAMPS, ein Zusammenschluss kommunaler Energieversorger im Nordwesten der USA. Sechs sogenannte „small modular reactors“ (SMR) mit jeweils 77 Megawatt wollten sie dort bauen. Sie sollten deutlich günstiger als ein großes AKW sein – das war das Versprechen des SMR-Entwicklers Nuscale. Schon Mitte 2025 sollte es losgehen.

Doch das „Carbon Free Power Projekt“ (CFPP) ist gescheitert, die Illusion geplatzt. Anfang 2023 hatte Nuscale die Kostenschätzung von ca. 5,3 auf 9,3 Milliarden US-Dollar nach oben korrigiert. Statt der versprochenen 58 hätte eine Megawattstunde

Strom aus den Mini-Reaktoren nun 89 Dollar gekostet – trotz staatlicher Fördergelder und Steuervergünstigungen in Höhe von insgesamt vier Milliarden Dollar. Zum Vergleich: Eine Megawattstunde Onshore-Windstrom kostete in den USA 2021 durchschnittlich 32 Dollar [2]. Daraufhin ziehen Nuscale und UAMPS im November die Reißleine.

Pleiten, Pech und Pannen

Das Aus für das Vorzeigeprojekt ist kein Einzelfall. Viele SMR-Ideen werden seit Jahrzehnten erfolglos vorangetrieben. Die unübersichtliche Vielzahl weltweiter Projekte reicht von „Power-Point-Reaktoren“, von denen nur eine Skizze existiert, bis zu einzelnen Prototypen, von der versprochenen Serienfertigung.

- Die Akademie Lomonossow, Prototyp eines schwimmenden AKW, war mindestens vier Mal so teuer wie geplant: Aus veranschlagten sechs wurden mindestens 37 Milliarden Rubel. Das entspricht knapp 25.000 US-Dollar pro Kilowatt installierter

Leistung – fast doppelt so viel wie bei einem modernen Großreaktor [3].

- Der HTR-PM-Demonstrationsreaktor, ein Kugelhaufenreaktor nach dem Vorbild des havierten AVR Jülich, ging 2021 in China ans Netz, lief im Jahr 2022 aber lediglich 27 von möglichen 8.760 Betriebsstunden [4]. Die Baukosten waren dreimal so hoch wie geplant (6.000 US-Dollar pro Kilowatt installierter Leistung) [5]. Pläne zur Errichtung von bis zu 18 weiteren Reaktoren desselben Typs am gleichen Standort hat China aufgegeben [6].

- Der CAREM-Reaktor in Argentinien ist seit 50 Jahren in Planung. Baubeginn war schließlich 2014 – fertig ist er bis heute nicht. 2021 lag die Kostenschätzung für das 25-Megawatt-Reaktörchen, das auf ein Sechzigstel der Leistung eines großen AKW kommt, bei 750 Millionen US-Dollar [7].

- Im Jahr 2021 begann China mit dem Bau eines 125-Megawatt-Druckwasserreaktors (APC 100 oder Linglong One). Die Baukosten pro Megawatt werden mindestens doppelt so hoch sein wie bei großen Reaktoren. [8]

- Ebenfalls 2021 begann Russland mit dem Bau des

bleigekühlten 300-Megawatt-Demonstrationsreaktors BREST, ein Schneller Brüter. Die Kostenschätzung hat sich bereits auf 1,3 Milliarden US-Dollar mehr als verdoppelt. [9]

Der in deutschen Medien häufig erwähnte Dual Fluid Reactor taucht im aktuellen World Nuclear Industry Status Report [10] nur als Fußnote auf. Das Startup aus einem Berliner Hinterhof machte im September Schlagzeilen mit der Ankündigung, ihren Prototypen in Ruanda bauen zu wollen – ein Land mit Erfahrung in Atomtechnik konnte es für dieses Projekt offenbar nicht gewinnen.

Auch bei Nuscale scheint es keine neuen Großaufträge zu geben. Im Gegenteil: Angedachte Projekte in anderen Ländern stehen nun ebenfalls auf der Kippe. Das Unternehmen ist dabei, ein Drittel der Belegschaft zu entlassen. Zudem hat es eine Sammelklage enttäuschter Aktionäre am Hals. Diese werfen Nuscale vor, ihr Geld mit irreführenden Angaben eingeworben und verbrannt zu haben. [12] Angesichts der bisherigen Bilanz halten sich private Geldgeber bei SMR-Projekten auffallend zurück. Großinvestoren wie Bill Gates, Mitgründer von

Terrapower, sind die Ausnahme. Kaum ein Unternehmen hat Interesse daran, Geld in vielerlei Hinsicht vage Projekte zu stecken.

SMR-Förderung durch die EU

Dem weltweiten Hype um SMR tut die Realität offenbar keinen Abbruch. Kaum ein Land, das weiter auf Atomkraft setzt, kündigt nicht auch ein SMR-Projekt an. Denn SMR, die es real noch nicht gibt, sind eine ideale Projektionsfläche, um den Glauben an Atomkraft als angeblich saubere, billige, harmlose und innovative Technologie am Leben zu halten: Die Hoffnung stirbt zuletzt. Die Strategie scheint aufzugehen, jedenfalls in der EU: Energiekommissarin Kadi Simson kündigt Anfang November eine SMR-Industrieallianz an, die Marktanreize schaffen, Projekte finanzieren und Forschung und Entwicklung fördern soll. Das EU-Parlament schlägt in dieselbe Kerbe und fordert im Dezember eine umfassende Strategie für den

Einsatz von SMR. [14] Die EU soll dafür Geld zur Verfügung stellen: Auch deutsche Steuergelder könnten dann in die SMR-Entwicklung fließen. [15]

Phönix aus der Asche?

Auch Geopolitik spielt eine Rolle. Sowohl Russland als auch die USA hoffen, zahlreiche SMR in die ganze Welt verkaufen und die Empfängerländer damit an sich binden zu können. Der US-Klimabeauftragte John Kerry verkündete 2021 bei der COP27 das „Project Phoenix“. Man wolle Kohlekraftwerke in (Ost-)Europa und Asien durch SMR amerikanischer Bauart ersetzen. Projektvorschläge aus der Tschechischen Republik, der Slowakei und Polen sind bereits ausgewählt und erhalten Unterstützung bei Machbarkeitsstudien. Den Anfang machen soll jedoch Rumänien [16]. In einem Videobriefing für Journalist*innen am 27. September 2023 schwärmt der stellvertretende US-Außenminister Geoffrey

Pyatt für den dort geplanten ersten SMR, der 2029 ans Netz gehen soll: „*Bisher hat noch niemand eines dieser Dinger in Betrieb genommen.*“ Gut möglich allerdings, dass das noch eine ganze Weile so bleibt: Projektpartner des staatlichen rumänischen Energieversorgers ist ausgerechnet Nuscale.

[1] N-TV, Traum günstiger Minireaktoren verpufft in Idaho“, 13.06.2023

[2] RWE Enformer Blog „Onshore-Windkraft in den USA auf dem Vormarsch“, 11.10.2022

[3] World Nuclear Industry Report 2021 (WNISR 2021), September 2021, S. 54.

[4] World Nuclear Industry Status Report 2023 (WNISR 2023), Dezember 2023, S. 321

[5] World Nuclear Association, „Nuclear Power in China, Dezember 2023

[6] World Nuclear News „First vessel installed in China's HTR-PM unit“, 21.03.2016.

[7] WNISR 2023, S. 438

[8] China National Nuclear Corporation, „Opportunities and Challenges in SMR and Its Practice in ACP100“, Juli 2019.

[9] TASS, „Cost of BREST fast reactor construction

estimated at \$1.3 bln, says Rosatom“, 08.06.2021.

[10] WNISR 2023, S. 135, Fußnote 309.

[11] Associated Press, „Rwanda will host a company's 1st small-scale nuclear reactor testing carbon-free energy approach“, 13.09.2023.

[12] Efahrer.com, „Firma war Vorreiter der Mini-Atomkraftwerke: Doch sie soll betrogen haben“, 07.01.2023.

[13] Kadi Simson, Opening speech by Commissioner Simson at the European Small Modular Reactor Partnership event“, 06.11.2023.

[14] Julian Bothe, „Die große Ablenkung“, „ausgestrahlt-Blog“, 15.12.2023.

[15] Euractiv, „EU-Parlament: Breite Unterstützung für kleine Atomreaktoren“, 13.12.2023

[16] Euractiv, „US-amerikanische Kernreaktoren in Osteuropa sollen bis 2030 in Betrieb gehen“, 29.09.2023.

Anna Stender ist Redakteurin des Magazins

„ausgestrahlt“, die uns den Artikel dankenswerterweise zur Verfügung stellte.

Nachtrag

Cäsiumbelastung in deutschen Wäldern

Auf den umfangreichen Titel-Bericht der letzten Strahlentelexausgabe gab es eine Reihe von Reaktionen, die einen Nachtrag sinnvoll machen. Zunächst gilt es einen Fehler in der Berechnung der Cäsiumaufnahme beim Verspeisen von 10 Wildschweinportionen zu korrigieren. Die Berechnung auf Seite 7, linker Kasten ergab mit den gewählten Parametern von 250 g je Portion und 470 Bq/kg ¹³⁷Cs

nicht die angegeben Strahlungsdosis von 0,15 mSv, sondern:

$1175 \text{ Bq} \cdot 1,3 \cdot 10^8 \text{ Sv/Bq} = 15,3 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} = 15,3 \mu\text{Sv}$ und damit 0,015 mSv.

Andererseits gab es den Vorwurf der Verniedlichung der Cäsiumgefahren mittels solcher Rechnungen. Ralf Kusmierz aus Bremen äußerte sich zur Thematik folgendermaßen: „2,5 kg Wildschwein pro Jahr sind knapp 7 g/d; als Beitrag zur Ernährung ist das quantitativ irrelevant und schlicht verzichtbar. ... insofern fehlt mir für das „Gesundbeten“ das Verständnis.“ Es ist nicht einfach, physikalischen Sachstand mit medizinischen

Gesichtspunkten unter einen Hut zu bekommen.

Dennoch sind wir der Meinung, dass sich beides mehr ergänzt als widerspricht. Es kommt auf die Sichtweise und Erfahrung an. Generell ist es sinnvoll, in cäsiumbelasteten Gebieten Kontrollen beizubehalten, da im Fallout von 1986 die Palette radioaktiver Substanzen im Niederschlag breit und unkontrollierbar war. Das Cäsium kann mit seiner Leichtflüchtigkeit und Löslichkeit als eine Art konservatives „Leit-Isotop“ dienen; allerdings ist die Halbwertszeit im nuklearen Langzeitgedächtnis sehr gering. Mag es als Gefahrenwarner für

einige Generationen des Menschen genügen, „... Das Viel größere Problem ist, dass man aus der Kernenergiegedebatte anscheinend überhaupt nichts gelernt hat und jetzt allenthalben wieder nach neuen KKW geschrien wird. Mich depressiert das sehr.“ meint R. Kusmierz weiter. Damit hat er auffallend recht. Die weise Schlussfolgerung des bekannten Schriftstellers Erich Kästners aus düsteren Zeiten ist aktueller denn je: *Resignation ist kein Gesichtspunkt ... Es gibt nichts Gutes, außer man tut es.* Es zählt künftig weiterhin das stetige Bemühen anhaltender Aufklärung.

Uranbergbausanierung

Die problematischen Hinterlassenschaften des Uranbergbaus: ein wichtiges Thema auf der safeND 2023

Von Carlo Dietl (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung - BASE)

Die safeND 2023 vom 13. bis 15. September 2023 brachte über 300 internationale Wissenschaftler:innen nach Berlin, die sich aus unterschiedlichen fachlichen Perspektiven mit Fragen der Sicherheit nuklearer Entsorgung beschäftigten. Ein Themenschwerpunkt des internationalen und interdisziplinären Forschungssymposiums war dem Beginn der nuklearen Brennstoffkette gewidmet und neben einem Workshop zum Thema Uranbergbau wurde eine Exkursion in das ehemalige Ronneburger Wismutrevier organisiert.

Für den Workshop konnten internationale Expert:innen gewonnen werden: Veronika Deffner vom Bundesamt für Strahlenschutz berichtete als Koautorin der Kohortenstudie zu ehemaligen Beschäftigten der SAG/SDAG Wismut (SAG: Staatliche Aktiengesellschaft; SDAG: Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft) von den gesundheitlichen Folgen des Uranbergbaus in der DDR. Der Historiker Yaroslav Koshelev von der Humboldt-Universität Berlin lies die Workshop-Teilnehmer teilhaben an den Erinnerungen der Wismut-Angehörigen, die er in zahlreichen Zeitzeugen-Interviews festgehalten hatte.

Dima Litvinov, Greenpeace-Aktivist aus Stockholm (und ehemals Vorstandsmitglied von Greenpeace Russland) nahm die mehr als 50 Workshopteilnehmenden mit auf eine Exkursion ins sibirische Uranbergbauggebiet von Priargunskiy. Und Michael Orleanu von der rumänischen NGO Centru de Ecologie Montana berichtete über seine persönlichen Erfahrungen mit der Uranindustrie im zentralrumänischen Braşov.

Der Workshop zeigte eindrücklich, wie wichtig Schutzmaßnahmen im Uranabbau und der Uranaufbereitung, gesundheitliche Vorsorgeuntersuchungen und Aufklärung der betrieblichen Belegschaft und der Anwohner von Urangewinnungsbetrieben in der aktiven Phase des Uranbergbaues sind. Der Vortrag von Veronika Deffner genauso wie die Präsentation von Dima Litvinov veranschaulichten, wie der Schutz von Gesundheit und Umwelt beim Umgang mit strahlendem Material insbesondere unter undemokratischen Verhältnissen missachtet werden kann. Rückblickend erstaunt, dass die Erinnerungen der Wismutkumpel, der Anwohner und der ehemaligen sowjetischen Experten an das Leben im Wismutrevier im sächsischen Erzgebirge

und in Ostthüringen generell sehr positiv sind – dies vor allem vor dem Hintergrund der massiven Gesundheitsschäden bei Uranbergarbeitern in den frühen Jahren wie sie die Wismut-Kohortenstudie beschreibt. Das zumindest ist das Ergebnis der Zeitzeugeninterviews von Yaroslav Koshelev. Auch heute noch besteht eine enge und positive emotionale Verbundenheit der meisten Interviewten zur Wismut und dem Leben im Einflussgebiet der SDAG. Eine andere wichtige Fragestellung, die im Workshop thematisiert wurde, sind die Schwierigkeiten, die bei Entsorgungs-, Endlagerungs- und Renaturierungsmaßnahmen, auftreten können, wenn die Gewinnung des Uranerzes an ihr Ende gekommen ist. Das rumänische Beispiel von Michael Orleanu machte sehr deutlich, dass auch innerhalb der EU noch viel Arbeit vor den staatlichen Institutionen und der Uranindustrie liegt, wenn es um die Sicherung von Altstandorten und Sanierungsmaßnahmen geht, die in erster Linie dem Schutz der Bevölkerung und der Umwelt dienen sollen.

Am Samstag, den 16. September brach frühmorgens eine 15-köpfige Exkursionsgruppe direkt nach der safeND nach Ronneburg auf, um die Geschichte der Wismut von den Anfängen des Uranbergbaues im Jahr 1949 bis zur aktuellen Sanierung seit 1990 durch die Wismut GmbH im Detail kennenzulernen. Geführt wurde die Gruppe von Tilo Wetzel vom Bergbauverein Ronneburg, Frank Lange (Kirchlicher

Umweltkreis Ronneburg), Frank Wille (Betriebsleiter der Wismut GmbH in Ronneburg) und Julia Dünkel (Wismut Stiftung gGmbH). Außerdem waren mit Florian Szillat und Stefan Mitzinger auch zwei Vertreter des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) vertreten. Die Gruppe besuchte neben dem Bergbaumuseum und Schaubergwerk Ronneburg, das vom Bergbauverein betrieben wird, auch das Objekt 90, wo der Wismuttraditionsverein nicht nur über die Geschichte des Uranbergbaues im Ronneburger Revier informiert, sondern insbesondere die Sanierungsaktivitäten der vergangenen Jahrzehnte im Blick hat. Weitere Höhepunkte waren der Besuch der Schmirchauer Höhe und der Denkmalschachanlage 407. Die Schmirchauer Höhe wurde in und auf dem ehemaligen Urantagebau Lichtenberg angelegt und besteht aus dem Haldenmaterial der berühmten „Pyramiden von Ronneburg“. Die Exkursion schlug einen weiten Bogen von Stalins Atombombenprogramm, das ohne das Uran aus Ronneburg nicht möglich gewesen wäre, über die Lebensumstände im Wismutrevier bis hin zum Ende des Uranbergbaus mit der Wiedervereinigung und der anschließenden, langen Sanierungsgeschichte der Hinterlassenschaften der Urangewinnung. Auch die Kulturarbeit der Wismut SDAG und der aktuelle Umgang mit der Wismutgeschichte und die Rolle der Wismut-Stiftung dabei wurden am Ende der Exkursion diskutiert.



Bergbaugeschichte: die Denkmalschachtanlage 407 und alte IFA-Lkws – einer davon mit Bohrlafette.



Die Ronneburger safeND-Exkursionsgruppe.

Ronneburg war das bei weitem größte Uranerzfeld im Wismutrevier: von den insgesamt 231.000 t Uran, die von der Wismut in 45 Jahren Bergbauaktivität gefördert wurden, stammten 125.000 t aus den Ronneburger Tief- und Tagebauen. Allein aus der schiereren Menge an geförderter Uranerz ergibt sich die immense Herausforderung, die die Endlagerung des Haldenmaterials und der Rückstände aus der Erzaufbereitung darstellen. Die Sanierungsmaßnahmen im Ronneburger Revier begannen 1991 und werden frühestens 2028 abgeschlossen sein, wahrscheinlich sogar eher in den 2030er Jahren. Die Sanierungskosten belaufen sich bisher auf ca. 7 Mrd. €; sie werden bis zum Abschluss der Maßnahmen mindestens 8,9 Mrd. € betragen. Zu den Sanierungsmaßnahmen, die als Ewigkeitslasten bezeichnet werden können, gehört die Dekontamination der Wässer aus der Schmirchauer Höhe: sie werden bis weit in die Zukunft gefiltert und von Schwermetallen befreit werden müssen, bevor sie in den Vorfluter – die Weiße Elster – eingeleitet

werden können. Besonders aufschlussreich für die Exkursionsteilnehmer:innen, die auch und gerade an Fragen der Öffentlichkeitsbeteiligung interessiert waren, ist die gute und konstruktive Zusammenarbeit zwischen der Wismut GmbH als Träger der Sanierungsmaßnahmen und dem Kirchlichen Umweltkreis Ronneburg sowie anderen Vertretern der Zivilgesellschaft in Ostthüringen. Die Exkursion in den ehemaligen Ronneburger Uranbergbau hat bei allen Exkursionsteilnehmenden tiefen Eindruck hinterlassen und sie für die problematischen Folgen der Uranerzgewinnung sensibilisiert.

Unser Autor **Dr. Carlo Dietl** ist Geowissenschaftler und seit 2020 Referent beim BASE.

Blick von der Schmirchauer Höhe ins Ronneburger Uranbergbaurevier



Die Konferenz bot Wissenschaftlern unterschiedlichster Disziplinen die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse mit Blick auf den sicheren Umgang und die Entsorgung radioaktiver Abfälle zu präsentieren und zu diskutieren.

Schwerpunktthema safeND 2023

Sicherheit in der nuklearen Entsorgung bedeutet, alle denkbaren Szenarien zu betrachten, dafür Vorsorge zu treffen und tragfähige Kommunikationsprozesse zu etablieren. Bisher unzureichend berücksichtigte Szenarien und Krisensituationen betreffen: Pandemie, mit zeitweisem Stillstand des öffentlichen Lebens, kriegerische Angriffe auf nukleare Anlagen, Attacken auf kritische Infrastruktur und nicht zuletzt globale Klimaveränderungen mit Auswirkungen auch auf die nukleare Sicherheit.

Im Hinblick auf die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung, die mit extrem langen Zeithorizonten verbunden sind, wurden Fragen u.a. folgende diskutiert: Wo stehen wir dabei heute und welche Wissenslücken erkennen wir? Welche Erkenntnisfortschritte wurden in den vergangenen Jahren erzielt? Und welche Prioritäten stehen für die internationale Forschungslandschaft in der kommenden Zeit ganz oben auf der Agenda?

Weitere Themengebiete betrafen:

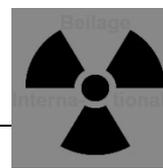
- Stilllegung nuklearer Anlagen
 - Zwischenlagerung, Konditionierung und Transport radioaktiver Abfälle
 - Standortauswahl und Endlagerung von hoch- sowie schwach- und mittelradioaktiven Abfällen
 - Safeguards und Non-Proliferation
 - Alternative Entsorgungsmethoden
 - Kommunikationsprozesse, Langzeitinformatioerhalt und Semiotik
 - Partizipationsprozesse
 - Historische, wirtschaftliche und juristische Aspekte
- Quelle: www.base.de

Regionales

Radon in Ronneburg

Teil 3: Innenraumbelastung

Der Beitrag erscheint nur
in der print-Ausgabe.



**Worst-case Consequences
Status of the
cooling water
discharge of the
Fukushima
Daiichi NPP**

The International Atomic Energy Agency (IAEA) has once again confirmed to the Japanese operator Tepco of the Fukushima NPP that the discharges of the diluted radioactive cooling water meet "... international safety standards and that the release would have negligible radiological effects on humans and the environment as planned" [1]. The press release on the latest (fourth) initiation batch continues: "Experts, the IAEA ... took samples after the treated water had

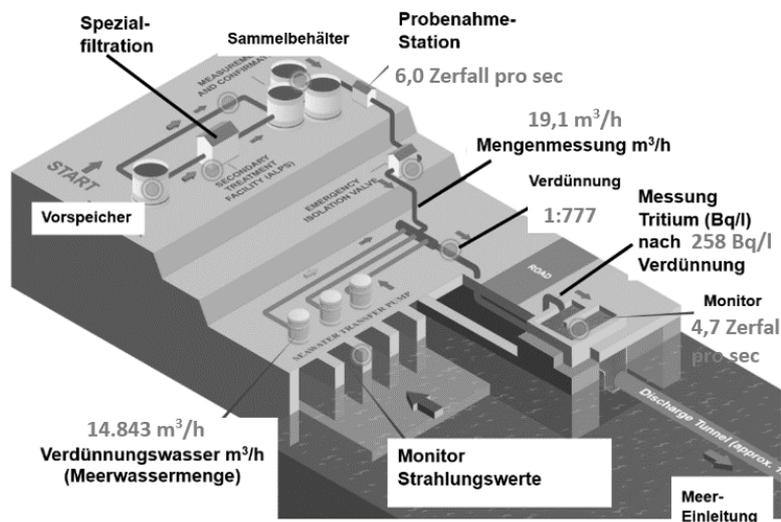
concentrations were also confirmed by the IAEA far below the operational limits." In March, Director General Rafael M. Grossi visited the Fukushima NPP on a tour of Japan. His statement on the situation is limited to the sentence: "The IAEA said, and I said, that we would monitor the controlled discharge of treated water from the Fukushima Daiichi nuclear power plant before, during and after the operation. The IAEA is here and we will stay here until the last drop." In the power plant, Mr. Grossi visited the vertical shaft of the drainage system, where the treated water, already diluted with seawater, reaches the sea for controlled release. [2]

deliberately operated far below 1,500 Bq/l - on the 2nd of March, 2023 the discharge value was 258 Bq/l tritium. However, this only feigns good treatment effects, which are not achieved at all in cooling water treatment. In fact, a discharge is operated **with several times higher cargo loads of radioactive substances** into the ocean. The sampling of the performance capability of the cooling water treatment and the effluent values before dilution are not public and not communicated by the IAEA. From the dilution ratio, a 3.3 times higher tritium concentration of the cooling water treatment can be derived than desired (200 kBq/l instead of 60 kBq/l). The freight volumes are not influenced by the dilution quantities, but are determined by the filtrate concentrations. High tritium values correlate with higher discharge quantities of the radioactive material range of the contaminated cooling water.

**Worst-case scenarios
Nuclear safety of
NPPs in Ukraine**

Commenting on the situation of the NPPs in Ukraine, Director General Grossi said: "So far, we have succeeded in stabilizing the situation, but as we saw again last week, nuclear security in Ukraine remains extremely vulnerable. We cannot afford to let our guard down at any time." In the vicinity of the Russian-occupied Zaporizhzhia NPP, military actions take place again and again. There is military equipment on the NPP site, and IAEA representatives are still not allowed access to certain parts of the building. Nevertheless "... the IAEA team did not identify any nuclear safety concerns"; scheduled maintenance work is running largely without complaints. Power outages and emergency power operation as well as air alarms have become a daily routine at many nuclear facilities. "The IAEA experts at the Khmelnytskyi, Rivne and South Ukraine nuclear power plants, as well as in Chernobyl, have reported that nuclear safety is still in progress despite several air alarms ... is still guaranteed." The situation can change at any time!

Abb. 1: veröffentlichte Daten Kühlwassereinleitung vom 02.03.24 (4. Charge)



been diluted with seawater in the drainage facilities on the 28th of February. The IAEA's independent on-site analysis confirmed that the tritium concentration is far below the operating limit of 1,500 becquerels per litre. ... In the three previous batches – a total of 23,400 cubic meters of water – tritium

The so-called "operational operating limit" of 1,500 Bq/l is considered the Japanese drinking water limit value, which is derived from one seventh of the limit of the World Health Organization (WHO) of 10 kBq/. In Germany, 0.1 kBq/l, i.e. one hundredth, applies. The dilution is

cooling water.
F.L.

[1] [iaea.org/news-center/news/iaea-director-general-in-japan](https://www.iaea.org/news-center/news/iaea-director-general-in-japan)
[2] IAEA-News 17/24
www.iaea.org