

Michael Wiescher

Radioaktivität

Entwicklungen und Anwendungen im
modernen Industriezeitalter

Band II



Michael Wiescher

Radioaktivität

Michael Wiescher

Radioaktivität

Entwicklungen und Anwendungen im modernen
Industriezeitalter

Band II (Teil 3)

Für meine Kusinen

Brigitte Roos und Ulrike Bäumle

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische
Daten sind im Internet über <http://dnd.d-nb.de> abrufbar

wbg Academic ist ein Imprint der wbg
© 2021 by wbg (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt Die
Herausgabe des Werkes wurde durch die
Vereinsmitglieder der wbg ermöglicht.
Umschlagsgestaltung: Hrair Aprahamian
Umschlagsabbildungen: Shutterstock und Rare Book Collection der
Hesbergh Library der University of Notre Dame
Satz und eBook: Satzweiss.com Print, Web, Software GmbH
Gedruckt auf säurefreiem und
alterungsbeständigem Papier
Printed in Germany

Besuchen Sie uns im Internet: www.wbg-wissenverbindet.de

ISBN 978-3-534-40585-5

Elektronisch ist folgende Ausgabe erhältlich:
eBook (PDF): 978-3-534-40587-9

Inhalt

Teil 3 Anthropogene Radioaktivität

10 Einleitung	9
11 TENR: Technically Enhanced Radioactivity	13
11.1 Radioaktivität in der Landwirtschaft	14
11.2 Angereicherte Radioaktivität in Baustoffen	27
11.3 Angereicherte Radioaktivität in fossilen Brennstoffen	43
11.4 Radioaktivität und alternative Energiequellen	56
12 Kernwaffen	72
12.1 Das Manhattan-Projekt.....	73
12.2 Technik, Design und Wirkungsweise der Atombombe.....	78
12.3 Hiroshima und Nagasaki.....	89
12.4 Das Atomwaffentestprogramm	100
12.5 Forschungsziele des Testprogramms.....	104
12.6 Radioaktiver Ausfall von Kernwaffentests	112
12.7 Nukleare Forensik	131
13 Kernenergie	143
13.1 Der Urankreislauf	145
13.2 Kernreaktoren	153
13.3 Radioaktivität in Kernkraftreaktoren.....	161
13.4 Fusionsreaktoren.....	170
13.5 Aufbereitung und Endlagerung	174
13.6 Unfälle in Kernkraftwerken.....	200
13.7 Der Austritt von Radioaktivität bei Kernkraftwerkunfällen.....	211
14 Strahlungstherapie und Kernmedizin	234
14.1 Entwicklung und Ziele der Nuklearmedizin.....	234
14.2 Diagnostik von Röntgenstrahlung bis zum CAT-SCAN	237

14.3	Von CT zu SPEC und PET	250
14.4	Biologische und technische Grundlagen der Strahlentherapie	258
14.5	Produktion und Entsorgung der Radio-Isotope.....	281
14.6	Radonbalneologie	287
15	Radiologische Anwendungen in Industrie und Technik.....	291
15.1	Produkte mit radioaktiven Materialkomponenten	302
15.2	Radioaktive Quellen in der Materialforschung und -prüfung	313
15.3	Strahlungstechniken in der Qualitätskontrolle und Materialanalyse.....	320
15.4	Bestrahlung in industriellen Produktionsverfahren	339
15.5	Energiespeicher und Batterien	356
16	Radioaktivität in Kunst und Archäologie.....	367
16.1	Die Bedeutung von Zusammensetzungs-, Herkunfts- und Altersanalyse.....	367
16.2	XRF und PIXE als Röntgentechnologien	369
16.3	Neutronenaktivierung.....	377
16.4	Die Altersbestimmung mit radioaktiven Isotopen.....	384
16.5	Kunstfälschungen und radiologische Messmethoden	405
17	Radioaktivität und Gesellschaft	412
17.1	Gesellschaftliche Opposition.....	414
17.2	Gesellschaftliche Ängste	415
17.3	Die Büchse der Pandora.....	418
17.4	Risiko und Sicherheit	430
	Danksagung.....	437
	Erratum (1. Band)	439

Teil 3

Anthropogene Radioaktivität

10 Einleitung

Im ersten Band unserer Betrachtungen zur Radioaktivität haben wir uns auf die physikalischen Grundlagen und Ursprünge dieses Phänomens konzentriert und die Grundlagen des mathematischen Formalismus dargestellt, der die Gesetzmäßigkeiten der Radioaktivität beschreibt. Dieser Formalismus ist wichtig, denn er erlaubt schnell und relativ einfach Vorhersagen zur Radioaktivität über lange Zeiträume hin abzuschätzen. Er erlaubt auch, die Auswirkungen der Radioaktivität auf die Erdgeschichte und über Ereignisse vor der Bildung des Sonnensystems zu betrachten, die zur Produktion der natürlichen Radioaktivität geführt haben, und ihre Folgen aufzuzeigen.

Im gegenwärtigen Zeitalter des Holozäns¹ befindet sich die Erde als physikalisches System im radiologischen Gleichgewicht. Der Großteil langlebiger radioaktiver Atomkerne lagert tief im Erdinneren. Ihre Zerfallsenergie betreibt den internen Dynamo des Planeten, der ein schützendes magnetisches Feld gegen die tödlichen Einflüsse der kosmischen Strahlung aufbaut. Dieselbe Energiequelle des radioaktiven Zerfalls hält den Erdmantel flüssig und wirkt damit als Motor der tektonischen Drift, die Bewegung unserer Kontinentalplatten, über die Jahrtausende unserer Erdgeschichte. Die Zerfallsenergie könnte eine der möglichen natürlichen Energiequellen sein, die die Bildung komplexer chemischer Moleküle als erstem Schritt zum biologischen Leben zu verdanken ist.

In höherer Dosis birgt die Radioaktivität jedoch erhebliche Gefahren für biologisches Leben, denn die durch den radioaktiven Zerfall freigesetzte Energie kann auch komplexe biologische Moleküle aufbrechen – mit Folgen, die bis zum sogenannten Strahlentod führen können.

Biologische Systeme leben im selbstregulierenden Gleichgewicht. Sie besitzen eine fein austarierte interne Radioaktivität, die chemische Prozesse weitgehend im Gleichgewicht hält und den jeweiligen Lebensbedingungen angepasst zu sein scheint. Strahlungsbedingte somatische und genetische Mutationsprozesse werden durch enzymatische Reparaturen weitgehend unter Kontrolle gehalten, solange die Strahlungs-dosis nicht zu hoch ist. Manche Bakterienarten wie *Deinococcus radiodurans* können durch effektive Reparaturmechanismen selbst dann überleben, wenn die Dosis tausendfach höher ist als die für Menschen tödliche.

¹ Das Holozän ist die jüngste geologische Epoche der Erdgeschichte. Ihr Beginn wird mit dem Ende der letzten Eiszeit vor 11 700 Jahren angesetzt und gilt als milde, klimatisch ausgeglichene Epoche in der Entwicklung unseres Planeten, die das Zeitalter des Menschen als zunehmend dominierende biologische Spezies auf Erden möglich machte.

Das 20. Jahrhundert hat jedoch eine entscheidende Änderung gebracht: Das Holozän der letzten zehntausend Jahre wurde durch das noch nicht hundert Jahre² dauernde Anthropozän abgelöst.

Das Anthropozän gilt auf Vorschlag des Klimaforschers und Nobelpreisträgers Paul Crutzen (1933–2021) als Bezeichnung eines neuen geochronologischen Zeitalters, in dem der Mensch mit seinen Aktivitäten zum kritischen Einflussfaktor auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse der Erde geworden ist.³ Der Einfluss des Menschen spiegelt sich wider in der Entwicklung von Landschaft, der Änderung von Fauna und Flora und ihrer Artenvielfalt, der Belastung von Flüssen und Ozeanen, der Umverteilung freifließenden Wassers in Flüssen, Seen und Speichern, im rapiden Verschwinden Jahrtausenden alten Grundwasserspeicher und endlich der Änderung unseres Klimas.⁴

Dieser Eingriff der Menschheit in das natürliche Gleichgewicht der biologischen Lebensbedingungen auf der Erde richtet sich vorwiegend am marktorientierten Nutzen und Versorgung der rapide wachsenden Weltbevölkerung aus. Das hat zur schlimmsten Bedrohung dieses Gleichgewichts geführt. Betrachtet man unseren Planeten in seinem komplexen Netzwerk physikalischer, chemischer, geologischer und biologischer Zusammenhänge und Wechselwirkungen als selbstregulierendes System im Gleichgewicht, so folgt nach den schlichten Gesetzen der Thermodynamik, dass bei Störung dieses Gleichgewichts ein Übergang zur Labilität oder schließlich zu einem neuen Gleichgewichtszustand stattfindet. Das Anthropozän könnte der Beginn solch eines Übergangs sein. Es fragt sich, ob der neue Gleichgewichtszustand so angenehm für den Menschen sein wird, wie es das Holozän war. Die Dynamik des Übergangs durch atmosphärisch-klimatische Schwankungen birgt zudem die Gefahr radikaler Änderungen der Lebensbedingungen innerhalb einer kurzen Zeitskala. Bedingt durch die Komplexität des Systems Erde erfordert jede genauere Vorhersage komplexe Computersimulationen, die soweit wie möglich alle eben erwähnten Zusammenhänge und Wechselwirkungen und ihre thermo- und hydrodynamischen Folgen mit einbeziehen sollten.

² Die Dauer des Anthropozäns hängt offensichtlich vom Zeitpunkt seines Beginns ab. Hier wird noch argumentiert, ob dies mit der spanischen Ausbeutung Südamerikas oder mit dem Beginn der industriellen Revolution in Europa oder mit der ersten Kernwaffenexplosion anzusetzen ist. Die Wissenschaftskomitees beraten noch. Deswegen definiere ich den Beginn des Anthropozäns mit 1934, den Zeitpunkt der ersten künstlichen Erzeugung eines radioaktiven Isotops, ³⁰P, durch Irène Joliot-Curie und Frédéric Joliot.

³ Paul J. Crutzen: *Geology of Mankind*, *Nature*, 415, 2002, S. 23; sowie: W. Steffen, P. J. Crutzen, J. R. McNeill: *The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?* *Ambio*, 36, 2007, S. 614–621.

⁴ Hierzu gibt es zahllose Bücher und Schriften; als Beispiel nenne ich: Eckart Ehlers: *Das Anthropozän. Die Erde im Zeitalter des Menschen*. Darmstadt 2008.

Unsere Themenstellung befasst sich nur mit einem der vielen Aspekte, dem menschlichen Eingriff in das Gleichgewicht der gegenwärtigen Verteilung der radioaktiven Elemente und der dadurch erfolgten Schaffung einer zusätzlichen Strahlenbelastung der Erdoberfläche inklusive der damit eng verbundenen Biosphäre.⁵

Vereinfacht gesagt erhöht die anthropogene Radioaktivität durch menschlichen Eingriff die radioaktive Belastung der Bevölkerung. Dies gilt nicht so sehr für den Einzelfall, sondern für die durchschnittliche Belastung des Menschen. Sie liegt bei Beschäftigten, die direkt mit der Produktion oder Anwendung der Strahlung zu tun haben, weitaus höher. Deshalb sind spezielle Belastungsgrenzen gesetzlich vorgeschrieben. Das betrifft Bergleute, Flugpersonal, Reaktortechniker und Strahlungsmediziner, um nur einige zu nennen. Höher belastet sind aber oft auch ältere Menschen, vornehmlich Krebskranke, denen aus diagnostischen Gründen oder bei der Strahlungsbehandlung erheblich größere Dosen an Radioaktivität zugemutet werden.

Die anthropogene Radioaktivität unterscheidet sich in zwei Klassen: die künstlich oder technisch angereicherte Radioaktivität – im Allgemeinen als Technical Enhanced Radioactivity (TENR) bezeichnet –, und die künstlich hergestellte oder erbrütete Radioaktivität. TENR verändert nicht die Gesamtstrahlung der Erde, sondern verlagert nur durch menschlichen Eingriff Radioaktivität aus unzugänglichen Zonen der Erdkruste in den menschlichen Lebensraum, die Biosphäre. Durch Endlagerung wird diese Aktivität wieder in diese Zonen zurücktransportiert, allerdings in chemisch erheblich angereicherter und kompakterer Form. Erbrütete Radioaktivität als nicht natürlicher Prozess schafft auf der anderen Seite neue zusätzliche Strahlung, die die Gesamtaktivität der Erde erhöht. Diese radioaktiven Isotope sind nicht so langlebig wie die Aktiniden und Transaktiniden: Trotzdem wird eine Entsorgung notwendig sein.

Die Zusammenhänge und Auswirkungen sind zumeist relativ komplex, die Unterschiede nicht unbedingt transparent. Zur TENR gehört zum Beispiel Radioaktivität, die durch fossile Brennstoffe in die Atmosphäre gelangt, aber auch Radioaktivität aus dem Kernwaffentestprogramm, das auf Brennstoffen der Uranbergwerke beruht. Hinzu kommt die dabei durch Neutroneneinfang in der Atmosphäre erzeugte Radioaktivität, aber auch die durch ähnliche Prozesse mittels Neutronen aus der Höhenstrahlung. Auf der anderen Seite werden Radio-Isotope, im Reaktor durch Neutroneneinfang oder durch Kernreaktionen am Beschleuniger erzeugt, als erbrütete Radioaktivität definiert.

⁵ Gemäß Wikipedia wird die Biosphäre als dünne Hülle definiert, die den äußeren Bereich der Erde durchwirkt. Sie reicht ungefähr von 60 km über der bis 5 km unter die Erdoberfläche, vom unteren Saum der Mesosphäre bis in die obere Lithosphäre. Dabei werden ihre Außengrenzen ausschließlich von Mikroorganismen bewohnt.

Im folgenden Kapitel betrachten wir den Einfluss der anthropogenen Radio-Isotope auf Ackerbau und Viehzucht, unsere persönlichen Lebensbedingungen in Haus und Wohnraum, Energie-Erzeugung durch fossile und erneuerbare alternative Energiequellen. Zwei folgende Kapitel sind der Kernkraft als Energiequelle und den Kernwaffen mit ihren jeweiligen Auswirkungen gewidmet: Themen, die zwar im Zentrum politischer Diskussionen stehen, aber nur wenig zur durchschnittlichen Strahlenbelastung der Bevölkerung beitragen. Allerdings nicht einbezogen sind mögliche Langzeitfolgen, die sich aus der Notwendigkeit der Endlagerung ergeben, eine Fragestellung, die in einem unabhängigen Kapitel diskutiert wird. Die Nuklearmedizin nimmt eine dominante Rolle in der Frage von Anwendungen und Auswirkungen anthropogener Radioaktivität ein; die verschiedenen Anwendungsbereiche werden im darauffolgenden Kapitel dargestellt. Das nächste Kapitel befasst sich mit den wachsenden industriellen Anwendungen der Radioaktivität – ein Thema, das sich von der Material- und Verfahrenstechnik bis zur Raumfahrt und forensischen Sicherheitstechnik erstreckt. Der Anwendungsbereich ist so groß, dass nur einige ausgewählte Beispiele diskutiert werden können. Schließlich wird die wachsende Bedeutung radiophysikalischer Anwendungen für traditionell geisteswissenschaftliche Gebiete wie Kunstgeschichte und Anthropologie diskutiert – ein schnellwachsendes Gebiet insbesondere in Europa. Wer weiß schon, dass der Louvre unter der Gemäldesammlung ein eigenes Beschleuniger-Labor zu Analyse und Verifizierung von Gemälden und anderen historischen Kunstgegenständen betreibt?

Im Schlusskapitel werden einige Fragen zum Stellenwert der Radioaktivität im gesellschaftlichen Denken angeschnitten, was sich im Wesentlichen aus der Haltung der Bevölkerung oder Bevölkerungsgruppen der Kernenergie gegenüber ergibt.

11 TENR: Technically Enhanced Radioactivity

Die folgenden Kapitel befassen sich mit der anthropogenen oder künstlichen, mithin von Menschen gemachten Radioaktivität. Sie lässt sich verallgemeinert definieren als die Art der Radioaktivität, der die Menschheit vor dem Beginn des atomaren Zeitalters nicht ausgesetzt war. Dieses Zeitalter setzte mit der Erzeugung des ersten künstlichen radioaktiven Isotops Phosphor-30 (^{30}P) von 1934 durch eine alpha-induzierte Kernreaktion ein. Nur vier Jahre später gelang der erste Nachweis der Spaltung von Atomkernen im Experiment von 1938 durch Otto Hahn und Fritz Straßmann, zu dessen Ergebnis Lise Meitner und ihr Neffe Otto Fritsch die theoretische Beschreibung lieferten. Diese Interpretation kulminierte 1945 in den Atombombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki, also nur sieben Jahre später. In den folgenden Jahrzehnten entwickelte sich die Kernphysik zu einem großtechnischen Forschungs- und Anwendungsgebiet. Seither erhöht die von Menschen produzierte oder anthropogene Radioaktivität die natürliche Strahlenbelastung in der Geo- und Biosphäre, also in unserem natürlichen Lebensraum.

Bei der anthropogenen Radioaktivität muss man zwischen zwei Komponenten unterscheiden. Die erste Komponente (TENR) entsteht in der Biosphäre, wenn menschliche Aktivitäten die in der Natur vorliegende Radioaktivität anreichern und verstärken. Insbesondere Bergbau und Tiefbohrungen bringen Radioaktivität an die Erdoberfläche – überwiegend als schon beschriebene natürliche radioaktive Isotope von Uran, Thorium, Polonium, Radium und Kalium. Das Aufarbeiten des gefördert Materials setzt diese Isotope durch verschiedene technologische Prozesse frei. Sie landen als Schlacke auf Halden und können von dort ins Grundwasser oder durch Verbrennungsprozesse in die Atmosphäre eindringen. Ersteres trifft bei Uran- oder auch Erz- und Edelmetallförderung zu, letzteres auf Kohle-, Öl- und Erdgasförderung. Zur TENR-Komponente gehören auch Kernwaffenexplosionen oder Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken. Sie bewirken Anreicherungsprozesse natürlich vorkommender, kosmogener Radioaktivität von Tritium-3 (^3H) und Kohlenstoff-14 (^{14}C). Diese Anreicherungen gehen zumeist auf einen erhöhten Neutronenfluss zurück, der ähnliche Produktionsprozesse von ^3H und ^{14}C bewirkt, etwa die durch kosmische Strahlung erzeugten Neutronen in der Atmosphäre.

Die zweite Komponente anthropogener Radioaktivität ist die künstliche, also die Radioaktivität, die vor dem Beginn des atomaren Zeitalters nicht existiert hat oder nicht durch natürliche Prozesse erzeugt werden kann. Darunter fallen radioaktive Isotope, die gezielt durch Bestrahlungsprozesse für industrielle oder medizinische Zwecke produziert werden und nach diesen

Anwendungen als langlebige Abfallprodukte ins Abwasser und damit in den Wasser-Kreislauf geraten können. Diese Produktion findet zumeist an Kernreaktoren oder Teilchenbeschleunigern statt. Ebenso gehören die langlebigen Zerfallsprodukte von Kernspaltungsprozessen aus den Atombomben-Testprogrammen der 1950er bis 1970er Jahre dazu. Diese Produkte gerieten in die Atmosphäre und damit als Fall-Out in die Hydrosphäre oder den biologischen Kreislauf. Ebenso sind die langlebigen Zerfallsprodukte von Spaltungsprozessen in Kernreaktoren zu nennen, die bei Reaktorunfällen wie Tschernobyl und Fukushima in Grundwasser und Atmosphäre eindringen. Eine weitere wichtige Komponente für die Entstehung künstlicher Radioaktivität ist die Wiederaufbereitung von Brennstäben aus der Kernindustrie. Bestimmte chemische und physikalische Techniken trennen Plutonium und Uran von den bereits genutzten Brennelementen und bereiten sie gesäubert zur Wiederverwendung auf. Der dabei entstehende radioaktive Abfall muss in Endlagern gespeichert werden, kommt aber oft auch kontrolliert und ab und zu möglicherweise unkontrolliert ins Meerwasser. Die Langzeitspeicherung in Endlagern bleibt ein beständiges Problem, da die Lebensdauer mancher Isotope mehrere Millionen Jahren beträgt. Eine Kontrolle lässt sich über derart lange Zeiträume nicht garantieren, da geologisch gesicherte Bedingungen meist nicht vorliegen. Die Freisetzung von Restaktivität in die geologische Umgebung des Endlagers ist nicht auszuschließen, obwohl verschiedene Kriterien dafür entwickelt worden sind.

Die folgenden Kapitel beschreiben Ursprung, Auswirkung und Ansteigen anthropogener Radioaktivität, gliedert in die Komponenten TENR und künstlich erzeugte Radioaktivität, die zunehmend die Lebensbedingungen in unserer modernen technologischen Gesellschaft beeinflussen.

11.1 Radioaktivität in der Landwirtschaft

Radioaktive Stoffe aus den Uran- und Thorium-Zerfallsketten sowie das langlebige Kalium-Isotop ^{40}K sind natürlicher Bestandteil von Stein, Boden und Ackerland – und finden sich somit im pflanzlichen und tierischen Versorgungskreislauf (vgl. Kapitel 6). Diese natürliche Aktivität hängt jedoch auch von Art und Qualität des Bodenmaterials ab. Insbesondere starke Unterschiede bei Sand und anderen Gesteinsstoffen beeinflussen den Gehalt langlebiger Radioaktivität von den Zerfallsketten. Unterschiedliche Mengen Kalium bedingen die Häufigkeit von ^{40}K im Erdmaterial. Ein typischer Waldboden enthält 38 Prozent Sand und 9,2 Gramm Kalium in einem Kilogramm getrockneten Erdbodenmaterials (g/kg), Ackerboden dagegen nur 9 Prozent Sand, aber 16,4 g/kg Kalium, Weideland 27 Prozent Sand und 11,6 g/kg Kalium. Das ergibt unterschiedliche Werte in der Gesamtaktivität, der Mensch und Tier durch den Boden ausgesetzt sind, aber auch von anderen Umweltfaktoren beeinflusst werden können.

Bodenart	Kalium-40	Thorium-232	Uran-238
	spez. Aktivität (Bq/kg TM)		
Fahlerde	650	50	35
Schwarzerde	400	40	20
Bleicherde	150	10	7
Moorboden	100	7	7

Tab. 11-1: Typische Werte für die spezifische Aktivität in Bq/kg verschiedener Bodenarten, wobei die Erde getrocknet sein muss, um den Gewichtsunterschied zwischen der Trockenmasse (TM) und der zusätzlichen natürlichen Feuchtigkeit der Erde zu korrigieren. Fahlerde ist hauptsächlich Weideland, Schwarzerde ist Lößboden, also fruchtbarer Ackerboden, Bleicherde umfasst silikathaltige Tonerden, Heideboden, Koniferenwaldboden.

Radioaktivität im Bodenmaterial kommt vom Zerfall der natürlichen Radionuklide im ursprünglichen Gestein, das durch die geologische Vorgeschichte der jeweiligen Gegend bestimmt ist. In Magma-Gesteinen ist die Aktivität primordialer Radionuklide gewöhnlich höher als in anderen Gesteinen. Deshalb findet man in Böden mit hohen Anteilen an Verwitterungsprodukten von Magma-Gesteinen auch höhere Werte dieser Nuklide. Weiterhin kann das radioaktive Gleichgewicht in den Böden durch verschiedene Prozesse gestört werden, zum Beispiel durch unterschiedliche Wasserlöslichkeit der Radionuklide. Daher können Wüsten und Regengebiete unterschiedliche Werte aufweisen (Tabelle 11-1).

Bei diesen Radionukliden handelt es sich um natürliche Radioaktivität radiogener Stoffe. Ihr Anteil erhöhte sich merklich, als der Einsatz von Kunstdünger um 1900 das Düngen in der Landwirtschaft revolutionierte.

11.1.1 Radioaktivität im Dünger und die Auswirkungen auf Böden und Gewässer

Schon die Antike kannte Düngemittel zur Verbesserung der Ernteerträge. Bis in die frühe Neuzeit dienten vorwiegend tierische und menschliche Fäkalien in verdünnter Form als natürlicher Dünger. Der deutsche Chemiker Justus von Liebig (1803–1873) zeigte im frühen 19. Jahrhundert, dass das Düngematerial zusätzliche Nährstoffe in den Boden bringt, die zum erfolgreichen Wachstum der Pflanzen von großer Bedeutung sind – vor allem Stickstoff, Phosphate und Kalium. Diese Elemente finden sich, durch den Verdauungsprozess angereichert, in Fäkalien.

Stickstoff ist wichtig für eine große Anzahl biochemischer Prozesse: zum Beispiel bei der Zellvermehrung, der Synthese von pflanzlichen und tierischen Enzymen und Proteinen sowie beim Aufbau von Chlorophyll als wichtigstem Stoff zur pflanzlichen Energieproduktion. Phosphate haben zwar nur einen geringen Anteil an der gesamten Biomasse, aber sie tragen wesentlich zu Aufbau und Struktur pflanzlicher Fasern sowie tierischer und menschlicher Knochen und Zähne bei. Als Bestandteil von Adenosin-Triphosphat (ATP) liefern sie auch einen der wichtigsten Mechanismen bei der Energie-Erzeugung für den Zellstoffwechsel. Die Wirkung von Kalium in Pflanzen ist vielfältig. Es hilft durch Osmose beim Aufbau des Wurzeldrucks und trägt zu Zellstreckung und Blattflächenwachstum bei. Auch begünstigt es die CO_2 -Aufnahme und beeinflusst damit direkt die Fotosyntheseleistung. Pflanzen entnehmen diese Nährstoffe dem Boden; Erosion baut sie ab. Tierische oder auch pflanzliche Abfallprodukte müssen die Nährstoffe ersetzen, um einen natürlichen Kreislauf aufrechtzuerhalten. Das geschieht durch Tod und Zerfall von Biomaterial. Dessen Umverteilung übernehmen Mikroorganismen. Im Ackerbau ersetzt Düngung diese natürlichen Prozesse.

Schon Kelten und Römer begannen, Kalk, kalkhaltiges Gestein oder Mergel neben stickstoff- und phosphorhaltigen Nährstoffen als zusätzliches Düngematerial zu verwenden. Kalk neutralisierte weitgehend saure Moorerde beim Trockenlegen von Feuchtgebieten und wandelte sie in guten Ackerboden. Heutzutage wird dazu vornehmlich Kalkkorn verwendet – eine Mischung aus verschiedenen Komponenten kalkhaltigen Gesteins, die eine optimale Verteilung an Nährstoffen gewährleistet. In der modernen Landwirtschaft werden durchschnittlich drei Tonnen Kalk pro Hektar ausgebracht, in der Regel genug, um die Säureanreicherung von etwa zehn Jahren zu kompensieren. Die dazu optimale Zusammensetzung von Kalk besteht aus ungefähr 75 bis 85 Prozent Kalziumkarbonat (CaCO_3) mit 10 bis 15 Prozent Magnesiumkarbonat und Kaliumsalzen beziehungsweise 5 bis 10 Prozent Kaliumkarbonat (K_2CO_3), allgemein als Pottasche bekannt.

Zu den klassischen, lokal erzeugten natürlichen Düngemitteln gehören Mist und Gülle, beides vorwiegend aus tierischen Abfallstoffen gewonnen⁶. Die wichtigsten Düngemittel sind Stickstoff in Form von Ammonium, Phosphor in Phosphaten und Kalium in Oxid- und verschiedenen Mineralverbindungen. Die chemische Struktur dieser natürlichen Düngestoffe ist vergleichbar; deshalb wollen wir uns auf die Radioaktivität von Gülle beschränken, um die Auswirkung natürlicher Düngemittel zu diskutieren. Gülle setzt sich aus Tierkot und -urin zusammen und ist deswegen flüssig mit hohem Feststoffgehalt, der sich bei zu langer Lagerung absetzt. Deswegen verhindern Misch- und Rührverfahren den Ausfall nährstoffhaltigen Materials.

⁶ Nach Wikipedia tragen derzeit in Deutschland 26,9 Millionen Schweine und 12,7 Millionen Rinder Urin und Kot zur Gülleproduktion bei.



*Abb. 11-1: Oben: Jährliches Ausbringen von Gülle auf Weideland (Foto: picture-alliance / dpa).
Unten: Kalkung eines Ackers in Devonshire in Südwest-England (Foto: Mark Robinson,
<https://commons.wikimedia.org>)*

Tierische Gülle hat einen Trockensubstanz-Gehalt von durchschnittlich 10 Prozent. Die Trockensubstanz enthält bis zu 10 Prozent Ammonium, zirka 8 Prozent Stickstoff in anderer Form und durchschnittlich 4 Prozent Phosphor. Es gibt zwar radioaktive Stickstoff- und Phosphornuklide, die aber so kurzlebig sind, dass sie natürlich nicht auftreten. Dagegen enthält das in der Gülle ebenfalls vorkommende Kalium das langlebige Isotop Kalium-40 (^{40}K). Kalium kommt zumeist als Pottasche vor; die durchschnittliche Menge in einem Kubikmeter Gülle beträgt 4 kg. Das entspricht $1,8 \cdot 10^{25}$ Kalium-Atomen, von denen 0,012 Prozent radioaktive ^{40}K -Isotope sind (entsprechend $2,1 \cdot 10^{21}$ an ^{40}K Isotopen). Mit einer Halbwertszeit von $1,25 \cdot 10^9$ Jahren wäre das eine Gesamtaktivität von 37 kBq. Dabei handelt es sich um relativ unschädliche β -Strahlung,

aber 10 Prozent dieser Isotope produzieren γ -Strahlung von 1,46 MeV Energie. Das heißt, dass die γ -Aktivität eines Kubikmeters Gülle ungefähr 4 kBq ausmacht. Im Vergleich dazu liegt die menschliche Eigenaktivität der 1,46-MeV- γ -Strahlung aus ^{40}K bei nur 40 Bq. Ein Fass Gülle mit dem Volumen eines Kubikmeters strahlt hundertmal stärker als ein einzelner Mensch. Man kann diese Rechenspielchen noch weiter treiben: Gemäß Wikipedia verteilen die Bauern jährlich mehr als 200 Millionen Tonnen Gülle über deutsche Äcker und Wiesen, das entspricht 800 Milliarden Becquerel (800 GBq oder 0,8 TBq) oder 21,6 Curie zusätzlicher γ -Strahlung. Das sind gehörige Mengen, aber im Güllefass wird die γ -Strahlung überwiegend intern in der Gülle absorbiert; nur ein Bruchteil gelangt nach außen. Anders gesagt: Die aktuelle Strahlungsintensität ist vergleichbar mit der der Bäuerin. Die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland misst nach aktuellsten Statistiken der Bundesregierung ungefähr 16,7 Millionen ha, also 167 Milliarden m^2 . Wird diese Fläche gleichmäßig gegüllt, entspricht das einer zusätzlichen Gamma-Aktivität von 5 kBq/m^2 pro Jahr. Bei einer natürlichen Aktivität von durchschnittlich 500 Bq/kg in landwirtschaftlich nutzbarem Bodenmaterial⁷ (Tabelle 11-1) enthält die oberste Schicht bei einer Sickertiefe von 20 bis 50 cm eine natürliche Gamma-Aktivität von 20 bis 50 kBq/m^2 ; die jährliche Düngung addiert also 10 bis 25 Prozent zur natürlichen Aktivität. Dies entspricht großemäßig dem pflanzlichen Transferfaktor (Abbildung 7-2). Die zusätzliche Aktivität geht vorwiegend als Nährstoff in die pflanzlichen Anbauprodukte und damit in den menschlichen und tierischen Nahrungskreislauf. Die ^{40}K -bedingte Radioaktivität des Bodens bleibt konstant, soweit sich der Kaliumgehalt des Bodens nicht durch geo- oder hydrochemische Prozesse verändert.

Zusätzliche Düngeprozesse wie Kalkung führen dem Boden ebenfalls, neben Kalziumkarbonat, Kalium zu. Im Durchschnitt werden 3 Tonnen Kalk auf einen Hektar ausgebracht, um zu düngen und Bodensäuerung zu verhindern. 3 Tonnen Kalk enthalten zwischen 150 und 300 kg Kalium, was im Mittelwert ungefähr einer ^{40}K - γ -Aktivität von 60 MBq entspricht. Das belastet den Boden mit 6 kBq/m^2 – vergleichbar den oben abgeschätzten Werten, die bei einer Gülledüngung erreicht werden.

Die Nutzung von Guano in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts⁸ revolutionierte das Düngen. Guano ist ein phosphat- und nitratreiches Gemisch, das sich über chemische Verwitte-

⁷ Dies entspricht ungefähr einer Volumenaktivität von 1 MBq/m^3 , wenn man eine durchschnittliche Bodendichte von 2 g/cm^3 ansetzt.

⁸ Die Zeitschrift *Die Gartenlaube* veröffentlichte 1863 einen Bericht, in dem es hieß: *Hätte einer unseren biederen ackerbautreibenden Altvordern gesagt. „Es wird eine Zeit kommen, wo der Bauer den besten Mist vom entgegengesetzten Ende der Erde, viele, viele hundert Meilen über weite Meere her beziehen wird“ – sie hätten ihn ausgelacht und die Richtigkeit in seinem Oberstübchen in Zweifel gezogen. Und doch ist diese Zeit gekommen, kein einsichtsvoller Landwirth lacht mehr über die Zumuthung, seine Felder mit antipodischem Dünger zu durchsetzen; der nimmer rastende menschliche Unternehmungsgeist hat das*

rungsprozesse und der damit einhergehenden Wechselwirkung bildet, wenn harnsäurehaltige und ammoniakreiche Vogelexkrementen auf dem Kalkstein der Inseln vor der südamerikanischen Pazifikküste und der Küstenregion landen. Guano enthält je nach Herkommen Anteile von 10 bis 40 Prozent Phosphorpentoxid (P_2O_5) und 30 bis 50 Prozent Kalziumoxid oder Ätzkalk (CaO). Daneben besteht Guano typischerweise aus 7 bis 10 Prozent Kaliumnitrat oder Kalisalpeter (KNO_3) sowie Pottasche (K_2CO_3). Die beiden letzteren Verbindungen beinhalten die ^{40}K -Eigenaktivität.

Guano war eines der ersten global verbreiteten Produkte aus Südamerika und bescherte der Region an der Pazifikküste erheblichen Wohlstand. Die Guanoschichten hatten sich über Jahrtausende gebildet, waren mehrere Meter dick und bedeckten die Oberfläche ganzer Küstenstriche. Sogenannte Guano-Lords organisierten den Abbau vor Ort; den Transport übernahmen international zumeist Segelschiffe⁹ bis ins 20. Jahrhundert, denn bei diesem Produkt kam es nicht auf Zeit an¹⁰. Zwischen 1840 und 1880 wurden aus Peru allein 12,7 Millionen Tonnen Guano verschifft. 1865 machte Guano 1,0 Prozent des Importwerts Großbritanniens, 0,6 Prozent des französischen, 1,5 Prozent des belgischen und 1,9 Prozent des Werts der über Hamburg importierten Güter aus.

Der zwischen 1840 und 1880 aus Peru verschiffte Guano enthielt rund 300 000 Tonnen Pottasche, die die ausgemergelten Ackerböden mit frischen Nährstoffen versorgte. Damit gelangte eine γ -Gesamtaktivität von 270 GBq nach Europa.

Der Guanohandel marginalisierte sich mit dem Haber-Bosch-Verfahren zur Erzeugung von Düngemitteln. Entwickelt hatten es die deutschen Chemiker Fritz Haber (1868–1934) und Carl Bosch (1874–1940). Zwar kann man auch heute noch Guano als hochwertigen organischen Düngemittel kaufen, aber die Zeit der Großtransporte ist vorbei. Die typischen Packungsmengen liegen gegenwärtig zwischen 1 bis 3 kg, mit einem Pottaschegehalt je nach Anwendung zwischen 5 und 15 Prozent. Die γ -Eigenaktivität für eine Ein-Kilo-Packung mit hochwertigem, organischem Guano beträgt damit 900 Bq.

ehemals Unmögliche und Lächerliche möglich und vernünftig gemacht, tagtäglich sind viele mit Dünger schwerbelastete Schiffe auf hoher See, während der europäische Landmann mit kluger Berechnung den Mehrbetrag erwägt, den ihm das kostbare Düngemittel bei der nächsten Ernte verschaffen soll.

⁹ Die Flying-P-Liner der Hamburger Reederei F. Laeisz brachten Guano und Nitrat nach Deutschland – Großsegelschiffe, deren Namen mit P begannen. Das letzte seiner Art, die *Passat*, liegt als Museumschiff in Travemünde vor Anker. Die frühere *Padua* dient der russischen Marine unter dem Namen *Kruzenshtern* als Segelschulschiff.

¹⁰ Die Geschichte des Guanohandels und seiner Auswirkungen auf die ökonomischen und ökologischen Bedingungen der südamerikanischen Pazifikküste ist ausführlich dargestellt in: Gregory T. Cushman: *Guano and the Opening of the Pacific World*. New York 2013.

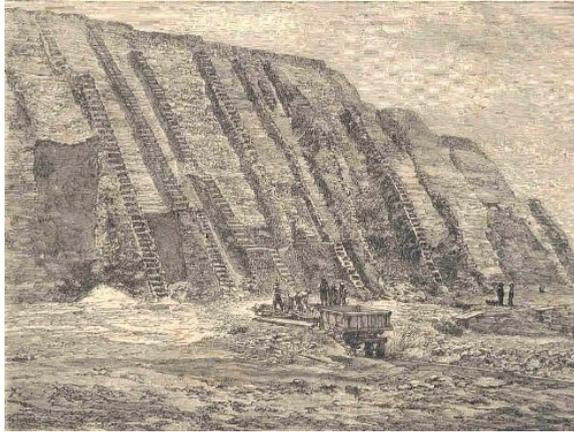


Abb. 11-2: Zeitgenössische Darstellungen zum Guano-Abbau. Oben: auf den Chincha Inseln vor der Küste von Peru (Holzstich, 1873). Die Lagerstätten wurden über lange Leitern erreicht, Guano mit Pickhacke und Schaufel losgeklopft, in Säcke gefüllt und zur Verladungsstelle transportiert. Unten: Verschiffung von Guano zum Transport nach Europa. Viele Segelschiffe, zumeist aus Europa, lagen auf Reede und warteten auf ihre Beladung mit Guanosäcken (Holzstich, 1863).

Künstlicher Dünger enthält überwiegend Nitrate, die nach dem Haber-Bosch-Verfahren aus dem Stickstoffgehalt der Luft gewonnen werden. Kunstdünger braucht jedoch auch Phosphate,

um den pflanzlichen Nährwert des Bodens zu erhöhen. Diese Phosphate werden als sogenannte Mineralphosphate durch Bergbau gewonnen und chemisch in verwertbares phosphatreiches Düngematerial umgewandelt – in Mineraldünger. Mit seinen verschiedenen Komponenten hat er den enormen Produktivitätsanstieg in der Landwirtschaft des 20. Jahrhunderts ermöglicht.



Abb. 11-3: Oben: manueller Phosphat-Abbau durch Sklaven in Florida (www.floridamemory.com/items/show/160755). Unten: industrieller Abbau von Phosphatlagern in Togo. (wikipedia.org).

Die Phosphor-Atome in Phosphaten sind nicht radioaktiv; es gibt nur ein stabiles Phosphor-Isotop ^{31}P mit 15 Protonen und 16 Neutronen. Die benachbarten Phosphor-Isotope in der Nuklidkarte – ^{30}P , ^{32}P und ^{33}P – sind radioaktiv und unterliegen dem niederenergetischen β -Zerfall. Das Phosphor-Isotop ^{33}P hat mit 25,3 Tagen davon die längste Halbwertszeit; die von ^{32}P ist mit 14,3 Tage nur unerheblich kürzer. Diese radioaktiven Phosphorisotope werden in der Nuklear-

medizin künstlich hergestellt und sowohl zu therapeutischen als auch diagnostischen Zwecken verwendet. Diese beiden Phosphor-Isotope gelten für den medizinischen Gebrauch als langlebig und kommen zunehmend in der Genforschung zur radioaktiven Markierung von DNA- und RNA-Molekülen zum Einsatz. ^{30}P dagegen ist mit einer Halbwertszeit von 2,5 Minuten sehr kurzlebig und deshalb für unsere Betrachtungen zu vernachlässigen.

Die Mehrzahl der bekannten Phosphatlager ist durch Ablagerung phosphathaltiger organischer Substrate in prähistorischen Ozeanen entstanden und findet sich in Verbindung mit Kalkablagerungen ähnlichen biologischen Ursprungs. Diese Ablagerungen haben sich über die letzten zwei Milliarden Jahre der Erdgeschichte gebildet, vor allem in den verschiedenen Perioden der Massensterben, hervorgerufen durch kataklysmische Ereignisse wie eine Kollision der Erde mit Asteroiden, intensive Vulkanaktivität oder durch die Explosion einer vergleichsweise nahen Supernova. Chemische Reaktionen mit kalkhaltigen Stoffen haben die organische Struktur der Phosphate aufgebrochen und die Ablagerungen versteinert. Große Lager an Phosphaterzen findet man in Nordafrika, in verschiedenen Staaten Nordamerikas, insbesondere auf der Florida-Halbinsel sowie auf den Koralleninseln des Indischen und Pazifischen Ozeans. Dank der Phosphatvorkommen stammen 20 Prozent der Phosphate im Kunstdünger aus den USA, davon 90 Prozent allein aus Florida, 35 Prozent aus Nordafrika von Marokko bis Ägypten, 31 Prozent aus Südasiens, und der Rest aus kleineren Lagerstätten im nördlichen Asien, Ozeanien und Südamerika. Deutschland und die anderen westeuropäischen Länder sind deswegen auf die Einfuhr von Phosphaten angewiesen. (Vgl. Abbildung 11-3)

Jedoch sind frisch geförderte Phosphaterze nicht rein. Sie enthalten Schwermetalle wie Cadmium und Uran. Da mineralischer Phosphatdünger zu 87 Prozent aus Rohphosphaten hergestellt wird, gelangen diese Schwermetalle über den normalen Aufnahmeprozess der Pflanzen auch in den menschlichen Nahrungskreislauf. Die Häufigkeit variiert und hängt vom geologischen Ursprung des phosphathaltigen Gesteins, seiner chemischen Aufbereitung und Umwandlung in Düngematerial ab. Dafür werden den Phosphaterzen Schwefelsäure (H_2SO_4) oder Salpetersäure (HNO_3) zugesetzt und die sich daraus bildenden Phosphatsalze durch verschiedene Trennungsmethoden extrahiert. Die vorliegenden Schwermetalle lagern sich chemisch direkt an den entstehenden Phosphatmolekülen an. Das bettet sie fest in die chemische Struktur ein. Die Werte variieren zwischen 1 und 400 mg Uran in 1 kg phosphathaltigem Kunstdünger, also zwischen 1 und 400 Promille (ppm) je nach Herkunft und Aufbereitungsverfahren¹¹. Im Vergleich dazu liegt der Urananteil bei Gülle bei 0,15 bis 1,5 mg/kg (1 ppm).

¹¹ Claudia Dienemann, Jens Utermann: Uran im Boden und Wasser. Bericht des Umweltbundesamt 2012 (<http://www.uba.de/uba-info-medien/4336.htm>)

Typ	P-Konzentration [% P] Bereich	U-Gehalt [mg/kg P] Bereich	U-Eintrag [g/ha-a] Bereich	U-Eintrag [g/ha-a] Mittelwert
TSP (Triple-Superphosphat Dünger)	16,6 – 20,6	52,3 – 362	5,6 – 48	22
NP (Stickstoff-Phosphat-Dünger)	5,3 – 25,8	0,62 – 198	0,05 - 82	7,0
PK (Phosphat-Kalium-Dünger)	5,8 – 13,4	31,2 – 163	5,1 – 61	23
NPK (Stickstoff-Phosphat-Kalium-Dünger)	1,5 – 13,5	0,04 - 113	0,01 – 166	8,0
Rindergülle	0,43 – 2,1	0,15 – 1,4	0,16 - 7	2,9
Klärschlamm	2,1 - 2,2	0,0005 – 18,5	0,001 - 19	3,2

Tab. 11-2: Urangelgehalt im phosphathaltigen Kunstdünger sowie im organischen Naturdünger (nach: Claudia Dienemann, Jens Utermann: Bericht des Umweltbundesamt; Uran im Boden und Wasser, 2012 (<http://www.uba.de/uba-info-medien/4336.htm>))

Durchschnittlich befinden sich ungefähr 20 bis 50 mg Uran/kg im Phosphat der Mineraldüngemittel¹². Das entspricht einer Aktivität von 2,5 bis 6,3 MBq/kg Phosphat. Die Urangelgehalte in Böden schwanken naturbedingt zwischen Werten von 1 mg/kg und zirka 5 mg/kg Boden, also weniger als 10 Prozent der Phosphatwerte. Strenge gesetzliche Vorschriften, die eine Begrenzung festlegen, gibt es nicht. Das erforderte eine erhebliche Erweiterung der chemischen Reinigungsverfahren, die natürlich die Herstellungskosten des Düngers erhöhen würde. Vom Umweltbundesamt wird ein wesentlich geringerer Urangelgehalt von 50 mg Uran/kg Phosphat im Düngemittel empfohlen; eine Kennzeichnungspflicht besteht ab 20 mg Uran/kg Phosphat.

¹² Eine direkte Untersuchung spezifischer Gartendüngersorten 2012 durch das Münchner Umweltinstitut ergibt jedoch zum Teil erheblich höhere Werte von bis zu 380 mg Uran per kg Phosphat. Dieser Wert setzt sich natürlich in eine entsprechend mehr als zehnmals höhere Aktivität um. (<http://www.umweltinstitut.org/themen/radioaktivitaet/messungen/uranmessungen-duenger-und-spielmittel.html>)

11.1.2 Der Dünger-Kreislauf

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat der Umfang der landwirtschaftlichen Düngung kontinuierlich zugenommen. Weltweit werden heute jährlich insgesamt zirka 160 Millionen Tonnen Düngemittel verbraucht. Während in den westlichen Industrieländern seit den 1990er Jahren der Verbrauch auf 50 Millionen Tonnen sank, stieg er in den Entwicklungsländern stetig an und lag seit der Jahrhundertwende bei mehr als 110 Millionen Tonnen. Nach Angaben der International Fertilizer Industry Association (IFA)¹³ verbraucht die Landwirtschaft in Deutschland 1,6 Prozent des Weltbestands an Düngemitteln. Das heißt, dass jährlich ungefähr 2,6 Millionen Tonnen ausgebracht werden. Damit kommen zwischen 50 und 150 Tonnen Uran pro Jahr in den landwirtschaftlich genutzten Boden. Laut Bundesforschungsamt für Landwirtschaft beträgt der Uraneintrag bei ausschließlicher Verwendung von Mineraldünger mittlerweile 10 bis 20 g Uran pro Hektar im Jahr, im Mittel also ein jährliches Wachstum von 15,5 g Uran oder 200 kBq Aktivität pro Hektar (19 Bq/m²). Durch den künstlichen Düngerzusatz gelangen stetig mehr Uran und andere toxische Schwermetalle in die Umwelt. Beim Vergleich von Uran-Gehalten in Böden aus zirka 1000 Standorten in Deutschland stellte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe eine tendenzielle Uran-Anreicherung in landwirtschaftlich genutzten Gebieten gegenüber Oberböden in Forstgebieten von durchschnittlich 0,15 mg/kg fest¹⁴. ⁴⁰K und ²³⁸U im Dünger wirken sich etwas unterschiedlich aus: Beide Nuklide werden von den Pflanzen durch Nahrungsaufnahme über das Wurzelwerk aufgenommen. Dies hängt von den verschiedenen Transferfaktoren ab, die wiederum für jede Pflanzenart verschieden ist (vgl Kapitel 7). Bei Kalium liegt die Aufnahme bei 80 bis 100 Prozent, bei Uran ist der Wert mit 0,01 bis 1 Prozent wesentlich geringer. Das beeinflusst die Anreicherung im menschlichen Körper jedoch nur geringfügig. Physiologische Steuerprozesse halten die Gesamtmenge an Kalium im Körper konstant. Je mehr Kalium durch Nahrung oder Getränke in den Körper gelangt, desto mehr wird auch wieder mit den Exkrementen ausgeschieden.

Anders ist das bei Uran und sonstigen Aktiniden sowie deren Zerfallsprodukten, die sich im menschlichen Körper anlagern können. Bei normaler Bodenbelastung gelangen im Durchschnitt über die Nahrungsaufnahme täglich 1 bis 5 µg Uran in den Körper. Dies entspricht einer Aktivität von 20 bis 100 MBq. Ein Anstieg konnte aber bislang nicht eindeutig nachgewiesen werden. Dies liegt an den erheblichen groß- und kleinräumigen Schwankungen von Uran in den jeweiligen Bodenarten, die durch chemische und mineralogische Zersetzungs- und Diffusions-

¹³ <http://www.fertilizer.org/>

¹⁴ J. Utermann, W. H. M. Duijnsveld, L. Godbersen, M. Fuchs: Uran in Böden und Sickerwässern – gibt es Indizien für eine Phosphordüngerbürtige Uran-Anreicherung? Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2009.

prozesse bedingt sind. Die relativ geringe Aufnahme von Uran und anderen Aktiniden durch Pflanzen reduziert auch die Gefahr, dass diese Stoffe in großem Maß dem Boden entzogen werden und in den Nahrungskreislauf gelangen.



Abb. 11-4: Entwässerungsgräben und Rieselfelder, über die uranhaltige Phosphatstoffe durch Versickerungs- und Ausfallprozesse ins Grundwasser gelangen können.

Bedenkenswert ist jedoch der hydrologische Kreislauf, über den die leicht löslichen, uranhaltigen Phosphatstoffe ins Grundwasser und damit in den tierischen und menschlichen Nahrungskreislauf gelangen können. Dieser Prozess läuft entweder über Erosion oder Auswaschung ab. 90 Prozent des Urans verbleiben im Boden, abhängig von der Bindung des Urans an Tonminerale oder organische Substanzen. Häufiges Düngen bewirkt die allmähliche Zunahme von Uran und seiner Zerfallsprodukte. Die restlichen 10 Prozent des gelösten Urans diffundieren in die Tiefe und können ins Grundwasser geraten. In diesem Fall besteht die Möglichkeit eines langsa-

men Anwachsens der Trinkwasserbelastung durch Uran, vor allem dann, wenn das Trinkwasser nahe der Oberfläche gewonnen wird.

Der Zusammenhang zwischen Phosphatdüngung und erhöhten Urangelhalten in Oberflächenwässern wurde schon in den 1980er Jahren festgestellt. Untersuchungen von Entwässerungsgräben neben frisch gedüngtem Neuland machten das besonders deutlich. Überdüngung belastet die landwirtschaftlichen Abwässer- und Entsorgungssysteme stark mit Nitrat- und Phosphatstoffen. Dazu kommen noch kalium- und uranhaltige Substanzen. Die schweren Uranverbindungen sinken relativ schnell in den schlammigen Untergrund der Gräben und Rieselfelder ab und dringen in die oberen Bodenschichten ein. Derzeit wird untersucht, wie lange es dauert, bis diese massiven und relativ großflächigen Substanzen grundwasserhaltige Schichten erreichen. Das hängt direkt von der Art des Bodenmaterials ab, dessen physikalische oder chemische Bindungsfähigkeit die Diffusionsgeschwindigkeit des Uranmaterials bestimmt.

Das Umweltinstitut München warnt jedoch: *Mittlerweile werden eine Million Menschen in Deutschland mit Wasser versorgt, das mehr als die erlaubten 10 µg Uran pro Liter enthält. Die heute gemessenen Uranwerte sind nur die Spitze eines Eisberges, denn das durch die langjährige intensive Phosphatdüngung eingebrachte Uran kommt erst verzögert in den nächsten Jahrzehnten im Grundwasser an.* Inwieweit diese Angaben zutreffen, muss erst durch weitergehende und langfristige Untersuchungen der Landwirtschafts- und Wasserbauämter festgestellt werden

Die bisherigen Ergebnisse jedenfalls erlauben wegen lokal unterschiedlicher Urangelhalte in Böden und Gewässern keine eindeutige Zunahme der Uran-Konzentration in Gewässern durch Phosphatdüngung zu erfassen (Abbildung 7-3). Dies bedeutet jedoch auch, dass es sich trotz intensiver Ausbringung von Kunstdünger über die letzten 5 Jahrzehnte um schwer zu messende Kleinstmengen handelt, deren Anstieg von der natürlich vorliegenden Uranmenge innerhalb der Messgenauigkeiten nur extrem schlecht zu verfolgen ist. Um besser quantifizieren zu können, sind nicht nur erheblich mehr Messzeiten und Messorte erforderlich, sondern auch verlässlichere Modelle zur Simulation von Mechanismen des Urantransports in Bodenmaterial und Gewässern. Genauere Untersuchungen von Boden, Wasser, Gesundheitsbedingungen und Auswirkungen von natürlich lokal stark erhöhter Radioaktivität in Orten wie Ramsar im Iran und den Stränden der brasilianischen Küste können wesentliche Informationen beitragen.

Weiterführende Literatur

Gregory T. Cushman: *Guano and the Opening of the Pacific World*. Cambridge University Press, Cambridge, 2013.

Merrill Eisenbud, Thomas Gesell: *Environmental Radioactivity*. Academic Press, San Diego – London, 1997.

Albert Gockel: *Die Radioaktivität von Boden und Quellen*. Nachdruck von 1914, Springer Fachmedien.

Yu A. Izrael: *Radioactive Fallout after Nuclear Explosions and Accidents*. Elsevier, Amsterdam 2002.

Michael Pöschl, Leo M. L. Nollet, (Hrsg): *Radionuclide Concentrations in Food and the Environment*. Taylor & Francis. Boca Raton, Fl, 2007.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Volume I: Sources. Report to the General Assembly, Scientific Annex C, Exposures from man-made sources of radiation. UNSCEAR 2000 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York 2000.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Volume I: Sources. Report to the General Assembly, Scientific. United Nations, New York 2010.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Volume II: Effects. Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York 2011.

UNSCEAR. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. UNSCEAR 2013 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2014 Report to the General Assembly, Scientific Annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. United Nations, New York, 2014.

11.2 Angereicherte Radioaktivität in Baustoffen

Wohnhäuser werden heutzutage vorwiegend aus Stein, Stahl und Beton gebaut; Holz und Lehm waren und sind ebenfalls noch weltweit verbreitete Baustoffe. Das Material dazu liefern Steinbrüche, Ablagerungen eiszeitlicher Flüsse und Gletscher, Eisenbergwerke und Wälder – allesamt natürliche Bezugsquellen. Diese Rohstoffe enthalten sämtlich einen gewissen Anteil radioaktiver Elemente, deren Strahlung sich eigenaktiv aus der Menge radioaktiver Isotope und ihrer Komposition bestimmt. Die radioaktiven Isotope sind zumeist gleichmäßig im Baumaterial verteilt. Das heißt, dass ein Großteil ihrer Strahlung im Material selbst absorbiert wird. Nur die in Oberflächennähe produzierte Strahlung dringt in die Atmosphäre. Dies gilt insbesondere für α - und β -Strahlung. Ihre Reichweite ist sehr gering; die Strahlung wird schnell absorbiert. Hochenergetische γ -Strahlung hat dagegen eine größere Reichweite, aber außer der γ -Strahlung bei 1,46 MeV von ^{40}K und der sogenannten Radium-Thorium- γ -Strahlung bei 2,615 MeV aus der Thorium Zerfallskette ist sie zumeist vernachlässigbar. Wesentliche Strahlungskomponenten stammen aus den natürlichen Zerfallsreihen von ^{238}U mit dem längerlebigen Tochterelement ^{226}Ra sowie der Zerfallsreihe von ^{232}Th . Zu den wichtigsten Radioaktivitätskomponenten in den verschiedenen, weltweit verwendeten Baustoffen vgl. Tabelle 11-3.

Der wichtigste Strahlungsanteil dieser ^{238}U - und ^{232}Th -Zerfallsreihen kommt vom Edelgas Radon und seinen langlebigen Isotopen ^{222}Rn und ^{220}Rn . Radon ist als Edelgas chemisch nicht aktiv. Es bindet sich nicht chemisch und kann leicht aus dem Gebäudematerial in die Atemluft gelangen. Die Wahrscheinlichkeit dafür hängt von der Menge der Aktiniden im Material ab,

aber auch von der Dichte und Zusammensetzung des Materials, das die Diffusionsbedingungen für die schweren Radon-Atome bestimmt.

Radioaktivität in ausgewählten Baumaterialien					
Messort	Material	⁴⁰ K	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th
Taiwan (1974)	Holz	90	-	-	-
	Ziegel	16	1,2	-	1,8
	Beton	7	0,9	-	-
Grossbritannien (1971)	Lehm-Ziegel	18	3	1,4	1,2
	Glas-Ziegel	10	0,2	0,2	0,1
	Granit	30	6	2,4	2,2
	Leichtbeton	19	0,4	2,4	0,4
	Gips	4	0,4	0,6	0,2
	Zementblock (Flugasche)	(6-16)	(1-12)	(0,2-4)	(1,0-1,2)
Vereinigte Staaten (1966)	Zement	3,4	1,1	-	0,4
	Silikate, Sand	9	0,3	-	0,5
	Kommerzieller Sand	7	0,3	-	0,3
Sowjetunion (1974)	Ziegel	18	-	1,5	1,0
	Glas-Ziegel	6	-	0,5	0,4
	Leichtbeto	14	-	2,0	0,9
	Granite	40	-	3,0	4,5
	Sand	7	-	(<0,4-1)	<0,4
	Zement	4	-	0,7	<0,4
W. Deutschland (1974)	Granit	34	-	2,8	2,1
	Ziegel	18	-	1,7	1,8
	Sand, Kies	<7	-	<0,4	<0,5
	Zement	6	-	0,7	<0,6
	Gips	<2	-	<0,5	<0,3
	Beton	7	-	0,6	0,6

Tab. 11-3: Typische Radioaktivitätswerte der wichtigsten Baustoffe aus verschiedenen Industrieländern der Welt (in pCi/g). (entnommen aus: John H. Harley: Radioactivity in Building Materials, In Radioactivity in Consumer Products, US-NRC Report NUREG/CP-0001 (1978), S. 335)

11.2.1 Radongase in Gebäuden

Radon ist unsichtbar und geruchsfrei. Neben Technetium gehört es zu den wenigen Elementen, die kein stabiles Isotop besitzen. Alle 39 bekannten Radon-Isotope sind radioaktiv; sie zerfallen in unterschiedlichen Prozessen mit unterschiedlichen Halbwertszeiten. Die Halbwertszeiten variieren zwischen $0,27 \mu\text{s}$ (Mikrosekunden) für das extrem kurzlebige ^{214}Rn und $3,82 \text{ d}$ (Tage) für das langlebigste ^{222}Rn . Die meisten der Radon-Isotope können nur künstlich hergestellt werden und kommen in der Natur nicht vor. Die Radon-Isotope aus den Zerfallsketten sind deswegen als einzige für unsere Diskussion von Interesse. Als integraler Bestandteil von Erd- und Baumaterialien tragen sie zur Gesamtstrahlungsbelastung des Menschen bei.

Dazu gehören die vier Isotope ^{218}Rn , ^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn , die in Spuren als Zerfallsprodukte von ^{218}At , ^{223}Ra , ^{224}Ra und ^{226}Ra als Teil der Aktiniden-Zerfallsketten vorkommen. Dabei entsteht ^{218}Rn und ^{222}Rn innerhalb der Zerfallskette von ^{238}U , wobei ^{218}Rn mit einer Halbwertszeit von 35 ms (Millisekunden) sofort zerfällt und vernachlässigt werden kann.

Das Isotop ^{219}Rn erscheint als Produkt in der Kette von ^{235}U . In der klassischen Literatur wird es oft auch als Actinon bezeichnet¹⁵ und zerfällt durch α -Emission mit einer Halbwertszeit von $3,9 \text{ s}$ zu ^{215}Po . Bei Raumtemperatur reicht seine Lebensdauer aus, um in der Raumatmosphäre in Spurenmengen aufzutreten. Die Häufigkeit bestimmt die Menge des mit 11 Tagen relativ langlebigen Radium-Mutter-Isotops ^{223}Ra in den Wänden und Böden. Wegen der kurzen Lebensdauer von ^{219}Rn ist dessen Häufigkeit $250\,000$ -mal kleiner als die von ^{223}Ra .

Das mit 55 s längerlebige Isotop ^{220}Rn wird als Zerfallsprodukt von ^{224}Ra in der ^{232}Th -Zerfallsreihe über α -Emission zu ^{216}Po freigesetzt. In der Literatur wird es oft als Thoron bezeichnet, da es der Thorium-Zerfallskette zugeordnet werden konnte. Die Häufigkeit des Mutter-Isotops ^{224}Ra sowie die jeweiligen Lebensdauern bestimmen die Menge des ^{220}Rn in der Atmosphäre. Abschätzungsweise kann man sagen, dass die Häufigkeit von ^{220}Rn ungefähr 6000 -mal kleiner ist als die des ^{224}Ra -Isotops. Das sind nur einfache Abschätzungen aus dem Zerfallsgesetz, die auf die Wahrscheinlichkeit der Diffusion von Radon aus Wand und Boden in die Raumluft hin korrigiert werden müssen. Da nur ein kleiner Teil der produzierten Radon-Isotope in die Raumluft diffundiert, werden sich diese grob abgeschätzten Werte erheblich verringern.

Radon entsteht also auf natürliche Weise in allen Boden- und Gebäudematerialien, solange sich darin Spurenelemente von Uran und Thorium befinden – und damit auch von Radium. Dies ist bei den meisten Gesteinsmaterialien der Fall, insbesondere bei Granit, der, wie schon erwähnt, einen besonders hohen Urangehalt aufweist. Jeder Quadratkilometer Erd- und Gesteinsmaterial mit einer Tiefe von 15 cm enthält im Durchschnitt ungefähr 1 g Radium, das durch seinen Zerfall radioaktives Radongas in die Atmosphäre entlässt. Global entweichen dem

¹⁵ Als Gasprodukt von Aktinium.