

Strahlentelex

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

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

www.kirchengemeinde-ronneburg.de



Ausgabe 02/2026

Preis 2,40 €

Nr. 20

15.06.2026

Uranbergbau-
sanierung
**Phyto-
sanierung im
Uranbergbau**
Seite 4-8

Strahlenschäden
**DNA-Folgen für Nach-
kommen strahlenbelasteter
Eltern - Teil 2** Seite 8-11
Uranaltlasten
**Krebsinzidenz durch ra-
dioaktive Deponie** Seite 13/14

Energieoptionen
**Geothermie mittels
Fracking** Seite 15/16
Uranbergbau-Altlasten
**Radioaktivität durch
Altlasten im urbanen
Bereich** Seite 17/18

Atomkraft
**Mehr Krebs in der
Nähe von Atom-
kraftwerken in den
USA** Seite 20

Pflanzliche Sanierung von Uranhalden



Segmentierte Versuchsfelder (oben Erlen- und Weidenbewuchs)

Quelle: Kirchlicher Umweltkreis Ronneburg 11/25



Das obere Foto zeigt die innerhalb eines Jahres nachgewachsenen Gehölze auf den Versuchsfeldern der Ronneburger „Gessenwiese“, die Aufstandsfläche der früheren Uran-Laugungshalde „Gessen“. Seit über 20 Jahren forschen Wissenschaftler der FSU Jena auf dem Gebiet der Phytosanierung speziell am Standort einer der radiologisch und toxisch am höchst belasteten Haldenaufstandsfläche der gesamten Uranbergbausanierung der Wismut GmbH. Insbesondere auch, um Bergbaufolgeflächen eine gesellschaftlich nutzbringendere Perspektive zu geben, als es bisherige private Jagdreviere, private Photovoltaik-Areale oder privatisierte Immobilienspekulationen mehr oder weniger verantwortungsethisch zweifelhaft sind. Schließlich handelt es sich um durch den Bergbau vernichtete Kulturlächen früherer Gemeinden. Eine Ergebniszusammenfassung zum Forschungsstand auf Seite 3-7.

aktuell Radiowellen können Geruchssinn verstärken

Der *Bulbus olfactorius (BO)* ist die erste Umschaltstation der Riechbahn im Gehirn. Er ist ein vorgestülpter Teil des Gehirns, der direkt unterhalb des Frontalhirns liegt und der Geruchswahrnehmung dient. Geruchssinnverluste (durch Altern, Trauma oder neurologische Störungen) können i.d.R. bei Schädigungen des BO nicht aktiv geheilt werden. Ein neuer Behandlungsansatz besteht darin, die Signalübertragung an dieser Stelle zu verstärken. Ein Team der Hanyang Universität in Seoul hat es versucht: Mit einer 5 x 5 cm großen Antenne, bestehend aus einer rechteckigen Metallfläche auf einer Leiterplatte, deren Längsseite einer halben Wellenlänge entspricht (Patchantenne). 10 cm vor der Stirn von Probanden platziert, gab sie Radiosignale in der Frequenz von 2,45 GHz ab, die den Schädelknochen durchdringen. In einer ersten Studie wurde das Gerät an 28 gesunden Personen (nichtrauchende koreanische Probanden, 21 Männer und 7 Frauen, Altersgruppe: 22–37 Jahre; Durchschnittsalter: 26,32 Jahre) getestet, die ein noch vollständig erhaltenes Riechvermögen hatten. „*In einem verschlossenen Raum bei Raumtemperatur wurde ein Teilnehmer mit normaler Körpertemperatur mit einem Kopfgurt an einer Antenne ausgestattet und für 5 Minuten einer HF-Stimulation mit einer Leistung von 15 W ausgesetzt.*“ Nach der „Bestrahlung“ verbesserte sich der Geruchssinn erstaunlicherweise von 9,73 Punkten in Abhängigkeit von der Stärke der Radiowellen nach einer Minute auf bis zu 12,30 Punkte und nach 5 Minuten auf bis zu 15,88 Punkte. „*Mehrere auf der Stirn befestigte Elektroden registrierten eine Zunahme der EEG-Signale. Sie zeigen an, dass die Radiowellen tatsächlich Auswirkungen auf die Weiterleitung der Nervensignale im Bereich des Bulbus olfactorius hatten. ... Die Wirkung der kurzen Behandlung hielt über eine Woche an und schwächte sich dann allmählich ab, bis nach 10 und 14 Tagen der ursprüngliche „Odor threshold Score“ wieder erreicht wurde.*“ Offen ist die Frage, ob die Methode auch bei Personen mit Geruchssinnverlust anspricht. Die Wirkmechanismen einer solchen Elektrotherapie sind unbekannt, zeigen aber, dass elektromagnetische Felder mehr verursachen als „Hautwärmungen“.

[Zitate] Forschungsartikel von Junsoo Bok u.a.. „Kontaktlose Radiofrequenzstimulation des Olfaktoriusnervs bei menschlichen Probanden“ in AIP Publishing Band 9, Ausgabe 3, September 2025

Inhalt

S. 3: Langjährige Pflanzenversuche zur Phytosanierung auf einer ehemals stark belasteten Haldenaufstandsfläche des Uranbergbaus

S. 7: **informativ**: Mikroplastik

S. 8: Untersuchung auf DNA-Schäden nach Strahlenexposition bei Nachkommen von Radartechnikern und Tschernobyl-Liquidatoren - Teil 2

S. 11: **informativ**: DNA-Schäden bei Nachkommen strahlenexponierter Eltern?

S. 13: **informativ**: Krebsinzidenz durch eine radioaktive Deponie

S. 15: **informativ**: Geothermie mittels Fracking

S. 17: Radioaktivität durch Uran-Altlasten im urbanen Bereich

S. 20: **informativ**: Mehr Krebs in der Nähe von Atomkraftwerken in den USA

Beilagen entfallen diesmal leider aus Platzgründen.

In eigener Sache: Wir kommen Wünschen von Lesern nach und stellen komplett auf den besser lesbaren zweispaltigen Seitendruck um und erhöhen den Anteil kürzerer Beiträge der Rubrik „**informativ**“, begrenzt auf je 0,5 bis 1, maximal 2 Seiten. Gleichzeitig bemühen wir uns um einen paritätischen Anteil wissenschaftlicher Beiträge bzw. fundierter praktischer Analysen des Strahlungsspektrums sowie aktueller Energie- und Umweltthemen. Wir freuen uns auch wieder über eingehende Manuskripte zur Unterstützung unseres ehrenamtlichen Wirkens. Auf S. 19 steht eine Auswertung des Registers zu den seit 2021 veröffentlichten Beiträgen im Strahlentelex.

Impressum: Herausgeber Kirchlicher Umweltkreis Ronneburg (gegründet 1988); Erscheinungsort: Ronneburg (Deutschland); alle Rechte liegen bei dem jeweiligen Verfasser. Erscheint 4/a zum Druckkostenpreis der farbigen print-Ausgabe; Copyright 2026 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.

Fotonachweis Titelblatt: Kirchlicher Umweltkreis
Druck: Nicolaus & Partner - 04626 Nöbdenitz;
Die online-Ausgabe erscheint s/w ab 15.06.2026 auf der Internetseite der Kirchengemeinde Ronneburg; Abonnenten erhalten online bis 15.05. und print bereits bis zum 15.04.2026 die Ausgabe zugeschickt.

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

Unser besonderer Dank gilt **Herrn Thomas Dersee**, dem Herausgeber des Strahlentelex von 1987-2018, für seine stete Unterstützung unseres Projektes.

Uranbergbausanierung**Langjährige Pflanzenversuche zur Phytosanierung auf einer ehemals stark belasteten Haldenaufstandsfläche des Uranbergbaus****Frank Lange**

Ausgangspunkt war die überraschend hohe radiologische Belastung und Durchsetzung des Untergrundes der vormaligen Laugungshalde „Gessen“ mit Schwermetallen (SM), die noch nach (!) der Sanierung der Aufstandsfläche festgestellt wurden.

Wie wirkt deren Boden-/Porenwasserchemie auf Vegetation und umgekehrt? Eine Fragestellung, die wissenschaftliches Interesse hervorrief. Anfangs ging es um Prüfung, in wie weit Bodenbakterien langfristig eine Reduzierung von Schwermetallen (SM) bewirken können und was über Pflanzen aufgenommen werden kann. Es handelt sich um lehm-, sand- und tonhaltige Böden mit Eisen- und Mangan einschlüssen, vereinzelt mit Schiefergestein durchsetzt (Abb. 1 rechts). Im tieferen Untergrund befinden sich Schwarzschiefergesteine, die sulfidhaltige Schwermetallverbindungen enthalten, vorzugsweise Eisen, Uran, Cadmium, Nickel und Arsen. Der obere Grundwasser (GW)-Leiter ist von diesen Schichten durch eine stärkere Tonschichtung („Gletscherton“) weitgehend getrennt. Jahrzehntelanger Bergbaueinfluss durch Ablagerung von Haldenmaterial im Form sogenannter „Armerze“ (Urangehalt < 300 g/t)

genannten Abraummaterial mittels Laugung unter Einsatz von sauren Bergbauwässern und 1%-iger Schwefelsäure. Nach dem Haldenabtrag über die ursprüngliche Fläche hinaus (42,3 ha statt 28,7 ha) erfolgte eine Ansaat auf der mit „Boden aus der Region“ abgedeckten Aufstandsfläche. In der Folgezeit kam es zu erheblichen Nachkontaminationen, die offiziell mit häufigen Ausstritten des recht oberflächennahen GW begründet wurden und erneute Untergrundentfernung (mehrere Meter Lehm und Sand) erforderten, selektiv mit Aufbringung von sogenannten ZAN-Material¹. Perspektivisch wurde nun ein Rückgang der Salz-, Schwermetall- und Radionuklidgehalte des Grundwassers infolge Wiederanstieg des pH-Niveaus durch Ausspülung, Ausfällungen, Sorption und auch zunehmende mikrobieller Einflussnahme erwartet.

Aus wissenschaftlicher Sicht bot sich die „Problemfläche“ sozusagen für alternative Verfahrenssuche an. Im nördlichen Teil der Wiese wurde 2004 ein Versuchsgelände angelegt. Mehreren Forschungsprojekten der Universität Jena diente das Areal seit dem zu Feldversuchen, die, mehr oder weniger aufeinander aufbauend, eine breite Palette mikrobiologischer Aspekte bearbeiten. Die FSU Jena bindet nach wie vor das Versuchsgelände in ihr praktisches Arsenal für themenübergreifende Bachelor-/ Masterarbeiten und Dissertationen sowie die studentische Ausbildung ein.

Zielstellungen

Ein erstes Förderprojekt befasste sich mit dem Einfluss von Mikroorganismen auf die Mobilität von Schwer-

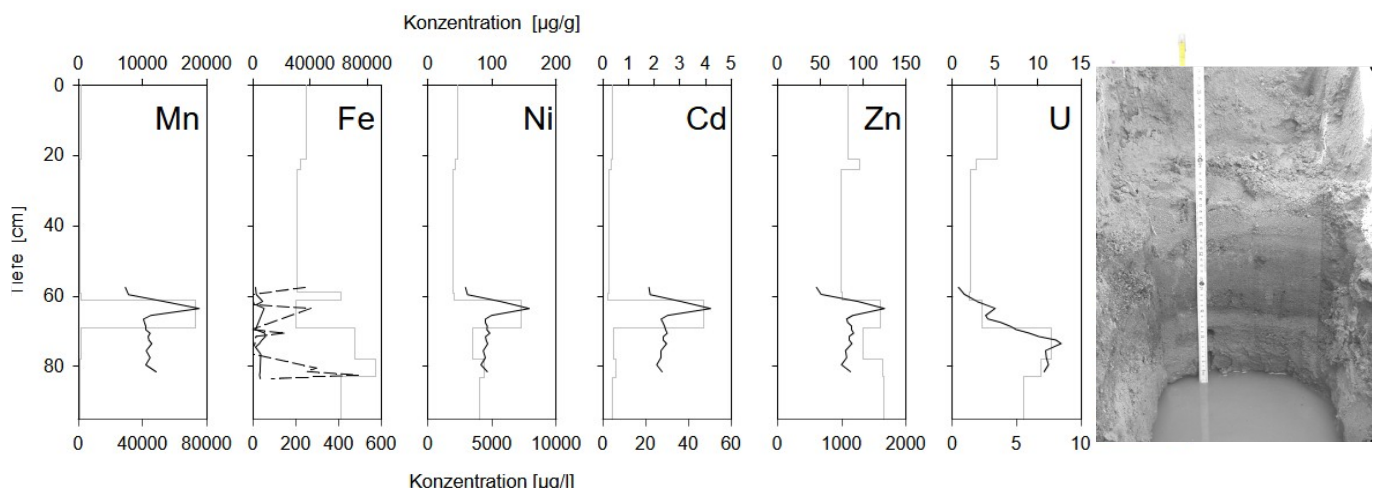


Abb. 1: Verteilung Schwermetallgehalt im Boden der Gessenwiese [1]

führte zu erhöhten Konzentrationen einer breiten Palette von teilweise toxischen SM im Boden.

Haldenaufstandsfläche „Gessenwiese“

Die sogenannte „Gessenwiese“ befindet sich auf dem früheren Areal intensiver Resturangewinnung aus dem

metallen in Böden [1]. Generell wurde ein (zu) geringes Bakterienumfeld festgestellt. Zwar konnten gewisse Abbaueffekte nachgewiesen werden, doch ohne Kohlenstoffzugaben war keine wirkliche Biosorption oder bakterielle Metallreduktion großflächig zu erwarten.

¹Zwischengelagertes Abdeckmaterial der Nordhalde

Weitere Forschungsprojekte folgten: „USER I“ (2014-2018) und „USER II“ (2019-2022). Pflanzennutzung zur Wiedererlangung natürlicher Gleichgewichte in belasteten Böden mittels natürlicher Selbstreinigungseffekte verschiedener Wirkmechanismen, zusammengefasst unter dem Begriff Phytosanierung, bilden den Grundinhalt dieser Forschungsprojekte. Die Zielstellung von USER I richtete sich auf eine möglichst kostengünstige mikrobiologische Steuerung solcher Selbstreinigungseffekte, die letztlich eine wirtschaftlichere Nutzung kontaminierter Flächen des Bergbaus zulassen könnten. Durch Anpflanzungen verschiedener Gehölze auf unterschiedlichen Testflächen sollten die Eignung nach periodischen Holzernten als erneuerbare Energieträger ermittelt werden, was einerseits die Einhaltung von Grenzwerten (Zink, Nickel, Cadmium) erfordert, andererseits aber auch effektive Wachstumsraten. Der mit Bundesmitteln geförderte Forschungszeitraum konnte ausreichende Wachstumsperioden zeitlich nicht abdecken. Parallel laufende Gefäß- und Lysimeter-Versuche dienten der vertiefenden Richtungssuche (mit ersten Ergebnissen).

USER II hatte die Aufgabe „... nach der Phase der Etablierung der Testfelder die räumliche Entwicklung der Biodiversität unter dem Einfluss der heterogenen Kontamination, die ebenfalls einer Änderung im Transportpfad mit dem Wasser unterliegt, auf die zeitliche Entwicklung einer nachhaltig gesicherten Bodenbehandlung hin weiter zu entwickeln und so zur Etablierung einer nachhaltigen Landschaftsgestaltung unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte beizutragen.“ [3]

Seit 2023 (bis 2026) läuft aktuell das BMBF-geförderte Verbundprojekt MykoBEST (Einfluss der **Mykorrhizosphäre** von **Bäumen** auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften).

Die Zielstellung betraf grob formuliert die Feststellung, in wie weit Baumbewuchs zur Sanierung schwermetallbelasteter Böden herangezogen werden könnten, um Sanierungsarbeiten, wie Abdeckungen, Abträge oder Versiegelungen zu modifizieren. Fachlich ausgedrückt: „... langfristige Phytosanierungsstrategien unter Feldbedingungen zu entwickeln...“ und „... einen geeigneten Bioremediationsansatz für vom Bergbau betroffene Gebiete zu entwickeln, indem Phytostabilisierung und Wertschöpfung der Flächen durch die Erzeugung von Biomasse kombiniert werden, ohne mit der Landnutzung für die Nahrungsmittelproduktion zu konkurrieren.“ [2] Gemeint ist also, eine pflanzliche Sanierungsstrategie für Bergbaufolgelandschaften aufzubauen, die die Mobilität von Schwermetallen durch biochemische Bindungsänderungen herabsenkt. Landwirtschaftlich

ungeeignete Bergbaufolge-Böden könnten so für energetische Biomasseverwertung und/oder als Rohstoffquelle für die Zellstoffindustrie genutzt werden.

Versuchsflächen

2015 wurden neun neue Teilflächen für die USER- Feldexperimente geschaffen (innerhalb von 12x36 m).

Je nach Art und Weise der Belastung und möglicher Einflussfaktoren kann Phytosanierung verschiedentlich angegangen werden. Im Mittelpunkt stand jetzt mehr die Phytostabilisierung als die Phytoextraktion. Stabilisierung durch Reduzierung der Mobilität gelöster SM wird durch die Absonderung spezieller Wurzelstoffe erlangt, die diese Metalle binden. Extraktion geschieht durch Aufnahme von weiterhin gelösten SM ins Gehölz über die Wurzeln.

Der Untergrund wurde bis zu einer Tiefe von 1 m ausgehoben und mechanisch homogenisiert. Dann wurden die Teilflächen wirksam getrennt aufgeteilt und mit dem homogenisierten Substrat wieder befüllt, wobei drei Flächen in den oberen 50 cm eine Anreicherung mit 5 Gew.-% kalkhaltigem Substrat („Rendzina“ – ein karbonatreicher Bodentyp) erhielten; weitere drei Flächen mit 20 Gew.-% Rendzina. Bei den drei verbliebenen Flächen erfolgte zunächst keine Bodenverbesserung.

Seit mehr als 120 Jahren ist bekannt, dass Baumwurzeln mit Mykorrhiza-Pilzen in Symbiose leben. Unter Verwendung von Pilzmaterial lassen sich selbst extreme Standorte besiedeln. Bei Stadt- und Straßenbäumen ist der Mangel an Mykorrhiza-Pilzen besonders hoch. Mit einer gezielten Mykorrhiza-Applikation kann man das gesunde Wachstum der Bäume gerade auch in Stresssituationen (Trockenheit, An- und Umpflanzen) unterstützen. Dieses Prinzip machten sich die Jenaer Forscher zu nutze.

Drei Parzellen setzte man 2016 Mykorrhiza-Sporenimpfmittel zu und Endomykorrhiza-Sporen von *Rhizoglyphus irregularis* wurden über die gesamte Fläche verteilt. Drei Teilflächen erhielten mittels 700 Liter Gießwasser zusätzlich jährlich eine Ergänzung mit *Streptomyces mirabilis* (spezifizierte Bakterien), die hier ursprünglich aus dem Vorfluter "Gessenbach" isoliert wurden. Mit rund 80 % die häufigste

Abb. 2: Endo-Mykorrhiza
(Quelle Fa. Gefa Fabritz)



Mykorrhizaform aller Landpflanzen ist die Endo-Mykorrhiza, die von Jochpilzen (Glomales) gebildet wird. Bestimmte Pilzarten kommen nur an bestimmten Baumarten vor. Es entsteht also nur dann eine voll funktionsfähige Symbiose, wenn die passende Mykorrhiza dem passenden Baum geimpft wird.

Für die Feldversuche auf der Gessenwiese kamen Beimpfungen aus einer Mischung aus mehreren Ekto-mykorrhiza-Arten und der Endomykorrhiza-Art *Rhizophagus irregularis* zum Einsatz.

Unter den Ekto-Mykorrhiza finden sich schmackhafte

(Trüffel), ungenießbare (Gallen-Täubling) und giftige Arten (Fliegenpilz). Fast alle bilden Fruchtkörper und lassen sich mit bloßem Auge an den Feinwurzeln erkennen.

Typische Symbiosepartner: Eichen, Buchen, Hainbuchen, Tannen, Fichten, Kiefern und einige andere Baumarten. Linde, Pappel und Weide können sowohl Ekto- als auch Endo-Mykorrhizen bilden oder besitzen. An älteren Bäumen und in trockeneren Böden finden sich jedoch eher Ekto-Mykorrhizen.

Für die spezifischen Bedingungen der Gessenwiese legten sich die Forscher (bisher) auf Birke, Erle und Weide fest.

Die benannten Testflächen wurden mit den drei Baumarten bepflanzt.

Die angestrebte Reduzierung mobiler Spurenelemente durch Immobilisierung (Änderung der Bindungsarten) im Wurzelbereich und Aufnahme von Schwermetallen über die Gehölze ermittelte man mittels:

- Überwachung der Grund-/Porenwasserqualität; 4 GW-Messstellen
- Ermittlung des Potentials der Biomasseproduktion auf den Testflächen (Wachstumsraten, Arteneignung, diverse Bodenanreicherungen)
- Feststellung der Spurenelementgehalte in Hackschnitzeln

Hierfür „erntete“ man 2019, 2021 und 2024 die 2016 gepflanzten und nachwachsenden Bestände (unmittelbar über dem Wurzelstock).

Ergebnisse Grund- und Porenwasser

Der stark witterungsbedingt schwankende Grundwasserspiegel ist nach wie vor maßgebend, erschwert sozusagen eine Bodenwasser- bzw. Porenwasserbewertung in längeren Feuchtperioden oder extremeren Starkregeneignissen. Grundsätzlich geht aus Tabelle 1 ein Rückgang der Grundwasser-Schwermetallbelastung auf

Tabelle 1: Maximalbereiche Schwermetalle 2022 im Vergleich zu 2006

Max-Bereiche ¹⁾ Angaben in mg/l	Grundwasser 2006 Max-Werte nach [4]	Bodenwasser 2006 Max-Bereich nach [1] (Abb.1)	Grundwasser 2022 (im Abstrom)	Porenwasser 2022
Uran	3,5	0,008	0,035	0,2
Kobalt	20	1,7	1,3	0,12
Cadmium	-	0,05	0,06	0,02
Zink	20	1,7	1,1	0,5
Nickel	56	7,5	4,5	1,8
Kupfer	4,0	0,053	0,3	0,1
Seltene Erden	4,0 CER	-	0,3 REE	0,1 REE
Mangan	-	70	60	6,0
Eisen	-	0,6	10	0,03

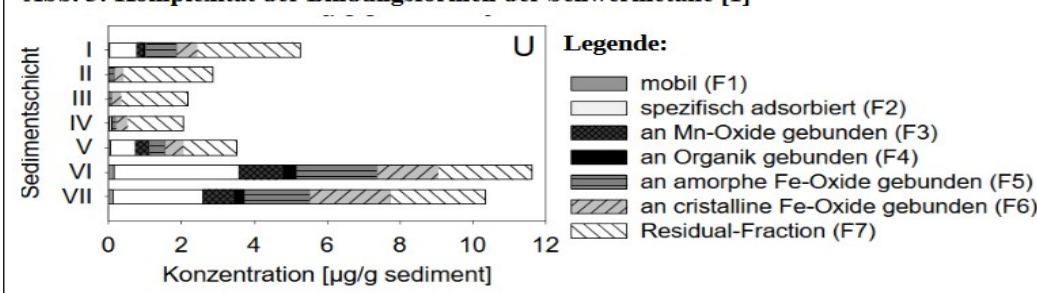
¹⁾Max-Bereich: 2006 ohne Einzel-Spitzen; 2022 Median 75% der höchsten Messstelle

dem 2004 angelegten Versuchsflächenareal der Gessenwiese hervor. Es traten nachweisbar pH-Änderungen auf, die allerdings mitunter gegenläufig sind. 2018 wurde ein Schwankungsbereich von 3,4 bis 5,6 für die vorangegangenen 20 Jahre angegeben [5]. 2022 lag der Ø pH-Bereich der 3 Messpunkte nach den Versuchsflächen im Abstrom zwischen 4,6-5,6. Das Porenwasser der (nicht karbonathaltigen) Böden hatte einen Ø pH-Bereich 4,9 – 5,1 [2]. 2006 lagen pH-Werte im Bodenwasser z.T. sogar unter 3,0 [4].

Für einen Erfolg der angestrebten Phytostabilisierung von SM im Boden-Wasser-Pflanzen-System spricht der deutlich geringere SM-Gehalt im Porenwasser im Vergleich zum Grundwasser des Zu- und Abstromes. Insbesondere die karbonatangereicherten Böden erreichten niedrigere Werte, teils unter der analytischen Nachweisgrenze. Eine gegenläufige Tendenz trat bei Uran auf, dass sozusagen durch die Phytostabilisierung mobiler wird (Abb. 5).

Die SM- Konzentrationen des Grundwassers haben sich über die Jahrzehnte allein durch Auswaschungen deutlich verringert, so dass der Effekt der Phytosanierung im Nachweis

Abb. 3: Komplexität der Bindungsformen der Schwermetalle [1]



schwieriger wird; indirekt ist über Biomassebestimmungen der Anteil der Phytoextraktion ein Beleg für Mobilitätsänderungen der Bindungsverhältnisse. Wie Abb. 3 zeigt, sind diese von vornherein im Boden des Standortes „Gessenwiese“ sehr komplex.

Gegen eine wirksame Stabilisierung spricht auf den ersten Blick der Anstieg von SM im Grundwasser des Abstromes gegenüber dem Zustrom zu den Versuchsflächen (vgl. Pkt. 3.2 Abb. 2 a-i in [2]). Aber auch die Pflanzenexperimente 2006 wiesen entsprechend Tab.1

im Bodenwasser ohne Phytostabilisierung deutlich niedrigere Konzentrationen auf (von Hotspots abgesehen). Andererseits stellen die Werte in Tabelle 1 für die Versuchsflächen 2022 die ungünstigsten Analysen dar, d.h. des 75%- Median der jeweils „schlechtesten“ Fläche. Bei Differenzierung der 9 Versuchsfelder (9 Substrate für je 3 Baumarten) zeigen sich deutliche Unterschiede. Flächen mit Karbonatanteil („Rendzina“) und/oder mit Pilzwurzeln („Mykorrhiza“) und bakterieller Ergänzung („Streptomyces“) hielten SM deutlich stärker im Boden zurück als die unbehandelten Bepflanzungen. Der Anstieg der pH-Werte korreliert direkt mit zunehmender Immobilität der Metalle (außer bei Uran!). Dennoch sind konkrete Auswirkungen auf den SM-Gehalt im Grundwasser gering. Dafür sind letztlich die knapp 500 m² Versuchsfläche doch zu gering und die (rückläufige) SM-Belastung hat sich z. T. sehr verringert (Tab. 1), wodurch Effekte durchaus schwieriger nachweisbar werden. Hinzu kommen die geringe Mächtigkeit der Rendzina und unterschiedliche GW-Bewegungen: *„Die höheren Metallkonzentrationen im Abstrom hängen mit den höheren Aufenthaltszeiten des Grundwassers (ca. 1 Jahr) dort zusammen, sodass es zu einer Aufkonzentration durch die längere Kontaktzeit kommt.“* Infolge wechselnder Bodenstrukturen von sandig-lehmig in tonig-schluffig *„sind im Anstrom die Fließgeschwindigkeiten schneller (Aufenthaltszeit < 6 Monate).“* [6]

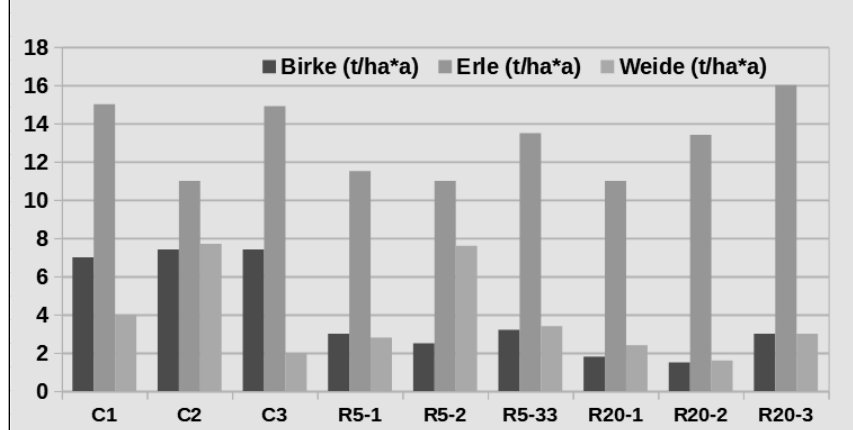
Ergebnisse Biomasse

Der SM-Gehalt des Bodens reicht aber durchaus noch aus, Nutzungsgrenzwerte der Biomasseproduktion in Frage zu stellen. Die begleitenden Konzentrationsfeststellungen ergaben für die drei Baumarten unterschiedliche Ergebnisse. Mittels Phytostabilisierung und der damit verbundenen SM-Bindung im Boden strebt man sozusagen eine reduzierte Phytoextraktion,

spricht Aufnahme durch die Pflanze an. Eine Reduktion war auch nachweisbar, vermutlich mit den Wachstumsperioden weiter zunehmend. Nickel, Cadmium und Zink unterliegen Biomasse-Brennstoffgrenzwerten. Erle und Birken nahmen diese Hürde, beim Weidengehölz konnten Zink und Cadmium (noch) nicht eingehalten werden.

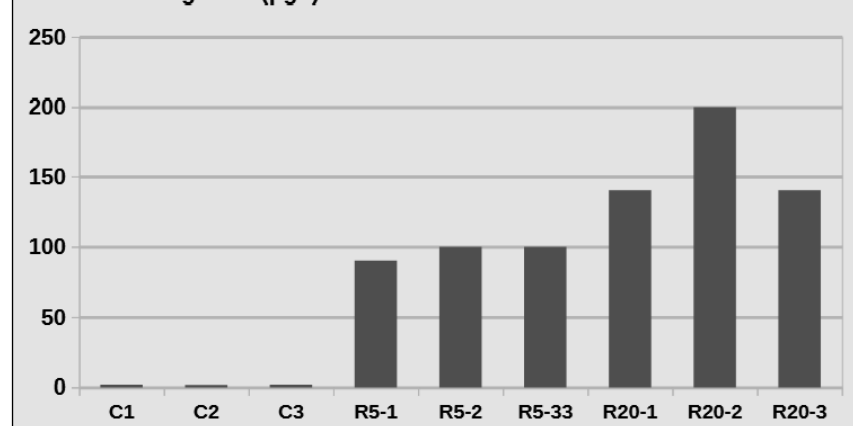
Die Gesamtbruttobiomasse bzw. die Wachstumsrate stellt das Hauptkriterium der Eignungsfindung von

Abb. 4: Biomasse-Wachstumsraten



Bergbaufolgeflächen für eine wirtschaftliche Nachnutzung dar. Neben möglicher Weiterverarbeitung zu Pellets könnte auch Zellulose eine Perspektive haben. Vielleicht nicht unbedingt für die speziellen Ansprüche der Papierindustrie, aber in der Dämmstoffproduktion könnte damit die biologische Komponente gestärkt werden. Abb. 4 zeigt Erträge an trockener Biomasse nach der zweiten Wachstumsperiode 2019-21. Die Versuchsfelder unterscheiden sich im Karbonatgehalt des Bodens (0%-5%-20%), ohne und mit Wurzel-Pilz-Symbiose (C2, R5-2, R20-2) sowie ohne und mit bakterieller „Wachstumsförderung“ (C3, R5-3, R20-3). Die ermittelten Wachstumsraten sind als Grundorientierung geeigneter Gehölzarten richtungsweisend, stellen aber keine signifikanten Hektarerträge dar. Dafür liegen nicht genügend Wachstumsperioden vor und die in [2] disku-

Abb. 5: Urangehalt (µg/l) im Porenwasser



tierten Einflussfaktoren belegen weiteren Forschungsbedarf. Bis dato ergibt sich zusammengefasst: Erlen gedeihen auf allen Flächen recht gut, Birken und Weiden schon deutlich weniger. Hierbei ergaben sich für die Birken² bei den unbehandelten Flächen sogar deutlich bessere Erträge.

Wichtig ist der festgestellte Umstand, dass Uran durch eine mit der Wurzelsymbiose in Zusammenhang stehenden pH-Erhöhung (also nicht speziell mit der karbonatabhängigen pH-Anhebung) im Gegensatz zu den anderen SM in Lösung geht und im Porenwasser (Abb. 5) deutlich ansteigt. Bei Durchwurzelung der Abdeckungen sanierter Wismuthalden könnte es so zu einer Wiederanreicherung in den Sickerwässern kommen.

Zusammengefasst ist festzuhalten, dass Phytostabilisierung zur Bindung von SM im Boden beiträgt und als Ergänzung und Modifizierung klassischer Sanierungen (Abtrag, Abdeckung, Abdichtung) von Bergbaufolgeflächen unter Beachtung spezifischer Bedingungen und je nach Belastungsgrad beitragen kann. In wie weit durch Biomassenanbau eine wirtschaftliche Verwertung möglich wäre, bedarf weitergehender Feldversuche, wäre aber sehr sinnvoll. Dadurch könnten Nachsorgeaufgaben der Pflege und Überwachung tatsächlich langfristig gesichert und ein Stück weit sogar gegenfinanziert werden, anstatt diese speziellen Flächen wie bisher, privaten Jagdrevieren, Photovoltaikanlagen und Immobiliengeschäften mehr oder weniger verantwortungsethisch zweifelhaft zu überlassen.

[1] Eva-Maria Burkhardt, Sebastian Bischoff, Jana Sitte, Kirsten Küsel: „Der Einfluss von Mikroorganismen auf die Mobilität von Schwermetallen in Böden“ Vortrag 22.11.08 in Ronneburg

[2] S. Nettemann u.a. „Landgewinnung eines ehemaligen Uranbergbaus: Kombinierte Metallphytostabilisierung und Biomasseproduktion“, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften.

[3] www.chemgeo.uni-jena.de/21285/user-ii

[4] M. Lonschinski, D. Merten, G. Büchel: „Schwermetalle und Radionuklide im Grund- und Bodenwasser der Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde“, Institut für Geowissenschaften, FSU Jena, Vortrag 22.11.08 in Ronneburg

[5] Angewandte Chemie Bd. 96 September 2018, S. 138-154: Anja Grawunder, Martin Lonschinski, Matthias Händel, Sebastian Wagner, Dirk Merten, Daniel Mirgorodsky, Georg Büche: „Muster der Seltenen-Erden-Elemente als Prozessindikatoren an der Wasser-Feststoff-Grenzfläche eines post-bergbaulichen Gebiets“

[6] Mitteilung von Dr. Sarah Nettemann, Institut für Geowissenschaften der FSU Jena am 20.11.25

² Birken waren (neben Kiefern) seit jeher auf den Halden des Uranbergbaus die ersten und verbreitetsten höheren Pflanzen durch Sukzession.

Mikroplastik

informativ

Der Einfluss von Mikroplastik auf die Gesundheit wird seit langem diskutiert. Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) spricht beim Erscheinen fast jeder Studie, die es in den wissenschaftlichen Diskurs schafft, von unklarer Datenlage. Zwar gelten Mikroplastiks als



trauriger Bestandteil der Nahrungskette, sie seien aber „zu groß“, um in die Zellen und in menschliche Organe gelangen zu können. Dem stehen immer wieder Studienergebnisse gegenüber, die Plastikanlagerungen im µg-Bereich pro Gramm Organ Gewebe feststellen. Hier beanstandet das BfR fehlende einheitliche Bestimmungsmethoden und die Angabe viel zu hoher Plastikmengen, die u.a. in den hochkomplexen Biomolekülen partikular im Organ Gewebe nicht eindeutig nachweisbar wären. Generell fehlten eindeutige Nachweise für gesundheitliche Beeinträchtigungen komplett. „Es müssen weiterhin realistische Expositionshöhen herausgefunden werden, das heiße, wie viele dieser Partikel in einer Zelle vorhanden sein müssten, um deren Funktion tatsächlich zu beeinflussen. Darüber hinaus stelle sich die Frage, ob der festgestellte Effekt auch wirklich gesundheitsrelevant sei.“ (BfR-Meldung vom 03.12.25). Mit dem Abschmettern der neusten, in der Fachwelt stark diskutierten US-Studie der University of New Mexico³ tut sich das BfR recht schwer. Hier liegen Vergleichsdaten vor, die einen expositionsbedingten Anstiegseffekt nachweisen. Die Erläuterung dieser Studie im Zusammenhang mit der BfR-Kritik ist lohnend und im Strahlentelex Ausgabe 03/26 vorgesehen. F.L.

³Nihart et al., „Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains“, *Nature Medicine* 2025, 31, 1114–1119

Strahlenfolgen**Untersuchung auf DNA-Schäden nach Strahlenexposition bei Nachkommen von Radartechnikern und Tschernobyl-Liquidatoren - Teil 2****F. Brand, A. Knaus, K. Sperling, P. Krawitz**

Fortführung des Beitrages aus Strahlentelex 01/2026

Radarstudie

Mittlerweile ist hinlänglich bekannt, dass das Betriebspersonal von Radargeräten Röntgenstörstrahlung ausgesetzt war, deren Gesundheitsrisiko im Einzelfall nicht unerheblich gewesen sein könnte. Ebenfalls ist dokumentiert, dass bis 1975 weder Schutzmaßnahmen ergriffen noch Ortsdosisleistungsmessungen durchgeführt wurden und dass erst nach 1985 wirkungsvolle Strahlenschutzmaßnahmen flächendeckend umgesetzt waren (21). Gegenstand der neuen Radarstudie waren Radartechniker von BW und NVA, die ihren Dienst bis spätestens 1985 angetreten hatten und die während des Dienst- und Expositionszeitraums mindestens ein Kind gezeugt haben. Nachkommen von Radartechnikern, die nach dem Expositionszeitraum gezeugt wurden, wurden nur dann in die Studie eingeschlossen, wenn mindestens ein Geschwisterkind während der Dienstzeit des Vaters gezeugt wurde. Bestimmte Krebserkrankungen wurden für die Radartechniker bereits als Berufskrankheit anerkannt. Für die Nachkommen der Radartechniker fehlt eine genaue Analyse der Auswirkungen der Strahlenexposition ihrer Väter auf ihre DNA und Gesundheit bis dato, eine Lücke, die die nun vorliegende Studie teilweise schließt.

Zwischen Januar 2019 und August 2020 konnten 124 Nachkommen aus 80 Familien rekrutiert und davon 110 mit guter Qualität sequenziert werden (vgl. Abb. 2 (a)). Mit Hilfe eines Fragebogen wurden Daten zum individuellen Expositionsrisiko der Soldaten und zum Gesundheitsstatus des Soldaten und der in die Studie eingeschlossenen Familienmitglieder erhoben. Die Genauigkeit und Ausführlichkeit der Angaben der Soldaten schwankte naturgemäß stark. Mit Zustimmung der Soldaten wurde deshalb eine retrospektive Strahlendosis-schätzung durch die Strahlenmessstelle der Bundeswehr vorgenommen. Für die Kohorte der Radartechniker wurde die Dosis anhand von Dienstzeit, Einheit, Tätigkeit und Rang eines jeden Studienteilnehmers geschätzt. In ihre Analysen zogen die Experten der Strahlenmess-

stelle auch die vorliegenden Daten zur Störstrahlen-Charakteristik der verschiedenen Radargeräte ein, die in einigen Fällen während der Einsatzzeit, oft aber auch erst später in einer Laborumgebung erhoben wurden (22). Diese Schätzungen weichen oft deutlich von früheren Schätzungen z.B. in Verfahren zur Wehrdienstbeschädigung der einzelnen Soldaten ab, bildeten aber trotzdem die Grundlage für unsere statistischen Analysen, da Daten aus den Fragebögen wie Dienstzeit und Einheit des Soldaten alleine die Komplexität der Strahlenexposition von Radartechnikern nicht erfassen können. Der Schätzung der Strahlenmessstelle zu Folge war für 77 Soldaten eine Strahlenexposition eher unwahrscheinlich, für 3 aufgrund fehlender Unterlagen unklar und für 30 wahrscheinlich. Insgesamt betrug die Dosis, der die Radartechniker ausgesetzt waren, im Durchschnitt $9,21\text{ mGy}$, für die Untergruppe mit wahrscheinlicher Exposition $34,35\text{ mGy}$ (vgl. Abb. 2).

Strahlenexponierte und Nicht-Strahlenexponierte Vergleichskohorten

Als Kontrollgruppe wählten wir die sog. Inova Kohorte (Inova Translational Medicine Institute, Falls Church, Virginia, USA). Diese umfasst insgesamt 1275 Kinder von 1218 Elternpaaren, die zwischen 2011 und 2013 sequenziert wurden (vgl. Abb. 2 (a), (c)) (5, 6).

Zusätzlich konnten die Daten der Studie von Yeager, et al. durch uns re-analysiert werden (CRU-Kohorte, vgl. Abb. 2 (a), (c)) (4). Diese Kohorte besteht aus 105 ukrainischen Familien mit 130 Kindern, deren Väter als Liquidatoren des Tschernobyl-Reaktorunfalls eingesetzt wurden. Die Dosisabschätzung der CRU Kohorte wurde mit einem standardisierten und geprüften Fragebogen durchgeführt (23, 24). Aus den Unterlagen der Studie von Yeager, et al. geht hervor, dass die Väter in der CRU-Kohorte einer durchschnittlichen Dosis von $365,42\text{ mGy} (\pm 684,55, m = 29\text{ mGy})$ ausgesetzt waren, also einer substanziell höheren Strahlendosis als die Radartechniker (vgl. Abb. 2). Allerdings ist zu beachten, dass nur 13 Kinder aus der CRU Kohorte im Jahr 1987 geboren wurden, von denen 7 wiederum eine sehr geringe väterliche Dosis (25 mGy) aufwiesen. Für fast alle Nachkommen können wir also im Unterschied zur Radarkohorte eine Konzeption zum Zeitpunkt der Exposition ausschließen, was auch klinisch relevante genetische Varianten unwahrscheinlicher macht.

Insgesamt analysierten wir die DNA von 1.515 Kindern und ihren Eltern und selektierten Neumutationen, die hohe Qualitätsansprüche erfüllen. Für alle drei Kohorten lagen uns die genetischen Daten vor, sowie das Alter der Eltern bei der Zeugung des Kindes und für die

exponierten Kohorten darüber hinaus auch Schätzungen der rezipierten Strahlendosis.

Nachweis von Neumutation mit Hilfe von Ganzgenomsequenzierung

Insgesamt identifizierten wir 7.407 Neumutationen in der Radarkohorte ($\mu=67,95$), 8.441 ($\mu=65,43$) in der CRU-Kohorte und 79.663 ($\mu=78,95$) in der Inova Kohorte. Unter Berücksichtigung des paternalen und maternalen Alters bei der Zeugung des Kindes unterscheiden sich die Daten der verschiedenen Kohorten nicht, und auch der paternale Alterseffekt bewegte sich mit ca. 1 Neumutation pro Jahr im erwarteten Bereich (vgl. Abb. 3). Darüberhinaus entsprachen die Neumutationsraten der CRU- und Inovakohorte auch ungefähr den Zahlen, die in der jeweiligen Originalpublikation vorgestellt wurden (4, 5).

Mögliche Fehlerquellen in der Dosisabschätzung und der Analyse der Sequenzdaten

Trotz gewissenhafter Arbeit konnten im Verlauf der Studie nicht alle Fehlerquellen und Bias vollständig ausgeräumt werden. Interessierte Leser seien an dieser Stelle auf unseren Artikel in Scientific Reports und dessen Supplement verwiesen, wo wir auf diese Unsicherheitsfaktoren deutlich ausführlicher eingehen können, als es hier möglich ist (2).

Im Gegensatz zu früheren Studien wurde in der neuen Radarstudie das gesamte menschliche Erbgut betrachtet, ohne den Zielbereich bspw. auf einfacher und präziser sequenzierbare Regionen einzuschränken. Validierungsexperimente mit sekundären Sequenzierungsmethoden bestätigten ca. 90% der isolierten Neumutationen, aber nur ca. 23% der cDNMs (71% in den einfacher zu sequenzierenden Regionen der Pilotstudie).

Ein zweiter Unsicherheitsfaktor in der Analyse ist die Ungenauigkeit der Strahlendosisabschätzung der Radartechniker. Im Vergleich zu früheren Verfahren wurde die Exposition in der neuen Radarstudie konservativer geschätzt, und viele ($n = 77$) Techniker wurden als wahrscheinlich nicht-exponiert markiert. In Anekdoten berichteten uns viele Soldaten von Hilfstätigkeiten, die außerhalb ihres eigentlichen Aufgabenbereichs lagen und durchaus zu Strahlenexposition geführt haben könnten, aber solche Tätigkeiten konnten in der vorliegenden Strahlendosisabschätzung nicht berücksichtigt werden. Diese ist also in erster Linie ein unterer Grenzwert der rezipierten Strahlendosis eines jeden Soldaten, und die tatsächliche Strahlendosis kann davon deutlich nach oben abweichen.

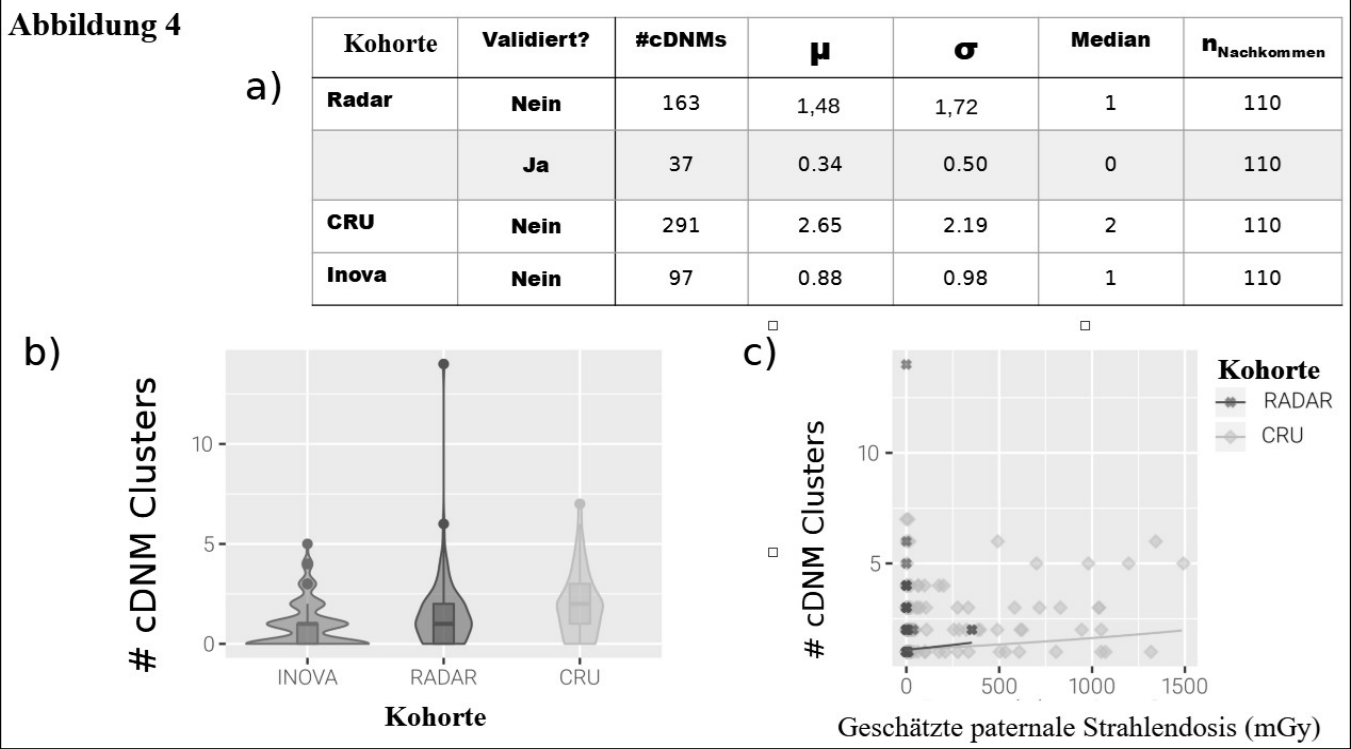
Geclusterte Neumutationen in Folge von paternaler Strahlenexposition

Wir untersuchten die Zusammenhänge zwischen der Neumutationsrate und paternaler Strahlenexposition, unter Berücksichtigung von Kovariablen wie Alter der Eltern bei Zeugung des Kindes und unter Berücksichtigung der vorgenannten bekannten Fehlerquellen (vgl. Abb. 3 (a)). Wir fanden eine signifikante Anreicherung von cDNMs in den Kindern von exponierten Soldaten und Tschernobyl-Liquidatoren. Die Zahl der cDNMs beläuft sich auf: (i) Inova, $0,88 \pm 0,98$; (ii) CRU, $2,65 \pm 2,19$; und (iii) Radar, $1,48 \pm 1,72$. Dieser Effekt ist statistisch signifikant ($p < 0.005$) und in der CRU-Kohorte, der Kohorte mit der höchsten Strahlenexposition, am größten. Wenn man die Zahl der Cluster um die Vorhersagegenauigkeit für cDNMs korrigiert ist der Effekt für die Kohorte der Tschernobyl-Liquidatoren ebenfalls signifikant, aber nicht für die Kohorte der Radartechniker alleine ($p_{CRU} < 0.001$, $p_{Radar} = 0.27$). Allerdings beobachteten wir, dass die Exponierte Subkohorte der Radartechniker eine höhere Zahl an cDNMs aufweist, als die nicht exponierte (validiert: $\mu_{Exponiert} = 0.33$, $\mu_{Nicht\ Exponiert} = 0.23$). Auch hier zeigte sich der Trend, dass eine wahrscheinlich höhere Strahlenbelastung zu einer erhöhten Zahl an geclusterten Neumutationen in den Nachkommen führte. Ebenfalls konnten wir nachweisen, dass die Zahl der Cluster mit höherer Strahlenexposition steigt ($\beta = 0.003$, $p < 0.001$, vgl. Abb. 4 (a-c)).

Schlussfolgerung

Unsere Studie lieferte weitere Belege dafür, dass cDNMs einen strahleninduzierten, transgenerationalen Biomarker in Nachkommen strahlenexponierter Väter darstellen. Aufgrund der geringen absoluten Zahl der cDNMs (1-2 pro Nachkommen), ist die klinische Bedeutung dieser Neumutationen ungefähr mit dem paternalen Alterseffekt von einem Jahr Lebensalter des Vaters vergleichbar. Ebenfalls beobachteten wir keine erhöhte Schädlichkeit von cDNMs im Vergleich zu isoliert auftretenden DNMs und keine der validierten cDNMs beinhaltete bekannte krankheitsverursachende Varianten. Da sowohl die CRU- als auch die neue Radarkohorte keine Nachkommen mit genetischen Erkrankungen enthielten, war eine Anreicherung letzterer Varianten aber ohnehin nicht zu erwarten.

Unsere Tests mit verschiedenen Clustergrößen von bis zu 47 k bp ergaben darüber hinaus, dass ausschließlich kleinere Cluster bis 30 bp nach Strahlenexposition vermehrt auftreten, größere hingegen nicht. Ein Fakt, der sich mit der strahlenbiologischen Hypothese der Entste-



hung solcher Mutationen deckt und erklärt, weshalb dieser Effekt in der ursprünglichen Veröffentlichung von Yeager, et al. nicht genannt wird. Vieles deutet also daraufhin, dass besonders komplexe Mutationsmuster wie cDNMs aufgrund von Strahlenexposition vermehrt auftreten, und durch die Reparaturmechanismen der menschlichen Keimbahnzellen nicht immer korrekt repariert werden können.

Erwähnenswert ist überdies, dass es bestimmte DNA-Sequenzen und Mutationsarten gibt, wie z.B. Mikro- und Minisatelliten und Strukturvarianten, die eine hohe spontane Mutationsrate aufweisen, sensitiv auf die Einwirkung durch ionisierende Strahlung reagieren, aber die mit der hier eingesetzten NGS-Technologie nicht ausgewertet werden konnten (25–27). Ebenfalls ist es entscheidend zu berücksichtigen, in welchem Zusammenhang der Expositionszeitraum und der Konzeptionszeitpunkt des Kindes stehen, da die DNA Reparatur in den Spermien zum Konzeptionszeitpunkt sehr eingeschränkt ist, und epigenetische Veränderungen des väterlichen Erbguts ausgeprägt sind. Beide Faktoren tragen zu erhöhter Sensitivität gegenüber ionisierender Strahlenexposition bei.

Die genomweite molekulare Analyse des Erbguts steht noch am Anfang. Weitere Analysen mit neuen Sequenziermethoden wie long-read Sequenzierungsverfahren oder Analysen von Strukturvarianten (z.B. die Deletion größerer Bereiche einzelner Chromosomen) könnten das Bild der DNA-Schädigungen in Nachkommen von strahlenexponierten Eltern weiter erhellen. Aufgabe der Wissenschaft ist es hier diese neuen Technologien auf

die vorliegenden Kohorten anzuwenden, um die Folgen von paternaler Langzeitstrahlenexposition noch vollständiger zu analysieren, als es bis jetzt möglich war, um dadurch eine möglichst genaue Risikoeinschätzung für das Individuum zu ermöglichen. Auf Grundlage dieser Daten können dann Humangenetiker einzelne Ratsuchende zu ihrem individuellen Risiko durch Strahlenexposition beraten. Zwar lieferte unsere Studie weitere Anhaltspunkte dafür, dass es sich bei geclusterten Neumutationen um einen transgenerationalen Biomarker und stochastischen Strahleneffekt handelt, aber auf Basis der jetzt vorgelegten Studie bleibt das Risiko für eine genetische Erkrankung, die durch die Strahlenexposition der Väter im untersuchten Dosisbereich ausgelöst wird, gering.

Abbildung 4: Analyse der geclusterten Neumutationen in Folge von paternaler Strahlenexposition

Raten geclusterter Neumutation (cDNMs) in den exponierten und der Kontrollkohorte in Abhängigkeit der geschätzten Strahlenexposition. **(a)** Absolute Zahl der detektierten, und für die Radarkohorte auch der validierten cDNMs, sowie eine deskriptive Statistik (Durchschnitt, Standardabweichung, Median) derselben. In den Nachkommen exponierter Positionen zeigt sich unter Anwendung des Altersmatchings eine deutlich erhöhte Rate an geclusterten Neumutationen (Radar = 1,72, CRU = 2,65) im Vergleich zur Normalbevölkerung (Inova = 0,88). Im Rahmen unserer Validierungsexperimente konnten wir trotz sorgfältiger Bemühungen in der Selektion der geclusterten Neumutation nur ca. 23% bestätigen. Unsere statistischen Modelle zeigten aber einen

robusten Effekt, auch wenn wir die Mutationszahlen für alle Kohorten um diesen positiv prädiktiven Wert bereinigten. **(b)** Verteilung der Zahl an cDNMs pro Nachkomme in den drei Kohorten. **(c)** Zahl der geclusterten Neumutationen in Abhängigkeit von der paternalen Strahlenexposition in mGy. Mit Hilfe eines statistischen Modells wiesen wir einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Rate an geclusterten Neumutationen in den Nachkommen und der paternalen rezipierten Strahlendosis nach. Es zeigte sich, dass pro mGy an Exposition ca. 0.003 cDNMs in den Nachkommen erwartet werden. Dieser Effekt war für die CRU-Kohorte und für die kombinierte Kohorte aus CRU und Radar signifikant ($p < 0.001$), aber nicht für die Kohorte der Radartechniker alleine, vermutlich aufgrund der geringen Zahl an Soldaten für die eine verlässliche Strahlendosis-schätzung erstellt werden konnte.

Der Strahlentelex dankt herzlich den Autoren:

Dr. Fabian Brand, Dr. Alexej Knaus und Direktor Prof. Dr. Peter Krawitz: Institut für Genomische Statistik und Bioinformatik, Universitätsklinikum Bonn
Prof. Karl Sperling: Institut für Medizinische Genetik und Humangenetik, Charité Universitätsmedizin, Berlin

(21) König, W. *et al.* Bericht der Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früher Radareinrichtungen der Bundeswehr und der NVA (Radarkommission)[Report of the expert group on the issue of the hazards of radiation in earlier types of radar devices and the German Radar Commission]. Berlin, German Radar Commission. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Bericht_Radarkommission_Deutscher_Bundestag_Volltext.pdf (2003).

(22) Schirmer, A. *Bericht S209/20: Retrospektive Dosisberechnung Röntgenstrahlung.* (2021).

(23) Chumak, V. *et al.* Estimation of radiation gonadal doses for the American-Ukrainian trio study of parental irradiation in Chernobyl cleanup workers and evacuees and germline mutations in their offspring. *J. Radiol. Prot.* 41, 764–791 (2021).

(24) Bazyka, D. *et al.* Field Study of the Possible Effect of Parental Irradiation on the Germline of Children Born to Cleanup Workers and Evacuees of the Chernobyl Nuclear Accident. *Am. J. Epidemiol.* 189, 1451–1460 (2020).

(25) Dubrova, Y. E. *et al.* Human minisatellite mutation rate after the Chernobyl accident. *Nature* 380, 683–686 (1996).

(26) Dubrova, Y. Monitoring of radiation-induced germline mutation in humans. *Swiss Med. Wkly.* 133, 474–478 (2003).

(27) Da Cruz, A. D. *et al.* Microsatellite mutations in the offspring of irradiated parents 19 years after the Cesium-137 accident. *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.* 652, 175–179 (2008).

Strahlenfolgen

DNA-Schäden bei Nachkommen strahlenexponierter Eltern?

DNA-Schäden können indirekt zu genetischen (vererbaren) Erkrankungen führen, indem Verletzungen der DNA in Zellen durch körpereigene natürliche Reparaturmechanismen nicht „erfolgreich“ wiederhergestellt werden. DNA-Strukturstörungen und deren Korrekturen sind in den Zellen des menschlichen Körpers alltäglich. Mögliche fehlerhafte Reparaturen führen zu einer veränderten DNA (Mutation), die an sich nicht krankheitsauslösend wirken muss. Einzelne Mutationen können aber krankheitsverursachend sein. Eltern, die entsprechendes genetische Material in sich tragen, müssen nicht selbst von der Krankheit betroffen sein. Durch eine gesunde Kopie des betreffenden Gens vom anderem Elternteil, bricht die bei Nachkommen mögliche Krankheit nicht unbedingt aus. Gendefekte können dennoch vererbt werden, sind aber ebenso durch sogenannte „Spontanmutationen“ oder „Neumutationen“ auslösbar.

Für die DNA-Analysen in [1] [2] waren die so „vererbten“ Mutationen weitgehend irrelevant; im Mittelpunkt stand (zunächst) die Feststellung von Neumutationen (DNM) in der Folgegeneration von strahlenexponierten Personen. Neumutationen sind DNA-Veränderungen, die weder im Erbgut der Mutter noch des Vaters vorhanden sind und daher neu in der Keimbahn entstanden sein müssen. Pro Generation finden sich im Normalfall zwischen 80 bis 100 DNM. Auch Schadstoffe (sogenannte exogene Noxen) chemischer, biologischer oder physikalischer Art können Verursacher sein. Ionisierende Strahlung z.B. bewirkt in den Stammzellen der Spermien DNA-Mutationen, die über Zellteilungen weitergegeben werden, sodass sie noch Jahre später in den Spermien zu finden sind. Dabei wird ein zufälliger (stochastischer) Strahleneffekt angenommen, also dass es keinen Schwellenwert für das Auftreten von Mutationen/Neumutationen als Folge von Strahlenexposition gibt. Die sich neu entwickelnde Zelle kopiert das Erbgut im Regelfall vollständig. Mögliche Neumutationen entstehen erst während der folgenden Zellteilung nach der Befruchtung einer Eizelle (Konzeption). Genetisch bedingte Erkrankungen können so entstehen, wurden aber im Rahmen der vorliegenden Forschung (noch?) nicht nachgewiesen. Die kausale Komplexität macht diesen Nachweis extrem schwierig. Für die Nachkommenschaft strahlenexponierter Eltern ist eine medizinisch eindeutig belegbare Risikoeinschätzung bisher nicht möglich.

Zu ihren Untersuchungsergebnissen teilten die Autoren [1] [2] mit, dass wissenschaftlich korrekt die festgestell-

ten DNA-Veränderungen der Folgegeneration (transgenerationale Mutationssignatur) noch keinen Nachweis darstellen, dass die ionisierende Strahlung der eindeutige Verursacher sei. Doch ergab die Analyse der DNA der Nachkommen (NK) von Radartechnikern („Radar“), hier ehemaligen Radar-Soldaten der Bundeswehr und NVA, und von Tschernobyl-Liquidatoren („Cancer Research Ukraine - CRU“) bei strahlungsbelasteten Vätern zumindest empirisch eine transgenerationale Mutationssignatur durch ionisierende Strahlung.

Zunächst ging es in [1] [2] um die Feststellung von Neumutationen (DNM) in der Folgegeneration von „Radar“ und „CRU“. „Das Ziel der Radarstudie war es zu bestimmen, ob es durch die Strahlenexposition der Soldaten zu einer erhöhten Rate an Neumutationen gekommen ist.“ [2] Als erforderliche Vergleichs- bzw. Kontroll-Kohorte, sozusagen aus der nicht strahlenexponierten „Normalbevölkerung“, dienten Daten einer „Inova-Studie“ aus den USA (Herkunftseinrichtung Inova Fairfax Medical Center). Ergebnis:

	NK	DNM	DNM/NK
Inova	1.009	79.663	78,95
CRU	129	8.441	65,43
Radar	110	7.407	67,34

Für die Kontroll-Kohorte Inova lag das Zeugungsalter der Väter im Schnitt 5,4 Jahre höher, wodurch eine altersbedingte Zunahme von 1 bis 2 DNM/a zu beachten wäre. Alters-bereinigt läge die Kontrollgruppe mit Neumutationen von etwa 68-70 DNM/NK dennoch leicht über den Neubildungen der exponierten Gruppen. Alle liegen sogar unter dem erwarteten Normalbereich von 80-100 DNM. Die Zahlen der Neumutationen an sich belegen keine Beeinflussung durch ionisierende Strahlung, so dass die Methode auf DNA-Cluster erweitert wurde, sozusagen eine qualitative DNA-Bewertung.

Im Doppelstrang einer DNA bezeichnet man die gegenüberliegenden Bausteine der Nukleinsäure als Basenpaar. Milliarden Basenpaare (bp) sind in den Zellen verteilt. In Fragmenten unterschiedlicher Länge kann man Änderungen im Vergleich der DNA suchen. Methoden und Technik der DNA-Bestimmung sind inzwischen soweit fortgeschritten, dass das gesamte menschliche Erbgut betrachtet und relativ kostengünstig ausgewertet werden kann.

In veränderter Herangehensweise wurde nun untersucht, ob in DNA-Strängen von 6 nm „Länge“ (entspricht 20 bp) zwei oder mehr DNA-Änderungen bei je 110 NK („altersbereinigt“) auftraten. Wenn es in einem 20 bp-Cluster der Fall war, zählte man eine „geclusterte Neumutation“ (cDNM).

Ergebnis:

	NK	cDNM	cDNM/NK
Inova	110	97	0,88
CRU	110	291	2,65
Radar	110	163	1,48

Präziser [1]: „Statistisch zeigt sich, dass geclusterte Neumutationen in Nachkommen exponierter Personen im Durchschnitt häufiger auftreten (Radar $1,48 \pm 1,72$; CRU $2,65 \pm 2,19$) als in einer vergleichbaren, nicht strahlenexponierten Gruppe aus der Normalbevölkerung (Inova $0,88 \pm 0,9$).“ Die Schlussfolgerung der Autoren: „Aufgrund der geringen absoluten Zahl der cDNMs (1-2 pro Nachkommen), ist die klinische Bedeutung dieser Neumutationen ungefähr mit dem paternalen Alterseffekt von einem Jahr Lebensalter des Vaters vergleichbar. ... keine der validierten cDNMs beinhaltete bekannte krankheitsverursachende Varianten ... sowohl die CRU- als auch die neue Radarkohorte enthielten keine Nachkommen mit genetischen Erkrankungen.“

Ein weiterer Aspekt betraf die zugeordnete Strahlenexposition: Inova – ohne Exposition; Radar - Ø 9,2 mSv und CRU 364 mSv. Eine genauere Sondierung der Einschätzungen der Strahlenbelastung der Radarsoldaten erbrachte eine Unterteilung in wahrscheinlich (fast) ohne und in wahrscheinlich mit Exposition. Für 30 exponierten Soldaten würde demnach der Ø-Wert auf 34,35 mSv steigen. Ohne die geschätzten Dosisbelastungen bewerten zu wollen und zu können, ist der Zusammenhang zwischen Strahlungsbelastung der Eltern (hier der Väter) und DNA-Änderungen für die Nachkommen zwar ersichtlich, für erkrankungsrelevante Hinweise wären zumindest präzisere (individuelle) Dosen und u.a. eine höhere Erkennbarkeit von cDNM hilfreich.

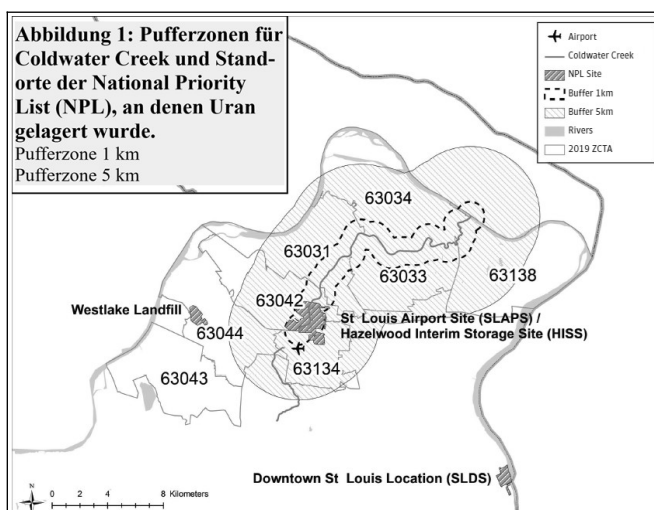
Mit den nun möglichen genomweit molekularen Analysen des Erbguts durch neue Sequenzierungsverfahren können größerer Bereiche der 46 Erbgut-Chromosomen erfasst und bewertet werden. Damit sind DNA-Schädigungen in Nachkommen von strahlenexponierten Eltern immer umfassender erkennbar, wenn sie denn vorhanden sind. Die bisherigen Forschungsergebnisse erwecken die Hoffnung, dass die epidemiologischen Studien und Aussagen auf dem Gebiet der Schadensfolgen ionisierender Strahlung durch die Einbeziehung unverfälschter und individueller Aspekte eine qualitativ hochwertige Ergänzung bekommen. Ein Anfang ist gemacht.

F. L.

[1] [2] F. Brand u.a. „Untersuchung auf DNA-Schäden nach Strahlenexposition bei Nachkommen von Radartechnikern und Tschernobyl-Liquidatoren“ Teil 1 und 2 im Strahlentelex 01/2026 und 02/2026

Uranaltlasten**informativ****Krebsinzidenz durch radioaktive Deponie****Krebsinzidenz in der Umgebung einer Deponie für radioaktive Abfälle des Manhattan-Projektes**

Im Rahmen des US-Atombombenprojektes befand sich mitten in St. Louis eine Uranaufbereitungsanlage, deren Rückstände am Stadtrand abgekippt wurden; in unmittelbarer Nähe eines kleinen Vorfluters zum Missouri, dem Coldwater Creek. Das Material lag dort über Jahrzehnte ungedeckt und in Fässern. Erst Ende der 1980er Jahre übernahm die verantwortliche US-Regierung die Verantwortung für die Kontaminationen des Coldwater und leitete eine Sanierung ein. Bis dahin „...

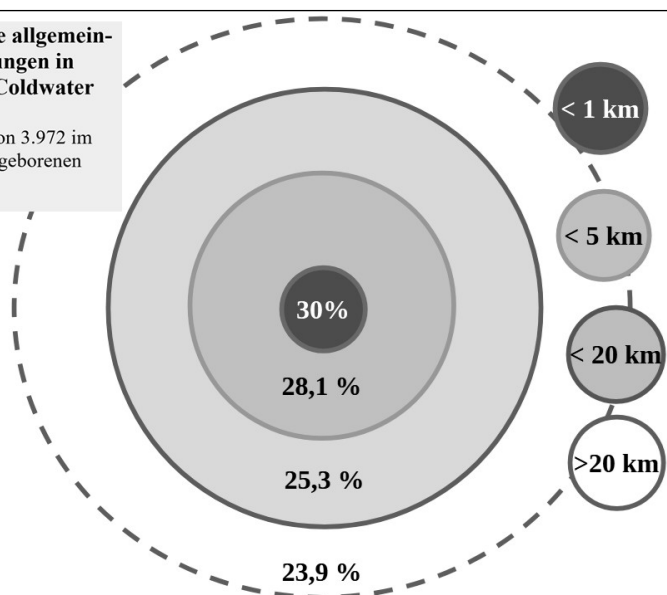


waren die Gemeinden flussabwärts möglicherweise bereits seit Jahrzehnten ionisierender Strahlung ausgesetzt, sowohl durch Freizeitaktivitäten (z. B. Spielen im Bach) als auch durch Wohnaktivitäten (z. B. Einatmen von Staub aus dem Boden der Auen bei der Gartenarbeit).“ ([1] S. 2) Die Ablagerungen aus den 1940er Jahren wurden 1966 nochmals umgelagert; allerdings befand sich diese „Zwischenlagerung“ ebenfalls im Einzugsgebiet des Coldwater Creek. Abb. 1 zeigt den Bachverlauf und die angrenzenden Wohngebiete (in Form der Postleitzahlen). Das Gesundheitsministerium von Missouri analysierte die Krebssterblichkeitsraten des Gebietes: „Die Verschmutzung des Coldwater Creek hat Bedenken hinsichtlich eines erhöhten Krebsrisikos bei den Anwohnern geweckt, was das Gesundheitsministerium von Missouri und die Behörde für toxische Substanzen und Krankheitsregister veranlasste, den Zusammenhang zwischen dem Leben in der Nähe des Coldwater Creek und der Ent-

wicklung von Krebs zu untersuchen.“ Die Studie betraf den Zeitraum 1996-2011, also den Nachsanierungszeitraum (hier nutzbar als Vergleichsstudie). Die vorliegende Untersuchung [1] betraf den möglichen Expositionszeitraum: „Obwohl uns keine genauen Schätzungen der Strahlenbelastung vorliegen, liegen uns die Adressen aller unserer Teilnehmer aus den 1940er bis 1960er Jahren vor. So konnten wir den Zusammenhang zwischen dem Wohnen in der Nähe von Coldwater Creek als Kind vor der Sanierung und der Selbstausskunft über die Krebshäufigkeit untersuchen, die über Umfragen bei der SLBT-Einschreibung erhoben wurde.“ ([1] S. 3) Diese SLBT begann 1958 zur Überprüfung der Auswirkungen der Atombombenversuche und ermöglichte es nun, gezielt auf letztlich 4.209 Probanden zugreifen zu können, die zwischen 1945 und 1966 geboren wurden und 2.834 (2.669 verwertbar) ihre Kindheit im in Abb. 1 dargestellten Expositionsgebiet des Coldwater Creek verbrachten. Zum Vergleich als Referenzpopulation diente eine auf den Großraum St. Louis beschränkte Studienpopulation von 1.375 (1.303 verwertbare) Personen, die dort ihre Kindheit verlebten. In dieser Gruppe war die Exposition vom und der Zugang zum Coldwater Creek (z.B. als Abenteuer- und Spielplatz) wenig wahrscheinlich. Abb. 2 zeigt die Einteilung in sogenannte Expositionsstufen basierend auf den ermittelten konkreten Wohnort der Teilnehmer. Strahlenbelastungen waren zwar unbekannt, doch die Kategorie der angegebenen Wohnnähe von < 1 km, < 5 km, < 20 km und > 20 km stellte einen brauchbaren „Proxy“ (Stellvertreter) für die fehlenden Radionuklidmessungen dar. Abb.2 zeigt grob das Gesamtergebnis der Studie (prozentualer Anteil Krebserkrankungen). Analytische Details differenzierten nach Geschlecht, sozialer und ethnischer Herkunft sowie nach Krebsarten. Zusammengefasst in „erwartungsgemäß strahlenempfindliche und nichtstrahlenempfindliche“ Krebserkrankungen. Als strahlenempfindliche Krebsarten galten nach Erkenntnissen der US-amerikanischen Atomaufsichtsbehörde

Abbildung 2: Rate allgemeiner Krebserkrankungen in Entfernung vom Coldwater Creek

1.009 Krebskranke von 3.972 im Expositionszeitraum geborenen Personen (25,4 %)



(NRC) Brust-, Schilddrüsen-, Leukämie- und Hautkarzinome. Die Erkenntnisse beruhten auf „... akuter externer Ganzkörperbestrahlung (z. B. Überlebende von Atombombenabwürfen), während unsere Teilnehmer chronischer niedrig dosierter externer und/oder interner Bestrahlung ausgesetzt waren, die zu anderen Wegen der Strahlenkarzinogenese führen könnte.“ ([1] S. 7) Und die Ergebnisse der Analyse bestätigten nun, dass bisher als nichtstrahlenempfindliche bewertete Karzinome, wie Lungen-, Gebärmutter-, Hoden-, Dickdarm-, Blasen-, Nieren-, Lymph-, Leber- u.a. weitere Krebsarten „gleichrangig“ zuzuordnen waren. „Wir stellten fest, dass Teilnehmer, die einen Kilometer oder näher wohnten, ein höheres Krebsrisiko hatten als diejenigen, die weiter als 20 Kilometer wohnten, was möglicherweise auf eine bachbedingte Strahlenbelastung als wahrscheinliche Ursache hindeutet.“ ([1] S. 7)

Die Korrelation vom Wohnen in Flussnähe und dem Freizeitverhalten mit der Krebsinzidenz ist eindeutig. Bezogen auf je 10.000 Einwohner stellt Tab. 1 das erhöhte relative Risiko in Entfernung von dem deponiebeeinflussten Gewässer wie folgt dar:

Tab.: 1 Auszug kombinierter Krebs-Ergebnissen und der Nähe zum Coldwater Creek nach ([1] S.6)		
Abstand vom Coldwater Creek	relatives Risiko OR	Standardabweichung KI 95%
< 1 km 20 Krebsarten	1,44	0,96 – 2,14
< 1 km 4 Krebsarten (strahlenbed.)	1,85	1,21 – 2,81
< 5 km 20 Krebsarten	1,27	1,01 – 1,59
< 5 km 4 Krebsarten (strahlenbed.)	1,25	0,97 – 1,62
< 20 km 5 km 20 Krebsarten	1,05	0,89 – 1,25
< 20 km 4 Krebsarten (strahlen..)	1,1	0,9 – 1,34
> 20 km als Bezugsgröße	1,0	

In Tabelle 2 sind die Krebsrisiken geschlechtsspezifisch für den Bereich 0-20 km zusammengefasst. Durchaus plausibel ist ein intensiverer Kontakt der männlichen Kinder mit dem durch radioaktive Nebenprodukte aus der kriegsbedingten Uranverarbeitung kontaminierten Fließgewässer im Stadtgebiet anzunehmen, zumal der Unterschied im Bereich < 1 km noch größer ausfiel als es Tab. 2 zeigt.

Tab.: 2	männlich	weiblich
Alle Krebsarten	2,33 (KI 1,27 – 4,29)	1,02 (KI 0,59 – 1,77)
strahlenbedingte Krebsarten	3,25 (KI 1,7 – 2,6)	1,32 (KI 0,76 – 2,31)

„Wir fanden Hinweise auf eine Dosis-Wirkungs-Beziehung, bei der das Krebsrisiko bei Personen, die weiter als 1 bis 5 km entfernt wohnten, erhöht war, während der Zusammenhang bei Personen, die weiter als 5 bis 20 km entfernt wohnten, abgeschwächt war. ... Wichtig

ist auch, dass bei Teilnehmern, die sich weiter als 1 km entfernt aufhielten, die Assoziationen mit den von uns als strahlenempfindlich eingestuften Krebsarten nicht mehr größer waren als bei Teilnehmern mit nicht strahlenempfindlichen Krebsarten. Dies war hauptsächlich auf die fehlenden Assoziationen mit Brustkrebs und Leukämie zurückzuführen, trotz des starken Signals für Schilddrüsenkrebs (und in geringerem Maße für Basalzellkarzinom der Haut). Insgesamt weisen diese Ergebnisse darauf hin, wie wichtig es sein kann, die Strahlenbelastung über die unmittelbare Flussaue hinaus zu bewerten.“ ([1] S. 7) Da nur vier strahlenbedingte Krebsarten in die Bilanz eingingen, ist z.B. radonbedingter Lungenkrebs aus der Betrachtung verfälschend ausgeschlossen.

Ein Vergleich mit der Studie des Untersuchungszeitraumes 1996-2011 ist schwierig, da die Ermittler dort „... keinen Zusammenhang zwischen historischer Strahlenexposition und einzelnen Krebsfällen herstellten. Stattdessen versuchten sie, die Strahlenbelastung Jahrzehnte zuvor anhand verschiedener Annahmen zu rekonstruieren (z. B. Bodenbelastung durch Aktivitäten im Zusammenhang mit Bächen). Unser Ansatz benötigt keine solchen Annahmen, da er kein spezifisches Strahlenexpositions-niveau definiert.“ ([1] S.8) Mit der nunmehrigen Herangehensweise leiteten die Autoren [1] für das Leben in Entfernung vom Coldwater Creek statt eines geringen, ein deutliches zusätzliches Krebsrisiko ab: 1- 5 km etwa 700 zusätzliche Fällen pro 10.000 Einwohnern (29 % erhöhtes Krebsrisiko), 5 – 20 km etwa 450 / 10.000 Einwohner (19 % erhöhtes Risiko) und > 20 Kilometer etwa 90 / 10.000 Einwohner (4 % erhöhtes Risiko). Im Vergleich zu Tabelle 1 fallen Unterschiede auf, die auf die Bezugnahme verschiedener Ausgangsdaten zurückzuführen sind.

Im Rahmen der Fehlerbetrachtung ist von einschränkender Signifikanz der dargestellten Ergebnisse auszugehen, die sozusagen nur einen geschätzten Trend darstellen können. Dennoch handelt es sich um eine gelungene spezifizierte Analyse der potenziellen Auswirkungen der Exposition von Kindern gegenüber radiologischen Schadstoffen im Coldwater Creek vor der Sanierung (vgl. „Stärke und Schwächen“ in [1] S. 8). Gegenüber einer epidemiologischen Betrachtung mit Zuordnung theorsierenden, eigentlich unbekannten Strahlenexpositionen, konnte die „Beobachtungsstudie“ plausible Erkenntnisse liefern.

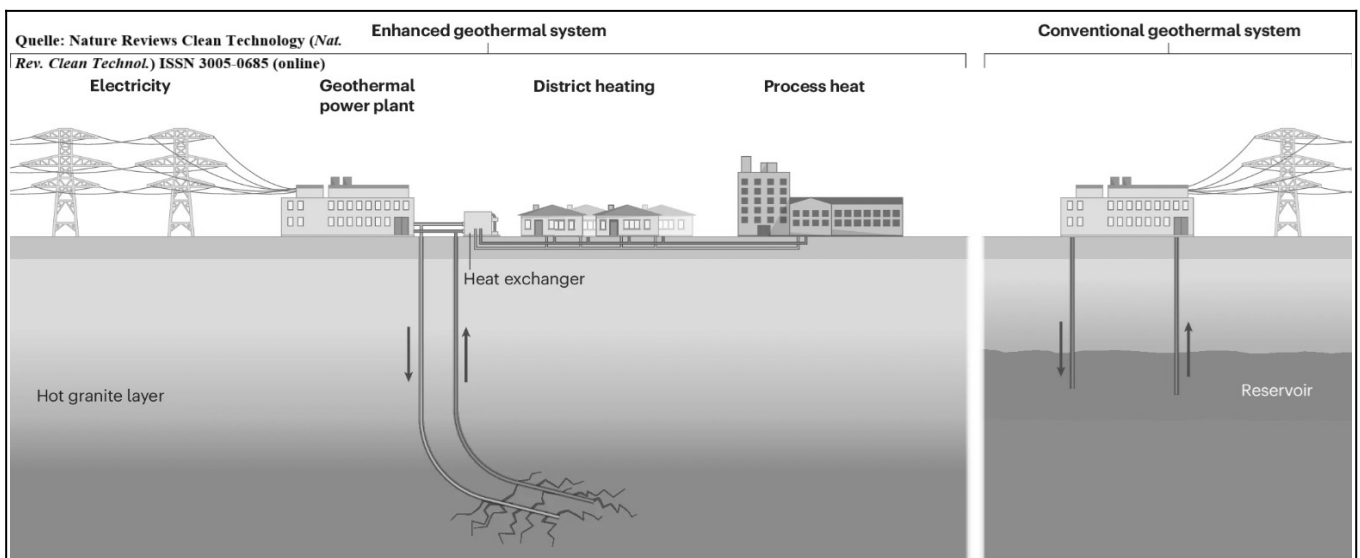
F. L.

[1] Michael Leung et al.: „Cancer Incidence and Childhood Residence Near the Coldwater Creek Radioactive Waste Site“, JAMA Netw Open, Published Online: July 16, 2025 doi:10.1001/jamanetworkopen.2025.21926

Aktuelles zu alternativen Energien **informativ** Geothermie mittels Fracking

Die Geothermie gilt seit über 50 Jahren als eine der umweltfreundlichsten Wärme- und Energieerzeugungsart, die allerdings an wenigen privilegierten Standorten über ausreichend Wasser, Wärme, akzeptable Tiefen und durchlässiges Gestein verfügt. Aus dem bisherigen Schattendasein soll das in den letzten Jahren zur großtechnischen Reife gelangte Verfahren „**Verbesserte Geothermiesysteme - Enhanced Geothermal Systems (EGS)**“ führen. Hinter dem Begriff steht die Technologie des Frackings. Seit 2020 richtete man in den USA diese Technologie großtechnisch auf Geothermie aus. Entwickelt wurde EGS aber in Europa und insbesondere in Deutschland. Jedoch auf Grund techni-

„Der Flüssigkeitsfluss wird erhöht, indem Injektions- und Förderbohrungen in heißes Gestein gebohrt und seine Durchlässigkeit durch Brechen oder auf andere Weise verbessert werden (in Abbildung links). ... Das heiße Wasser wird dann an die Oberfläche abgesaugt, wo es zum Heizen verwendet und/oder in Strom umgewandelt werden kann. Strom wird häufig durch Dampfturbinen oder in Kraftwerken mit binärem Kreislauf erzeugt. Konventionelle geothermische Systeme extrahieren ebenfalls heißes Wasser und Dampf, stützen sich aber auf natürliche Reservoirs und sind tendenziell flacher.“ [2] Im Detail sind die geologischen Bedingungen, vor allem das Antreffen vertikaler natürlicher Bruchverläufe ausschlaggebend. Daher konzentrieren sich EGS bisher im erweiterten Umfeld natürlich vorkommender Geothermiegebiete. Das i.d.R. auch dort aktive tektonische Umfeld weist zwar ausreichende Brüche



scher Grenzen und Schwierigkeiten, aber auch durch Proteste von Kommunen und Umweltverbänden kommt es nicht über Stadien von Forschungsprojekten und diversen Kleinanlagen hinaus. Z.B. sind im Oberrheingraben 4 EGS-Kraftwerke mit einer Leistung bis 5 MW in Betrieb. In den USA baut die Firma Fervo Energy [1] Großprojekt(e) auf, die ab 2026 aus dem „Geothermieprojekt Cape Station“ im Südwesten Utahs Strom liefern werden. Bis 2028 sind 400 MW vorgesehen, die bis auf 2 GW Stromlieferung ausgedehnt werden sollen. Bis dato hat Fervo lediglich eine 2023 in Betrieb gegangene 3,2 MW-EGS-Anlage in Nevada fertiggestellt. Mit EGS will man Gebiete erschließen, die mit konventionellen Geothermiesystemen (in der Abbildung rechts) nicht betrieben werden könnten. D.h., es wird wesentlich tiefer gebohrt, bis Wasser von einer Oberflächenstation in ein heißes Reservoir gepumpt werden kann. Dort erhitzt es sich. Es muss jedoch die Durchlässigkeit von heißem Gestein geschaffen werden.

und Risse auf, die aber auf Grund Versiegelung erst „nutzbar“ gemacht werden müssen, man nennt das „Stimulierung durch Bohrlochtrajektorierung“ mit Fluid-Sohlen $> 100 \text{ g/l}$. „EGS-Stimulationen erfolgen durch die Ausbreitung künstlich erzeugter Brüche und/oder das Öffnen und Scheren von bereits bestehenden Brüchen, die natürlich im Gestein vorkommen. Die Stimulation ist der Schlüssel, um den Flüssigkeitsfluss im EGS zu ermöglichen, kann aber auch Seismizität induzieren, die kontrolliert werden muss.“ [2] S. 152 Unklar bleibt, wie viel alte, natürliche Risse aktiviert werden oder eben neu entstehen. Das ist wichtig für die schlecht kalkulierbaren Folgen der Eingriffe auf die seismische Aktivitäten.

Der Aufwand wird um so höher, je geringer die Permeabilität der nutzbaren Formationen ist. Also nicht jedes Bohrfeld bis 2,5 ... 5 km Tiefe garantiert Geothermie. Hier ist viel Know-how vonnöten. Der Teufel steckt dann im Detail der Stimulierungsumfänge, Injektionsraten und -drücke, Stützmittelwahl, des Aufwandes für

Schräg- und Horizontalbohrungen u.a.m. Durch die Nutzung der in den USA inzwischen stark optimierten fossiler Fracking- Technologien werden wirtschaftliche Bohrzeiten erreicht und vergleichsweise preiswertere Techniken eingesetzt. Allerdings: „EGS kann während der Stimulation und des Betriebs Erdbeben verursachen.“ [2] S. 154 Dem versucht man mit parallel eingezogener Glasfaser-Messtechnik und umfangreichen Messungen, deren Auswertungen vor Ort und daraus abgeleiteten Betriebskorrekturen zu begegnen; bis hin zur Betriebseinstellung.

Zum genauen Stand der Arbeiten des Fervo-Projetes in Utah dringt nicht viel nach außen. Das Unternehmen verweist zuletzt auf eine Pressemitteilung ihres Zulieferers, die einige Details zu (vollmundigen) Projektfortschritten enthält und daher an dieser Stelle ausführlicher zitiert wird: „Houston, Texas – 2. Oktober 2025 – Turboden America LLC., Tochtergesellschaft von Turboden S.p.A. (Unternehmen der Mitsubishi Heavy Industries Group), freut sich, den Zuschlag für die Phase II des wegweisenden Geothermieprojekts Cape Station in Utah, USA, bekannt zu geben und damit die Zusammenarbeit mit Fervo Energy weiter zu stärken.

Im Rahmen dieser neuen Phase wird Turboden Ausrüstung für drei Organic Rankine Cycle (ORC)-Blöcke mit einer Bruttokapazität von jeweils 60 MWe liefern, was insgesamt 180 MW an zusätzlichem, sauberem, regelbarem Strom entspricht. Diese Blöcke stellen die zweite Generation des modularen Kraftwerkskonzepts von Fervo dar.

Diese Auszeichnung folgt auf die erfolgreiche Vergabe von ORC-Einheiten an Turboden für Fervos Cape Phase I, die kurz vor der Inbetriebnahme steht. Das Commercial Operation Date (COD) für Phase I ist für 2026 geplant und markiert einen wichtigen Meilenstein bei der großflächigen Implementierung von Enhanced Geothermal Systems (EGS).

Mit der Lieferung von drei Gen 2-Einheiten werden die Turboden-Einheiten am Standort Cape Station 300 MWe Strom erzeugen und sind damit eine der größten geothermischen Anlagen ihrer Art weltweit.

Das Phase-II-Engineering und die Beschaffung der Kernausrüstung von ORC – einschließlich der proprietären Turbinen und des Steuerungssystems von Turboden – werden bis 2028 geliefert und in Betrieb genommen, was die langfristige Vision beider Unternehmen stärkt, das Netz rund um die Uhr mit kohlenstofffreier Energie zu versorgen.“ [3]

Aber auch in Deutschland tut sich einiges. Das Unternehmen Turboden erhielt den Zuschlag zur Lieferung

eines 32 Mwe Geothermiekraftwerks für das Lithiumprojekt (Lionheart) von Vulcan Energy im deutschen Lindau. Das italienischen Konsortium will mit der ORC-Technologie (Organic Rankine Cycle) von Turboden Strom erzeugen, bei der geothermische Wärme aus derselben Solequelle umgewandelt wird, die auch für die Lithiumgewinnung verwendet wird; sozusagen eine emissionsfreie Stromversorgung als Nebenprodukt der Lithiumproduktion in der Geothermie-Lithium-Extraktionsanlage (G-LEP) von Vulcan. Das Vorhaben bezieht die Kommune durch die Bereitstellung von Erdwärme für die lokale Fernwärme mit ein. Das Projekt Lionheart liegt im Solefeld des Oberrheins an der Grenze Deutschland-Frankreich, wo sich die größte Lithiumressource Europas befinden soll. Aber das ist bereits ein anderes Thema...

Zusammengefasst ist festzustellen, dass Erdwärmege- winnung mittels Fracking sich in dicht besiedelten Gebieten infolge akuter lokaler Erdbebengefahren nicht durchsetzen sollte. In Länder mit großen unbesiedelten Gebieten wird sich die Technologie nur durchsetzen können, wenn die nach wie vor hohen technischen Aufwendungen weiter reduziert und geeignete geologische Bedingungen gefunden werden können. In den USA räumt man dem Verfahren Chancen ein, wenn ein Erzeugungspreis (Stromgestehungskosten) von 5-6 Ct/kWh erreicht wird.

Ergänzung: Die Geothermienutzung ohne Fracking findet in Deutschland Anwendung in Ballungszentren, wie München (Riem und Neue Messe) und Berlin (Steglitz) und soll auf Grund neuartiger „erdbebensicherer hydrothermalen Bohrverfahren“ weiter ausgebaut werden. „Bohrungen für Geothermie-Kraftwerke hatten z.B. 2006 bei Basel und 2019 bei Straßburg Erdbeben ausgelöst, Häuser wurden beschädigt.“ [4]

F. L.

[1] Technologie - Fervo Energy

[2] Roland Horne u.a., „Enhanced geothermal systems for clean firm energy generation“, nature reviews clean technology; <https://doi.org/10.1038/s44359-024-00019-9>

[3] www.turboden.com/company/media/press

[4] Frankfurter Rundschau v. 28.07.24 S. 8 „Geothermie wird günstiger“ vom Joachim Wille

Uranbergbau-Altlasten Radioaktivität durch Uran-Altlasten im urbanen Bereich

Karsten Hansky

Seit 1955 befand sich am Stadtrand von Ronneburg, in der Nähe der Brunnenstraße der Wismut Schacht 370. Das geförderte Haufwerk wurde mittels Bandbrücke über die Brunnenstraße transportiert und unmittelbar danach als Kegelhalde abgelagert (Halde 370) [1].

Wegen des Baus der Werksbahn war die Umlagerung der Kegelhalde zur Tafelhalde 370 notwendig. Das Haufwerk des Schachtes 370 wurde ab 1966 bis auf eine flache Resthalde abgetragen und zum Teil zum Bau des Bahndammes im Tal des Brunnenholzes verwendet. Ab April 2003 wurde die Resthalde abgetragen und in das Tagebaurestloch Lichtenberg verbracht [2][3].

Drei Mitglieder des Umweltkreises Ronneburg haben am 24.7.2025 eine Begehung des Bahndamms durchgeführt. Ziel war es zu untersuchen, ob im Bereich des Bahndamms eine erhöhte radioaktive Belastung vorliegt.

Zur Messung und Analyse kamen verschiedene Strahlungsmessgeräte zum Einsatz:

- RadiaCode 103
- Measall KC761B als Gammaspektrometer
- FAG FH40F2M
- automess 6150 AD6
- AlphaHound zur Detektion von Alpha- und Betastrahlung
- Aranet Radon+ zur Messung der Radonexhalation



Abb. 3: Fundort des aktiven Steins, dieser wurde bereits ausgegraben

Die Messergebnisse aller Geräte waren, im Rahmen ihrer Messaufgabe, untereinander konsistent.

Die Begehung des Bahndamms im Tal des Brunnenholzes ergab eine leichte Erhöhung der Gamma-Ortsdosisleistung auf Werte zwischen 0,2 $\mu\text{Sv/h}$ und 0,6 $\mu\text{Sv/h}$, wäh-

rend abseits des Bahndamms Werte $< 0,1 \mu\text{Sv/h}$ gemessen wurden. Trotz Abdeckung des verbauten Haldenmaterials ist also dennoch eine Erhöhung der Gamma-Ortsdosisleistung zu verzeichnen, wenn auch nicht in einem besorgniserregenden Maße.

Abbildung 1 zeigt die abgelaufene Wegstrecke. In Bildmitte ist die Erhöhung der Ortsdosisleistung direkt am Bahndamm zu sehen.

Die Begehung endete an der Eisenbahnbrücke über die Brunnenstraße. Hier sollte untersucht werden, ob im oberen Bereich des Bahndamms eine erhöhte Strahlenbelastung vorliegt.

Abbildung 2 zeigt ein Foto der Eisenbahnbrücke. Auf dem oberen Teil der Böschung sind wir bei folgenden Koordinaten fündig geworden:

- 50.85401 N
- 12.18923 E

Dort haben wir, oben auf dem Bahndamm liegend, einen großen Stein gefunden, der eine beträchtliche Aktivität hat. Abbildung 3

zeigt den Stein am Fundort. Er lag in einer Vertiefung im Boden, seine große Oberfläche lag frei.

Eine erste Messung ergab eine Dosisleistung von mehr als 6 $\mu\text{Sv/h}$ bei aufgelegtem Messgerät (Abbildung 4). Es wurden weitere Messungen auf der Oberfläche durchgeführt und Dosisleistungen von knapp unter 2 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen (Abbildung 5). Für weitere Analysen wurde eine Bodenprobe entnommen, die zusammen mit dem Stein später untersucht wurde. Die Bodenprobe und der Stein wurden in einem Trockenofen getrocknet. Organisches Material in der Bodenprobe wurde per



Abb. 1: Gamma-Ortsdosisleistung entlang des abgelaufenen Weges

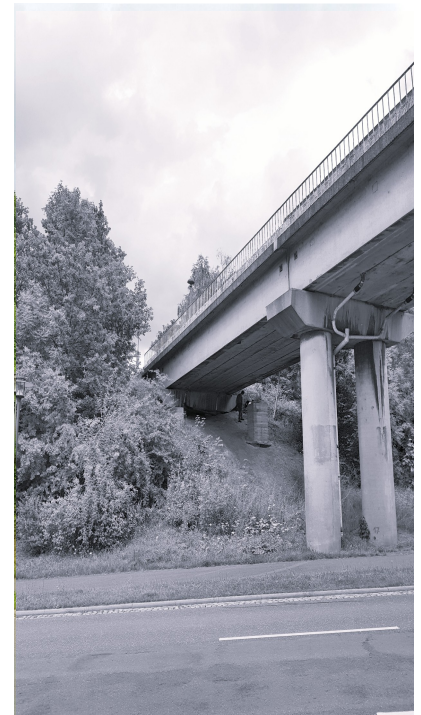


Abb. 2: Eisenbahnbrücke über die Brunnenstraße, östliche Seite



Abb. 4: Dosisleistung des Steins
>6 $\mu\text{Sv/h}$



Abb. 5: Messungen an der Oberseite des Bahndamms



Abb. 6: Gammasktrum der getrockneten Bodenprobe

Hand aussortiert. Am Ende standen ca. 1 kg Probenmaterial zur Verfügung.

Im ersten Schritt wurde die Bodenprobe mit einem Gammasktrometer untersucht. Wie zu erwarten, zeigte sich nach kurzer Zeit ein Spektrum von Radium-226 und dessen Tochternukliden Blei-214 und Bismut-214 (Abbildung 6). Radium-226 ist Glied der Uran-Radium-Zerfallsreihe, womit der Nachweis erbracht ist, dass die Ursache der gemessenen Strahlung Uran in den Proben ist. Die Dosisleistung der Bodenprobe betrug etwas über 0,5 $\mu\text{Sv/h}$.

An der aktivsten Stelle des gefundenen Steins kann eine Dosisleistung von mehr als 5 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen werden (Abbildung 7).

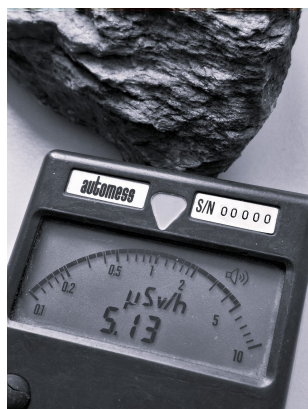


Abb. 7: Dosisleistungsmessung am Stein

Mit einem AlphaHound der Fa. RadView Detection wurde der Stein auf die Emission Alpha- und Betastrahlung überprüft. Im Video auf [4] kann man sehen, das sowohl Alpha- als auch Betastrahlung nachgewiesen werden kann. Auch bei dieser Messung wurde eine Dosisleistung von mehr als 5 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen.

Die Emission von Alphastrahlung ist aufgrund ihrer geringen Reichweite der Nachweis, dass die Strahlung nicht nur aus dem Inneren des Steins erfolgt, sondern auch von dessen Oberfläche emittiert wird. Es besteht also auch Kontaminationsgefahr.

Zuletzt wurde die Radonexhalation der Erdprobe untersucht. Es wurde ein 5 Liter Behälter ohne weitere Abdichtung zur Tischplatte über den geöffneten Probenbehälter gestülpt. Innerhalb von 2,5 Stunden stieg der Messwert der Radonkonzentration auf fast 5.300 Bq/m³ an.

Fazit

Der Bahndamm hat einen dichten Baumbestand mit relativ viel Unterholz. An Stellen mit geringer bzw. gestörter Abdeckung wurden Gammadosisleistungen von 0,4 $\mu\text{Sv/h}$ bis 0,6 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen.

Nach [5] gehört der durchschnittliche Uran-Radiumgehalt von 70 g/t U und 0,7-1,0 Bq/g Ra des in den Damm eingebauten Haldenmaterials zu den höchsten Konzentrationen der 16 im Jahre 1990 vorhandenen und inzwischen sanierten Wismut-Halden Ronneburgs. Im Unterschied zu den sanierten Haldenflächen gehen von dem Bahndamm radiologische Strahlungskomponenten aus, die eine Überprüfung rechtfertigen, ob es sich hierbei um eine sanierungswürdige radioaktive Altlast in Bezug auf die nahe liegende Wohnbebauung handelt.

Die Halbjahresdurchschnittswerte der atmosphärischen Radonkonzentration im Brunnenholz im Vergleich zum Mittel des Stadtgebietes zeigen bis heute deutliche Auffälligkeiten. Die Radonwerte an der ersten Wohnbebauung sind gegenüber dem ortsüblichen Durchschnitt mehr als doppelt so hoch [5]. Eine strahlenschutzrechtliche Prüfung des Areals zur Feststellung einer radioaktiven Altlast nach § 136 StrSchG ist angebracht. Dabei wird festzustellen sein, inwieweit durch eine „... *Kontamination eine Exposition verursacht wird oder werden kann, durch die für Einzelpersonen der Bevölkerung der Referenzwert der effektiven Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr überschritten wird.*“ [6]

Unser Autor Dr. Ing. Karsten Hansky ist Informatiker und als Softwareentwickler für Wasseranalysegeräte tätig.

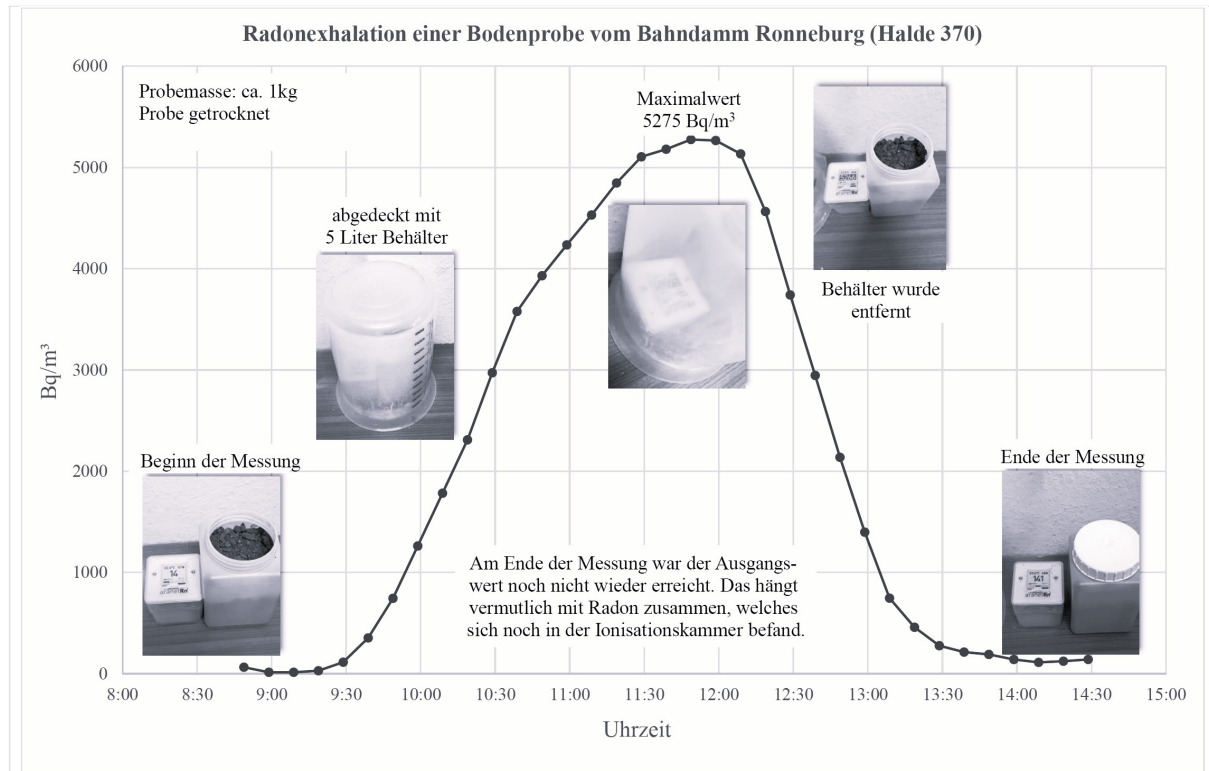


Abb. 8: Messung der Radonexhalation der getrockneten Bodenprobe

Literatur/Links

- [1] Bergbautraditionsverein – Wismut: Ehemaliger Schacht 370. 17.3.2026.- <https://www.bergbautraditionsverein-wismut.de/ehemaliger-schacht-370.html>
- [2] Bergbauverein Ronneburg e.V.: Haldenübersicht Raum Ronneburg. 17.3.2026. - <http://bergbauverein-ronneburg.de/index.php/uebersichten/halden-ronneburg>
- [3] Bergbauverein Ronneburg e.V.: Bergbaubetrieb Schmirchau - Haldenwirtschaft. 17.3.2026. -

- <http://bergbauverein-ronneburg.de/index.php/bergbaubetriebe/bergbaubetrieb-schmirchau>
- [4] YouTube – dl3hrt: Radioaktiver Stein von einem Bahndamm in Ronneburg/Thüringen. 17.3.2026.- https://www.youtube.com/shorts/77AsHXPG_s0
- [5] Strahlentelex 04/2025 S. 20 „Uranaltlast im Stadtgebiet Ronneburg: Das geteilte Brunnenholz“
- [6] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz – StrlSchG) § 136 Begriff (1)

In eigener Sache zur 20. Ausgabe des Strahlentelex eine Auswertung des Registers

Als wir 2021 an die Fortführung des bis 2018 herausgegebenen renommierten Strahlentelex gingen, planten wir zunächst mit der Weitergabe des Wissen unserer immerhin ältesten Bürgerbewegung Thüringens, das sich auf dem Gebiet der anthropogenen ionisierenden Strahlenbelastung in mehr als drei Jahrzehnten angesammelt hat. Obwohl ein deutlicher Rückgang des Umweltinteresses und auch des Umweltengagements in weiten Teilen der bundesdeutschen Gesellschaft bereits seit einigen Jahren zu verzeichnen war, hofften wir einen Informationsdienst aufzubauen, der an den Vorgänger-Strahlentelex anknüpfte. Im Bewusstsein, dass wir mit der natürlichen Radioaktivität ein gesamtgesellschaftliches Nischenthema „bedienen“ und auf dem Gebiet der Atomkraft sowie allgemeiner Umweltproblematiken sich bereits ausreichend Zeitschriften, Institute, Vereine und NGO befinden und teilweise ums Überleben kämpfen, lag uns die Fortführung einer absolut unabhängigen und vor allem fachlich qualifizierten Tradition am Herzen. Eine Tradition, die hier im Osten nicht nur gegen Reglementierungen, sondern nicht selten gegen Restriktionen entstand. Beides gibt es heute noch (oder wieder) in wechselnden Erscheinungsformen. Die richtige Zeit also für ein lobbyfreies unabhängiges Informationsblatt für „Radioaktivität, Strahlung, Radon-Belastungen sowie aktuellen Umweltproblemen“.

In den 20 Strahlentelexausgaben erschienen auf fast 400 Seiten 185 Beiträge, an denen 27 Autoren beteiligt waren, die 35 Artikel verfassten. 5 Beiträge wurden von mehreren Autoren bearbeitet, andererseits trugen 8 Autoren mehr als einen Beitrag bei. 35 Artikel von 185 entsprechen 19 %. Bei fachspezifischen Veröffentlichungen betrug der Gastautorenanteil fast ein Drittel (17 von 56). In der Kategorie der Fachbeiträge gelang so eine ausgewogene Autorenschaft für komplexe und schwierig zu vermittelnde Themen der ionisierenden und nichtionisierenden Strahlung zu gewinnen, die nicht nur in Uranbergbauregionen anzutreffen sind, sondern den Menschen auch oft genug im Alltag begegnen. Herzlichen Dank allen Autoren.

Strahlentelex 01/21 - 02/26	Gast-beiträge	Gesamt-anzahl	Anteil Gast-beiträge
Fachbeiträge FB	17	56	30 %
Informationsbeiträge IB	12	92	13 %
Informationen	1	22	5 %
Rezensionen/Empfehlungen R/E	2	7	29 %
Meinung	3	8	38 %
Gesamt	35	185	19 %

Atomkraftwerke**informativ****Mehr Krebs in der Nähe von Atomkraftwerken in den USA****Inge Schmitz-Feuerhake**

Kommentar zu der Havard-Studie „National analysis of cancer mortality and proximity to nuclear power plants in the United States“ vom Februar 2026, publiziert von Nature [1]

Die Autoren haben in der Nähe sämtlicher betriebenen AKW in den USA zwischen 2000-2018 eine deutlich erhöhte Krebssterblichkeit in der erwachsenen Bevölkerung festgestellt. Vorausgegangen war eine Untersuchung über die Krebsinzidenz im Bundesland Massachusetts anhand des Landeskrebsregisters im gleichen Zeitraum [2]. Dabei konnte man in den Nahgebieten eine Überschussrate von 4,1 % Krebsinzidenz im Vergleich zur Massachusetts-Inzidenz nachweisen. Während man in letzterer Studie die spezifischen Krebserkrankungen bei festgeschriebener Distanz ermittelte, wurden die Mortalitäten bei der neuen Arbeit in Abhängigkeit vom Abstand zum AKW bestimmt. Es zeigte sich eine spezifische Abhängigkeit vom Abstand derart, dass die Krebsrate ab etwa 50 km deutlich anstieg, je näher die Bevölkerung beim AKW angesiedelt war.

Die Überschussraten in den Nahgebieten ergaben sich in den verschiedenen Altersgruppen zu Werten zwischen 0,4 % (Männer im Alter 35-45) und 2,1 % (Frauen im Alter 55-64). Die Anzahl Nahbewohner mit überschüssiger Krebsmortalität ermittelten sich zu 115 586 Personen, das entspricht einer Rate von etwa 11600 Toten pro Jahr.

Die Autoren weisen darauf hin, dass ihre Ergebnisse nur eine Korrelation darstellen und keine Kausalität bedeuten. Sie sind aber kongruent zu vielen Beobachtungen auch in anderen Ländern. Bei der von ihnen zitierten KiKK-Studie aus Deutschland, in der erhöhte Leukämieraten bei Kleinkindern in der Nähe der AKW festgestellt wurden [3], kam die deutsche Strahlenschutzkommission zu dem Schluss, dass ein Zusammenhang mit Radioaktivität wegen zu niedriger Dosis auszuschließen ist und die Ursachen bislang ungeklärt sind. Noch 2017 tippte sie auf eine Störung des Immunsystems bzw. eine virusbedingte Ursache [4] getreu der Hypothese des langjährigen Lieblinges der Atomlobby Prof. Leo Kinlen. Dieser meinte zu beobachten, dass „Population Mixing“ die Ursache ist, weil zum Errichten der Nuklearanlage Fremde erscheinen, auf deren Keime die einheimische Bevölkerung nicht vorbereitet

war. Kinlen geriet jedoch in den Sog der Korruptionsvorwürfe gegen seinen ehemaligen Mentor Sir Richard Doll, weil beide 1977 Daten über die Krebsgefährdung durch Fluor zurückgehalten hatten, um den Befürwortern der Fluoridierung des Trinkwassers entgegenzukommen [5]. Richard Doll war der Hauptgutachter in dem Prozess, den Familien vergeblich gegen British Nuclear Fuels anstrebten, weil in der Umgebung der Wiederaufarbeitungsanlage für Kernbrennstoffe in Selafeld kindliche Leukämiefälle aufgetreten waren. Er berief sich dabei auf die Erkenntnisse seines früheren Mitarbeiters Kinlen. Doll bescheinigte auch, dass das in Vietnam eingesetzte Agent Orange (Dioxin) nicht krebserregend sei. Nach seinem Tod 2005 stellte sich heraus, dass er bei der Firma Monsanto einen hochdotierten Beratervertrag gehabt und auch bei anderen Pharmakonzernen die Hand aufgehalten hatte.

Aktuell ist der Autor Kinlen nun weniger gefragt und ein Leukämievirus wurde bislang trotz der Forschungsvorschläge der SSK nicht entdeckt. Die Berater der Regierungen werden aber auf Grund der Befunde der Harvard-Gruppe nun wieder fordern, dass andere Ursachen als Strahlung beforscht werden müssen.

Laufende Atomkraftwerke geben aber bekanntlich kontinuierlich radioaktive Stoffe an die Umwelt ab und bei zahlreichen anderen Anwendungen wurde inzwischen bestätigt, dass auch sehr niedrige Dosen Zellmutationen und Krebs erzeugen.

Unsere Autorin Prof. Dr. rer. nat. Inge Schmitz-Feuerhake, emeritierte Hochschullehrerin für Physik an der Universität Bremen, ist Präsidentin der Gesellschaft für Strahlenschutz e.V.

Die Studie selbst stellen wir im nächsten Strahlentelex etwas ausführlicher vor.

[1] Alwadi J, Alahmad B, Zilli Vielra CL, Landrigen PJ, Christiani DC, Garshick E, Kaltofen M, Coull B, Schwartz J, Evans JS, Koutrakis P: National analysis of cancer mortality and proximity to nuclear power plants in the United States. *Nature Communications* 17 (2026):1560 <https://doi.org/10.1038/s41467-026-69285-4>

[2] Alwadi J, Evans JS, Schwartz J, Zilli Vielra CL, Christiani DC, Coull B, Koutrakis P: Residential proximity to nuclear power plants and cancer incidence in Massachusetts, USA (2000-2018) *Environmental Health* 24 (2025):92 <https://doi.org/10.1186/s12940-025-01248-6>

[3] Spix C, Schmiedel S, Kaatsch P, Schulze-Rath R, Blettner M: Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003. *European Journal of Cancer* 44 (2008) 275-284

[4] SSK; Ursachenforschung zu Leukämien bei Kindern und Jugendlichen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission vom 19./20. Juni 2017

[5] IAOMIT International Academy of Oral Medicine and Toxicology (USA). News 1/09/2007 The Doll-Hoover-Douglas connections. By Chris Neurath