

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 81 (2024)

Artikel: Ausfällung von Uran in Moorgebieten unterhalb der Moosalp, nahe Visp im Wallis
Autor: Stucki, Ruedi
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1062015>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ausfällung von Uran in Moorgebieten unterhalb der Moosalp, nahe Visp im Wallis

Autor
Ruedi Stucki

Unterhalb der Moosalp finden sich einige Moor- und Sumpfgebiete mit deutlich erhöhtem Pegel ionisierender Strahlung. In dieser Arbeit wird anhand von Bodenproben und mithilfe der Gammask spektroskopie gezeigt, dass die Strahlung von Uran stammt, welches im chemisch reduktiven Milieu des Moorbodens fixiert wird. Von einer der Bodenproben wurde der Urangehalt gemessen. Es werden ausführlich die Untersuchungsmethoden erläutert und die Resultate diskutiert. Nebenher wird ein Blick auf das Radonproblem geworfen.

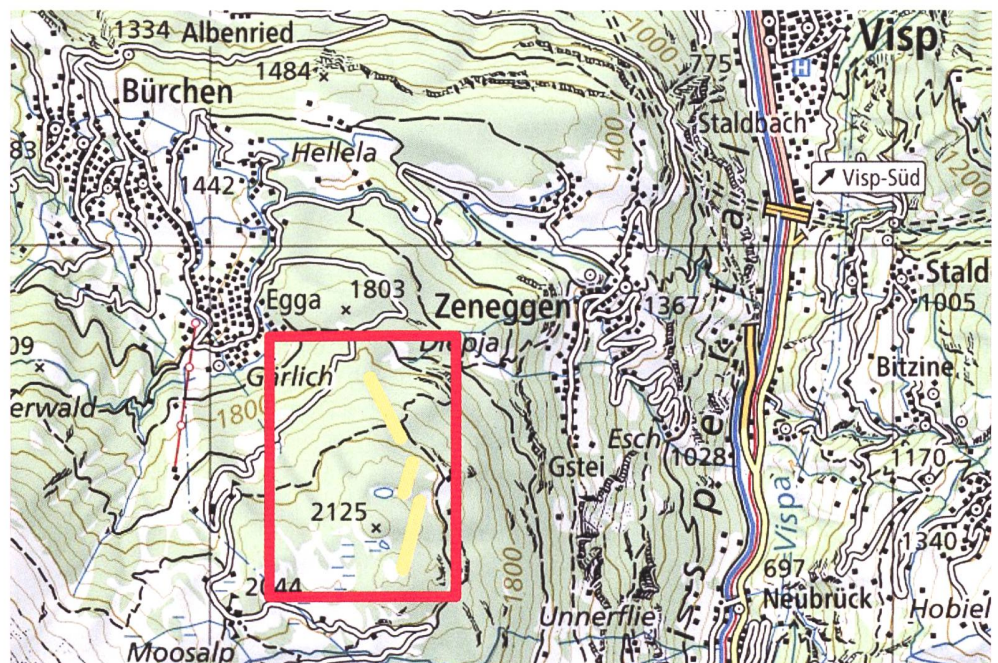


Abb. 1: Das rot umrandete Rechteck zeigt das Untersuchungsgebiet in Abb. 3. Die Zone der Uranvererzung ist gelb eingezeichnet. Es wurde dazu die «Landeskarte 1:100 000» bearbeitet (MAP.GEO.ADMIN.CH 2024a).

Einleitung

Dieser Bericht ist als eigentliche Fortsetzung der Arbeit «Radio-metrische Anomalien in der Umgebung von Törbel, nahe Visp im Wallis» des Autors in den NGB-Mitteilungen 2023 (STUCKI 2023b) zu verstehen. Daher gehen wir hier generell nicht noch einmal auf Inhalte ein, welche bereits dort besprochen wurden. In *Abb. 1* findet sich die geografische Orientierung.

Die Hochebene der Moosalp zeigt ein fast tundraähnliches Gesicht mit vielen Seelein, Tümpeln und Mooregebieten, typisch dafür beispielsweise der schöne Bonigersee in *Abb. 2*. Am Abhang rund um die Moosalp finden sich unzählige Wasserquellen, meist verbunden mit grösseren und kleineren Sumpf- und Mooregebieten. Zwischen der Moosalp und einigen dieser Quellen liegt eine fast zwei Kilometer lange Zone mit teilweise ausserordentlich hohen Pegeln ionisierender Strahlung, bis zum Tausendfachen des natürlichen Hintergrunds. Diese Anomalien gehen auf einen eigentlichen Lagergang von Uranmineralisationen zurück, mit gelegentlichen Ausbissen, aber meist unter der Moräne verborgen. Man könnte das Erzlager vielleicht als mehrfach verworfene, nur einige cm dünne Platte deuten, welche mit etwa 30° gegen Nordwesten einfällt und wahrscheinlich nicht durchgehend stark vererzt ist. Die Mineralisationen finden sich ausschliesslich in dunklen Schiefern.

In *Abb. 3* ist die Situation dargestellt. Verglichen mit der entsprechenden Karte in STUCKI (2023b) dehnt sich die Zone noch etwas weiter gegen Nordwesten aus mit noch einmal einem Ausbiss mit sehr hohem Strahlungspegel (TA11-32 in *Abb. 3*).

Etwas unterhalb, jedoch meistens in unmittelbarer Nähe der Zone, liegen nun vier Sumpfgebiete mit deutlichen Anomalien. Sie sind in *Abb. 3* mit den Buchstaben A, B, C und D gekennzeichnet.

Wir betonen an dieser Stelle, dass viele weitere Sumpfgebiete und Moore vorkommen, welche keine oder nur ganz schwache Anomalien aufweisen. Beispielsweise befin-



Abb. 2: Der Bonigersee, stellvertretend für die Landschaft auf der Hochebene der Moosalp, ist ein Flach- bzw. Hochmoor von nationaler Bedeutung (MAP.GEO.ADMIN.CH 2024b) und befindet sich direkt über dem Uran-Lagergang, siehe Abb. 3. Blickrichtung West.

det sich kaum hundert Meter südlich des Gebiets D ein kleines Flachmoor ohne jegliche Indikation.

Hypothese

In STUCKI (2023b) äussert der Autor für die Genese der Anomalien in den Sumpfgebieten folgende Vermutung: Das Wasser der Seelein auf der Moosalp sickert durch den Uran-Lagergang. Weil Uran in oxidativer Umgebung sechswertig ist, sind seine Salze in Wasser gut löslich und damit mobil. Mit anderen Worten: Das Sickerwasser kann Uran transportieren. Im chemisch reduktiven Milieu des Moorbodens wird Uran im vierwertigen Zustand dann fixiert und angereichert; insbesondere Torf eignet sich ausgezeichnet für diesen Prozess (IVANOVITCH & HARMON 1992).

Im Folgenden wird gezeigt, dass es stichhaltige Argumente für die Richtigkeit dieser Vermutung gibt. Vorerst allerdings studieren wir einige theoretische Grundlagen, welche fürs Verständnis der Methode wichtig sind.

Die natürlichen radioaktiven Familien und das radioaktive Gleichgewicht

Wir betrachten zunächst die beiden «natürlichen radioaktiven Familien» von U238 und U235.

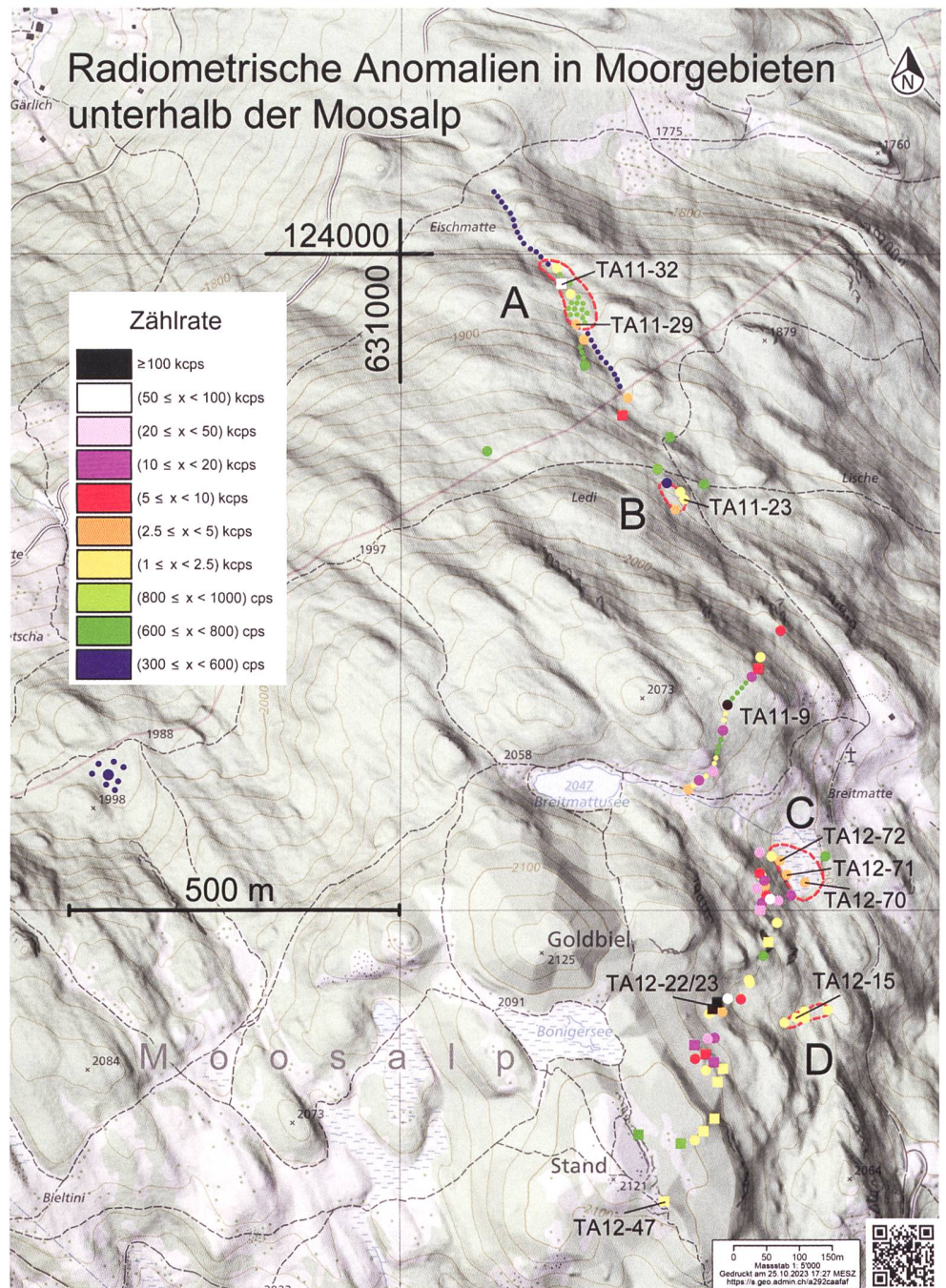


Abb. 3: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets mit Indikationen und deren Zählraten. Es wurden dazu «Landeskarte 1:10 000 (farbig)» und «swissALTI3D multidirektionales Relief» übereinandergelegt und bearbeitet (MAP.GEO.ADMIN.CH 2024c). Farbige Quadratscheiben symbolisieren Ausbisse des Erzgangs, Kreisscheiben Indikationen unterhalb der Moräne. Die Farben entsprechen Zählraten in cps (counts per second) bzw. kcps (kilocounts per second), gemessen mit dem 1.5" × 3" NaI-Szintillationszähler HAL2022 (STUCKI 2023a). Die Buchstaben A, B, C und D bezeichnen Sumpf- und Mooregebiete mit deutlich erhöhten Strahlungswerten. Die Stellen der Bodenproben sind eingetragen.

Die Mutter U238 zerfällt über eine Kaskade von dreizehn Tochterisotopen in das vierzehnte und stabile Blei-206 (Pb206), siehe *Abb. 4*. Ebenso U235 über zehn Töchter in Pb207, siehe *Abb. 5*. Die Zerfallsrate wird in Zerfällen pro Sekunde gemessen und *Aktivität* genannt, mit der Einheit 1 Becquerel = 1 Zerfall pro Sekunde.

Für das Verständnis der Vorgänge ist nun der Begriff des «radioaktiven Gleichgewichts» (bzw. Ungleichgewichts!) von zentraler Bedeutung.

Man kann sich diese wichtige Eigenschaft einer Zerfallskaskade gut anhand eines römischen Brunnens veranschaulichen, welcher aus untereinandergestellten, grösseren und kleineren Schalen gebaut ist. Die Entleerung einer Schale soll über einen senkrechten Schlitz geschehen, welcher bis zum Boden reicht. Das bedeutet: Je mehr Wasser sich in der Schale befindet, desto mehr fliesst heraus. Wenn der Zufluss konstant ist und die Schale sich zu füllen beginnt, steigt damit der Abfluss. Das System kommt ins Gleichgewicht, wenn bei einer bestimmten Wassermenge gleich viel Wasser aus der Schale fliesst, wie eingefüllt wird, der Saldo also gegen null geht. (Bemerkung: Lösung des Problems riecht nach einer Differentialgleichung.)

Auf die radioaktive Familie übertragen, bedeutet dies: Sie befindet sich im Gleichgewicht genau dann, wenn die Aktivität jeder Tochter gleich der Aktivität der Mutter ist.

Wir verwenden das Brunnen-Bild gerade noch für eine weitere wichtige Grösse der Kernphysik: Die Halbwertszeit (HWZ) ist die Zeit, die verstreicht, bis nur noch halb so viel Wasser in der Schale ist (Zufluss gleich null).

Die Uran-Töchter zeigen sehr unterschiedliche HWZ, beispielsweise beträgt sie bei Thorium-230 ganze 75 400 Jahre (siehe *Abb. 4*), während es bei Polonium-214 nicht mal einen Augenblick geht, sondern nur 162 Mikrosekunden, ein Unterschied von 16 Größenordnungen!

Es kann also dauern, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Nehmen wir als Beispiel U234, welches mit konstanter Aktivität in Th230 zerfallen soll. Dann dauert es 250 000 Jahre, bis das Thorium eine Aktivität von 90% derjenigen des Urans erreicht!

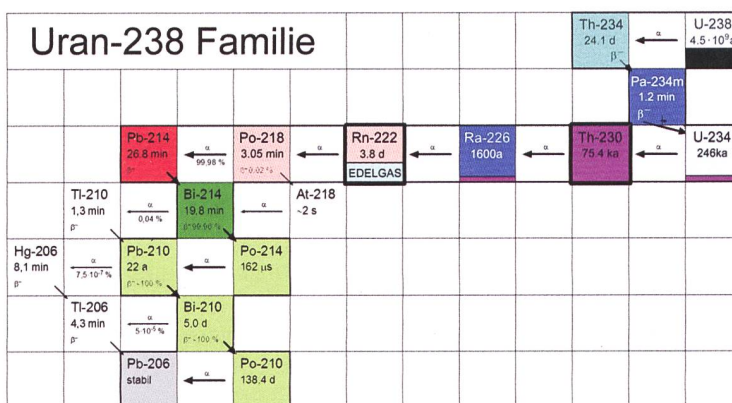


Abb. 4: Die «natürliche radioaktive Familie» von U238 zeigt übersichtlich die möglichen Zerfallskanäle des Urankerns. Am Schluss landen alle beim Blei-Isotop Pb206. Die Abbildung aus SCHKADE ET AL. (2018) wurde bearbeitet, satte Farben (exklusive violett) korrespondieren mit denjenigen der Peaks in den Gammaspektren.

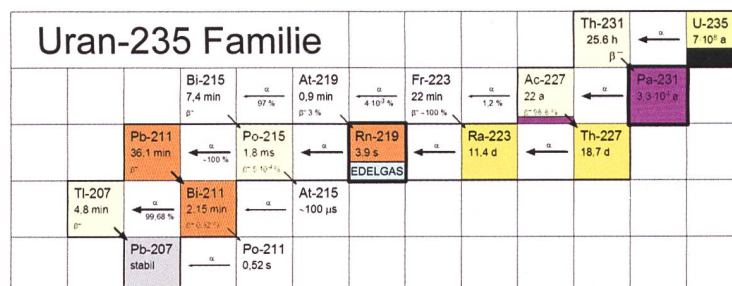


Abb. 5: Die «natürliche radioaktive Familie» von U235 zeigt die möglichen Zerfallskanäle des Urankerns. Am Schluss landen alle beim Blei-Isotop Pb207. Die Abbildung aus SCHKADE ET AL. (2018) wurde bearbeitet, satte Farben korrespondieren mit denjenigen der Peaks in den Gammaspektren.

In den Zerfallsketten beider Uranisotope gibt es solche langlebigen Töchter. Im Fall von U238 sind es nebst U234 eben Th230 und noch Radium-226; bei U235 handelt es sich um Protactinium-231 mit einer HWZ von 32 760 Jahren. In *Abb. 4* und *Abb. 5* sind diese Isotope violett markiert.

Immer unter der Voraussetzung eines radioaktiven Gleichgewichts halten wir noch einmal fest:

- Die Aktivitäten der Töchter einer Serie sind gleichgross.

Und weiter:

- Die Summe der Aktivitäten aller U238-Familienmitglieder beträgt das 14-fache, aller U235-Mitglieder das 11-fache eines einzelnen.

- Eine einfache Rechnung zeigt, dass sich die Aktivitäten einzelner Mitglieder – jeweils U238-Serie zu U235-Serie – wie 22:1 verhalten.
- Die Quotienten aus der Anzahl der Kerne und der HWZ aller Töchter einer Serie sind gleich; dies bedeutet, dass Isotope mit einer extrem kurzen HWZ nur in extrem geringen Mengen vorkommen.

Falls nun in den Sumpfgebieten rezent Uran ausgefällt wird, werden sich beide Uran-Serien keinesfalls im radioaktiven Gleichgewicht befinden; die Aktivitäten der Töchter hinter den langlebigen, in *Abb. 4* und *Abb. 5* violett markierten Isotopen werden signifikant tiefer sein als diejenigen der Eltern-teile.

Um dies abzuklären, muss man die Aktivitäten messen können. Das kann mithilfe der Gammaskopie erfolgen, siehe dazu MAUZ ET AL. (2022).

Gammastrahlen und Gammaskopie

Gewisse (nicht alle!) Isotope beider Uran-Serien werden bei ihrem Zerfall überschüssige Energie im Atomkern los, indem sie Gammapartikel genau definierter Energie emittieren. Die Energie eines Gammas wird damit quasi zum «Fingerabdruck» des emit-

tierenden Kerns, eine Möglichkeit zu dessen Identifizierung.

Die Gammaskopie für diese Arbeit wurden hauptsächlich mit einem «home-based» Natriumiodid-Spektrometer (NaI), siehe *Abb. 6*, erzeugt. Die Eichmessungen wurden freundlicherweise durch Dr. Isidre Mateu und Alex Gottstein vom Labor für Hochenergiephysik LHEP der Uni Bern mit einem hochauflösenden High-Purity-Germanium-Spektrometer (HPGe) durchgeführt.

In beiden Devices wird auf unterschiedliche Weise ein elektrischer Impuls erzeugt, dessen Höhe der Gammaenergie proportional ist. Die Ereignisse werden anschliessend mithilfe eines sogenannten Multichannel-Analizers MCA nach Impulshöhen in ein Histogramm sortiert – das Gammaskopie.

Abb. 7 zeigt drei solche Impulshöhen-spektren zweier Erzproben, welche sich im radioaktiven Gleichgewicht befinden.

Es fällt sofort der frappante Unterschied in der Energieauflösung zwischen dem HPGe- und dem NaI-Spektrometer auf. Dieser geht wesentlich auf zwei Ursachen zurück. Erstens werden im HPGe aufgrund der tieferen Ionisationsenergie pro Gamma etwa hundertmal mehr Ladungsträger- bzw. Ionenpaare erzeugt als im NaI und zweitens gilt für die Zählstatistik (Poisson), dass die Standardabweichung der Verteilung gleich der Quadratwurzel aus dem Mittelwert ist. Damit werden die Peaks des HPGe schon aufgrund dieser beiden Umstände zehnmal schmaler als diejenigen des NaI.

Dann offenbart ein Vergleich der beiden HPGe-Spektren von *verschiedenen* U-Erzproben, dass diese sich *nicht* unterscheiden; die Spektren von Proben im Gleichgewicht sind (wenn man sie skaliert) praktisch deckungsgleich – ganz im Gegensatz zu denjenigen der Bodenproben aus den Sumpfgebieten in *Abb. 9*.

Zum Schluss noch eine Bemerkung zu der Anzahl Varianten von Gammas beim Zerfall eines Isotops. Während es bei Radium-226 gerade sieben gibt, sind es gemäss IAEA (2023) bei Protactinium-234m ganze 144 Möglichkeiten; diese Vielfalt wird noch getoppt durch Bismut-214 mit sogar 314 Va-

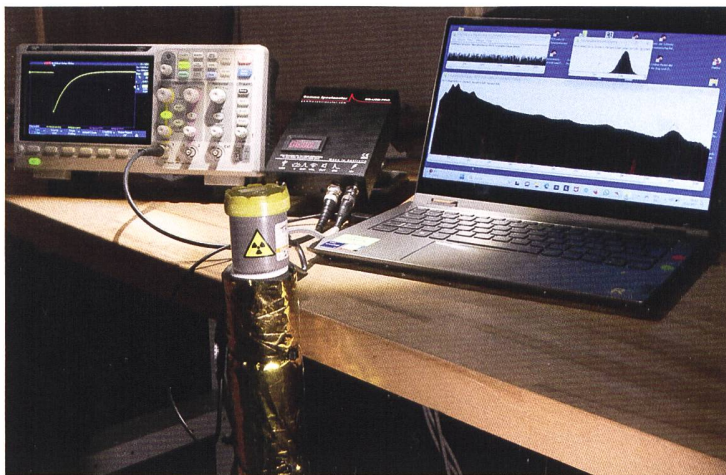


Abb. 6: Das «home-based»-Natriumiodid Spektrometer des Autors. Ein Probenbehälter steht auf der Stirn des NaI-Detektors. Das Oszilloskop links dient nur dem Zweck der Veranschaulichung eines Impulses des Detektors.

rianten. Zur Veranschaulichung findet sich in Abb. 9 ein Gammaskpektrum der Bodenprobe TA12-71 (vs. eines der Erzprobe TA12-22). Die Pa234m-Peaks sind blau markiert, diejenigen von Bi214 grün eingefärbt.

Alle Spektren in dieser Arbeit wurden durch den Autor mit dem sehr leistungsfähigen Programm INTERSPEC (2023) dargestellt und ausgewertet. INTERSPEC, welches wenige Wünsche offenlässt, wird durch die US-Regierungsorganisation Sandia National Laboratories SNL entwickelt und ist Freeware.

Eichung des NaI-Spektrometers und Fehlerquellen

Zu diesem Zweck wurde anhand des HPGe-Spektrums eines «punktförmigen» Kiesels mit Pechblende (Abb. 8) dessen Aktivität ermittelt, Vorgehen gemäss der Methode, wie in STUCKI (2023b) beschrieben. Nebst Verwendung des 1001keV-Peaks von Pa234m wurde mit dem kombinierten Peak von Ra226 und U235 bei 186 keV ein Crosscheck gemacht und anschliessend wurden einige Bi214-Peaks zur weiteren Kontrolle (vor allem des radioaktiven Gleichgewichts) benutzt. Daraus resultierten für die Eichprobe eine Aktivität von 1856 Becquerel \pm 5% sowie der Nachweis des radioaktiven Gleichgewichts innerhalb der Fehlergrenzen.

Umgekehrt wurde anschliessend die Probe eingesetzt, um für einen bestimmten Abstand (2 cm) zur Stirn des NaI-Detektors eine Eichkurve aus 9 Punkten zu ermitteln. Während der statistische Fehler sich in engen Grenzen hält, sind die systematischen weniger gut kontrollierbar. Zum Beispiel kommt es sehr darauf an, wie man (siehe Abb. 7) mithilfe der Tools von INTERSPEC die breiten Peaks vom Kontinuum abtrennt, um die counts in denselben zu zählen. Der gesamte Fehler bewegt sich auf jeden Fall im tieferen zweistelligen Prozentbereich.

Für nicht «punktförmige» Quellen wie die Bodenprobe im gasdichten Behälter (siehe Abb. 11), wird die Sache noch schwieriger. Einerseits ist die Zählrate für kleine Abstände sehr stark distanzabhängig (man kommt wegen der geringen Radioaktivität nicht umhin, mit kleinen Distanzen zu arbeiten).

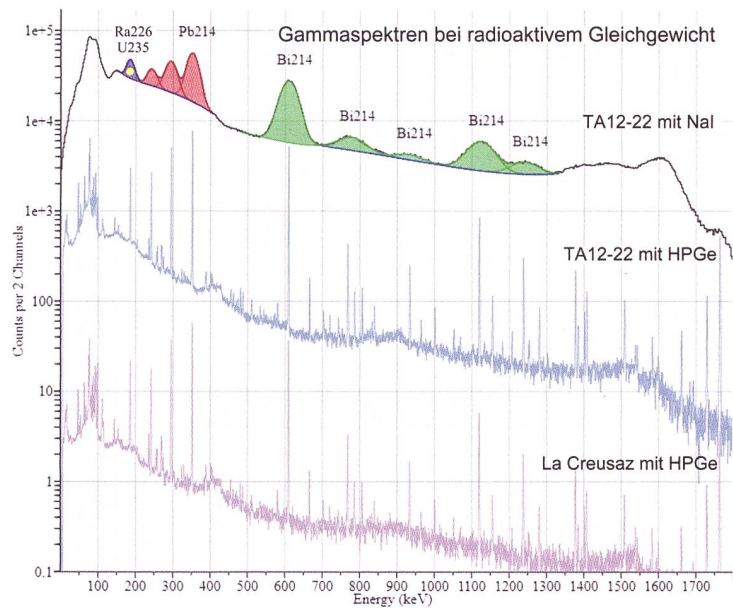


Abb. 7: Gammaskpektren von Proben im radioaktiven Gleichgewicht. Zunächst demonstrieren die Spektren den enormen Unterschied in der Energieauflösung zwischen dem High-Purity-Germanium-Spektrometer (HPGe) und dem Natriumiodid-Spektrometer (NaI). Diejenigen mit dem HPGe-Spektrometer zeigen, dass im Gleichgewichtsfall Spektren auch verschiedener Proben praktisch ununterscheidbar sind. Die Spektren wurden mithilfe des Programms INTERSPEC (2023) dargestellt. INTERSPEC kann Gaussfunktionen in die Peaks fitten. Diese können vom Kontinuum isoliert werden. Anschliessend kann man die Zählrate (in cps) in einem einzelnen Peak ermitteln; daraus lässt sich dann die Aktivität des dazugehörigen Isotops berechnen. Die Counts im 186-keV-Peak stammen zu 57% von Radium-226 und zu 43% von U235.



Abb. 8: Pechblende-Brekzie aus der Schürfung Gisiger in La Creusaz, Koordinaten 566209/107813. Dieser «punktförmige» Kiesel wurde als Eichprobe für die Spektrometer verwendet. Seine U238-Aktivität beträgt 1856 Becquerel \pm 5%.

$\text{Pa}^{234\text{m}} \rightarrow \text{U}^{234}$ im Gleichgewicht ist und mit konstanter Rate in Th^{230} zerfällt. Damit lässt sich mithilfe der Peaks von $\text{Pa}^{234\text{m}}$ die Aktivität pre- Th^{230} messen, insbesondere U^{238} selber.

Bemerkung: Es ist allerdings möglich, dass das Verhältnis U^{234} zu U^{238} zugunsten von U^{234} durch den Szilard-Chalmers-Effekt gestört sein könnte (IVANOVITCH & HARMON 1992). Der Effekt würde allerdings zur Erhöhung der Aktivität von U^{234} und ihrer Töchter führen – wir werden aber im Folgenden zeigen, dass sie bedeutend tiefer liegt.

Das in Abb. 4 violett markierte, langlebige Th^{230} spielt den entscheidenden Part. Wie weiter oben erwähnt, dauert es 250 000 Jahre, bis von null aus 90% der Aktivität des Gleichgewichts erreicht werden. Weil das Ausfällen frühestens mit dem Ende der Eiszeit vor 10 000 Jahren begonnen haben kann, werden Töchter von Th^{230} (inklusive Mutter) bedeutend tiefere Aktivitäten aufweisen als $\text{Pa}^{234\text{m}}$ und auch U^{234} .

Hier gibt es eine messtechnische Schwierigkeit mit dem Ra^{226} . Der einzige (gut messbare) Peak bei 186.2 keV liegt in unmittelbarer Nähe zum wichtigsten U^{235} -Peak bei 185.7 keV. Auch mit dem hochauflösenden HPGe-Spektrum und mithilfe sogenannter Entfaltung (Deconvolution) lassen sich die Peaks nicht sauber trennen. (Nur falls die Probe bis und mit Ra^{226} sich im Gleichgewicht befindet, lassen sich die Anteile im Peak berechnen: 57% Ra^{226} und 43% U^{235} .)

Hinter Ra^{226} kommt bereits das Edelgas Rn^{222} , welches entweichen kann. Falls dies mittels eines gasdichten Behälters vermieden und lange genug gewartet wird, kann man die vielen Peaks von Pb^{214} und Bi^{214} benutzen, um die Aktivität von Ra^{226} zuverlässig zu messen. In den NaI-Spektren der Bodenproben sind diese Pb^{214} - und Bi^{214} -Peaks deutlich zu sehen und ebenfalls mehr oder weniger gut der Peak von $\text{Pa}^{234\text{m}}$ bei 1001 keV, siehe Abb. 10. Damit können aufgrund der Spektren belastbare Aussagen gemacht werden.

Es fehlt aber der Link zwischen Th^{230} und Ra^{226} . Falls Ra^{226} (HWZ 1600 Jahre) verloren geht, kann dies nicht kontrolliert

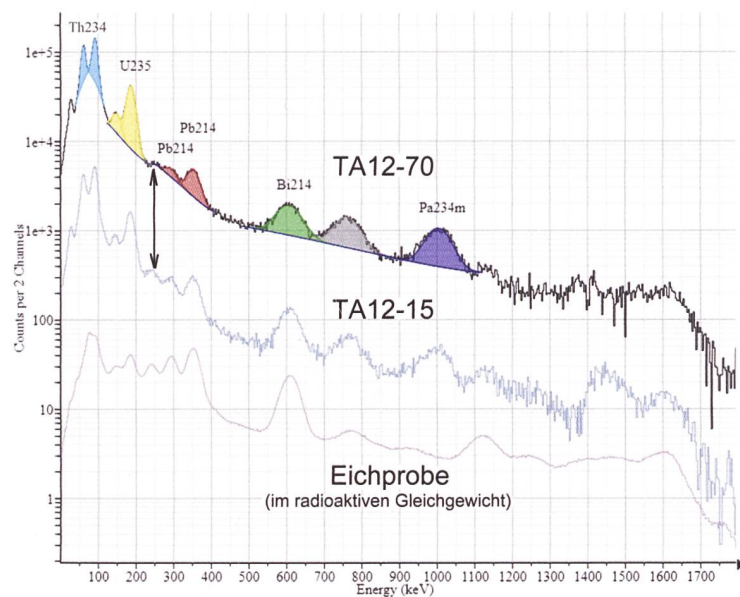


Abb. 10: NaI-Spektren der Proben TA12-70 und TA12-15, welche sich in starkem Ungleichgewicht befinden. Es sind subtile Unterschiede zu erkennen, welche vielleicht auf unterschiedliche «Verunreinigungen» durch Uranerz zurückgehen. Der Peak bei 186 keV wird (im Gegensatz zu demjenigen in Abb. 7) praktisch ausschliesslich durch Gammas von U^{235} geliefert. Zur Verdeutlichung der Unterschiede ist ein Spektrum der Eichprobe (Abb. 8) unterlegt.

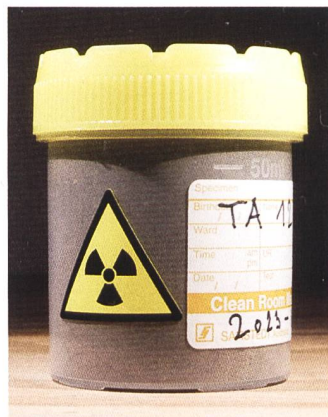


Abb. 11: Veraschte Bodenprobe TA12-71 in einem gasdichten Behälter. Sie muss vor der Messung zwei bis drei Wochen gelagert werden, damit die U^{238} -Serie jenseits von Radium-226 ins Gleichgewicht kommt; die Ra^{226} -Tochter Radon-222 besitzt eine Halbwertszeit von 3.8 Tagen und kann in offenen Proben entweichen. Bei der U^{235} -Serie stellt sich das Gleichgewicht mit der kurzen Halbwertszeit von nur 3.9 sec bei Rn^{219} fast augenblicklich ein. Die U^{238} -Aktivität der Probe beträgt 1589 Becquerel bei einem statistischen Fehler von 5%, aber mit einem bedeutend grösseren systematischen Fehler.



Abb. 12: Entnahmestelle der Bodenprobe TA12-71, siehe Abb. 3. Die Stelle befindet sich am Westrand des Flachmoors C am Hangfuss bei einer Austrittsstelle von Wasser. Die Zählrate im Graben beträgt 3.5 kcps, gemessen mit der NaI-Zähler-Eigenentwicklung HAL2022 des Autors (STUCKI 2023a).

werden, weil mit Gammaskopie die Aktivität von Th230 bei diesen Bodenproben nicht messbar ist (der Peak bei 67.7 keV ist im Gegensatz zu Proben im Gleichgewicht nicht sichtbar).

Bei der U235-Serie (Abb. 5) präsentiert sich die Situation besser: Man kann direkt die Aktivitäten von U235 selber sowie von Th227, Ra223, Rn219, Pb211 und Bi211 bestimmen. Dies ist aber nur mit dem HPGe-Spektrometer möglich und nur mit langer Messzeit, weil gewisse Gammas eine kleine Emissionswahrscheinlichkeit haben. Mit dem NaI-Spektrometer lässt sich immerhin über U235 eine Aussage machen (siehe auch MAUZ ET AL. 2022).

Insbesondere die 53 Stunden lange Messung der Probe TA12-71 am HPGe-Spektrometer hat sehr interessante Einsichten gezeigt.

Messungen, Ergebnisse und Diskussion

Die Bodenprobe TA12-71 (siehe Abb. 12) stammt vom Rand des Flachmoors, Stelle C in Abb. 3, direkt am Hangfuss bei einer Austrittsstelle von Wasser. An Ort wurde eine Zählrate von 3.5 kcps gemessen. Der Torf der Probe wurde ausgeheizt, verascht und in einen gasdichten Behälter (Abb. 11) eingeschlossen und etwas früh, bereits nach einer Woche, mit dem HPGe-Spektrometer gemessen. Nach drei Monaten erfolgte eine Nachmessung, um die Aktivitäten der Zerfallsprodukte von Ra226 diesmal im sauberen Gleichgewicht zu messen; der Unterschied zu der etwas vorzeitigen Messung bewegt sich genau im Rahmen des theoretisch Erwartbaren.

Es wurden im Gammaskopie (Abb. 9) insgesamt 54 Peaks ausgewertet, aber nicht alle einbezogen. In einigen Fällen wurde Deconvolution angewendet, um Peaks zu trennen.

Die Hypothese dieser Arbeit entscheidet sich am Vergleich der Aktivitäten hinter und vor den langlebigen Isotopen beider Serien.

- Die signifikant tieferen Aktivitäten hinter den langlebigen Töchtern Th230 und Pa231 beider Familien sprechen zweifellos für die Hypothese, dass in den Sumpfbereichen Uran ausgefällt wird.

Es sei noch einmal betont, dass im Falle eines Gleichgewichts sich die Aktivitäten *nicht* unterscheiden.

Dass überhaupt Ereignisse hinter den langlebigen Töchtern gezählt werden können, lässt sich im Prinzip auf zwei Ursachen zurückführen:

- Es gibt «Verunreinigungen» aus dem Erzlager und/oder
- es hat sich über die Zeit in beiden Serien bereits ein gewisser Stock an langlebigen Isotopen gebildet und diese zerfallen jetzt weiter.

Man kann die für den zweiten Fall nötige Zeit mathematisch leicht abschätzen. Die Resultate von bis 2800 Jahren bei der U235-Reihe für diese oberflächennahe Bodenprobe erscheinen dem Autor als hoch. Der erste Fall ist hingegen durchaus plausibel, da man in unmittelbarer Nähe der Entnahme-

Ergebnisse der HPGe-Messungen für die veraschte Bodenprobe TA12-71

U238-Serie, Aktivität pre-Th230	1.59 kBq	+/-5%	statistischer Fehler
U238-Serie, Aktivität post-Th230	11.2 Bq	+/-6%	statistischer Fehler
U235-Serie, Aktivität U235	63.9 Bq	+/-6%	statistischer Fehler
U235-Serie, Aktivität post-Pa231, pre-Rn219	3.7 Bq	+/-10%	statistischer Fehler
U235-Serie, Aktivität post-Rn219	3.4 Bq	+/-14%	statistischer Fehler
Aktivitätsquotient U238 zu U235	25:1	+/-8%	Soll: 22:1
Aktivitätsquotient post-Th230 zu U238	1:142	+/-10%	nach 3 Monaten
Aktivitätsquotient post-Pa231 zu U235	1:17	+/-15%	Gesamtfehler
Relativer U238-Gehalt (Gewicht)	0.32%	+/-5%	statistischer Fehler
Spezifische Aktivität U238	40 kBq/kg	+/-5%	statistischer Fehler
Aktivität Th232	0.5 Bq	+/-50%	statistischer Fehler
Relativer Th232-Gehalt (Gewicht)	3 ppm	+/-50%	statistischer Fehler
Aktivität K40	5.5 Bq	+/-2.2%	statistischer Fehler
Relativer K40-Gehalt (Gewicht)	0.5 ppm	+/-2.2%	statistischer Fehler
Relativer Kalium-Gehalt (Gewicht)	0.4%		

stelle stark radioaktive Fallblöcke finden kann.

Ein sehr interessanter Punkt: Die Quotienten (post/pre) beider Uran-Serien unterscheiden sich um eine ganze Grössenordnung, was deutlich ausserhalb auch der systematischen Fehlergrenzen liegt. Die Aktivitäten fast aller Töchter der U235-Familie lassen sich zuverlässig verfolgen und sind innerhalb der 10%-Fehler konsistent, während bei der U238-Reihe Unsicherheiten beim Übergang von Th230 in Ra226 bestehen. Man müsste den Grund wahrscheinlich dort suchen, vielleicht durch den Verlust von Ra226, welches langlebig und unter reduzierenden Bedingungen löslich ist, also mit dem Wasserstrom weitertransportiert werden kann. Der Autor neigt deshalb dazu, dem Verhältnis 1:17 zu vertrauen, welches bedeutet, dass das Uran im Moorboden mindestens zu 95% aus ausgefälltem besteht.

Wir betonen noch einmal, dass der systematische Fehler – bezüglich des Abstands,

der Efficiency und der Selbstabsorption in der Probe – deutlich grösser als der statistische ist. Beispielsweise liegt der gemessene Aktivitätsquotient von U238 zu U235 um 15% höher als der zu erwartende. Dies dürfte auf den Umstand zurückzuführen sein, dass die U235-Peaks alle bei verhältnismässig tiefen Energien liegen, diejenigen von Pa234m aber bei hohen (siehe *Abb. 9*), und dass die Selbstabsorption gegen tiefere Energien zunimmt. Mit anderen Worten: Man misst für U235 systematisch zu tiefe Zählraten und damit wird der Quotient zu hoch.

Dieses Verhältnis (25:1) liegt aber durchaus in einem akzeptablen Bereich und gibt Gewähr, dass die Messmethoden in Ordnung sind – ein zentraler Test bei allen Messungen!

Abschliessend weisen wir auf die ausserordentlich hohe spezifische Aktivität für U238 von 40 kBq/kg im veraschten Torf hin; PREGLER ET AL. (2019) beispielsweise bezeichnen bei 500 Bq/kg den Torf bereits als «uranreich».

Alle anderen Bodenproben (inklusive TA12-71 unverascht) wurden nach Trocknung (aber nicht Ausheizung) und zeitlich ausreichender Lagerung in gasdichten Behältern mit dem NaI-Spektrometer gemessen. Die Messzeit betrug 24 Stunden; der Background wurde während 48 Stunden ermittelt und anschliessend subtrahiert. Zwei Beispiele sind in *Abb. 10* dargestellt; es konnten höchstens sieben Peaks ausgewertet werden. Die Aktivität von U238 wurde mithilfe des 1001keV-Peaks von Pa234m ermittelt; diejenigen der Töchter post-Th230 mit den Peaks von Bi214 und Pb214. Die beiden Peaks von U235 dienten zur Kontrolle der Messungen; d.h. ein «gutes» Spektrum musste ein Verhältnis der Aktivitäten U238 zu U235 von etwa 22:1 zeigen.

Die Relativwerte für die Aktivitäten sind zwar untereinander gut vergleichbar; die Absolutwerte differieren jedoch stark, wie ein Vergleich der Probe TA12-71 zeigt: 1589 Bq mit HPGe und 4200 Bq mit NaI. Die NaI-Geometrie wurde immerhin mit dem Pechblendekiesel «geeicht», aber wie weiter oben erwähnt spielt die Distanz eine entscheidende Rolle. Daher verzichteten wir auf die Angabe der absoluten Aktivität.

Die Quotienten der Aktivitäten U238/U235 testieren ordentliche Messungen. Die Verhältnisse der Aktivitäten post-Th230 zu U238 sind nicht unerwartet unterschiedlich, zeigen aber klar und deutlich, dass es sich in den Proben fast ausschliesslich um

ausgefälltes Uran handelt, wenn man nicht davon ausgeht, dass praktisch alles Ra226 wegtransportiert wurde. Ein Vergleich der Zählraten in den Schürfgräben legt nahe, dass sich die spezifischen Aktivitäten im Bereich der Probe TA12-71 bewegen dürften. *Abb. 12*, *Abb. 13* und *Abb. 14* stammen von den Entnahmestellen.

Bemerkung: Bei der Probe TA11-29 ist der Pa234m-Peak im NaI-Spektrum nicht sichtbar; die U238-Aktivität wurde mithilfe der U235-Peaks und dem 22:1-Verhältnis bestimmt. Eine Nachmessung mit dem HPGe-Spektrometer ergab tatsächlich exakt dieselben Werte!

Fazit

Wahrscheinlich ist die Konfiguration der Moosalp zwar nicht gerade einzigartig, aber doch sehr aussergewöhnlich: Die Seelein und Tümpel oberhalb, daher die vielen Wasserquellen mit Sumpfgebieten und Mooren unterhalb und dazwischen ein ausgesprochen stark vererzter Uran-Lagergang. Daraus resultieren die hohen spezifischen U238-Aktivitäten von einigen zehntausend Becquerel pro Kilogramm der Bodenproben. Dieses Uran wurde und wird fast ausschliesslich ausgefällt.

Vor allem das Flachmoor, Stelle C, würde sich wahrscheinlich ausserordentlich gut eignen für Untersuchungen, inwiefern Uran und/oder seine Töchter in die Vegetation

Ergebnisse der NaI-Messungen für die Bodenproben

Probe	Aktivität post-Th230 zu U238		Kontrolle: Aktivität U238 zu U235		Zählrate im Schürfgraben	Koordinaten	
TA12-15	1:32	+/-7%	20:1	+/-10%	2.1 kcps	631604	122838
TA12-70	1:62	+/-10%	21:1	+/-9%	3.0 kcps	631617	123042
TA12-71	1:131	+/-9%	24:1	+/-11%	3.5 kcps	631591	123052
TA12-72	1:51	+/-6%	24:1	+/-14%	3.1 kcps	631584	123071
TA11-23	1:91	+/-16%	23:1	+/-10%	2.2 kcps	631444	123598
TA11-29	1:20	+/-6 %	23:1	+/-10%	3.1 kcps	631272	123876
allgemeiner Background im Perimeter					250 cps		



Abb. 13: Entnahmestelle der Bodenprobe TA12-72, siehe Abb. 3. Sie befindet sich im Flachmoor C, am Nordende der Stellen mit erhöhten Messwerten.

gelangen, in welche Pflanzenarten und in welchen Mengen. Auf dem Flachmoor wird auch Vieh geweidet.

Es wäre weiter interessant, das abfließende Wasser auf Ra226 und Rn222 zu prüfen, weil die Verhältnisse in der ausführlicher untersuchten Bodenprobe TA12-71 auf einen Radium-Verlust hindeuten. Die Messwerte unterhalb des Flachmoors bewegen sich im Rahmen des allgemeinen Backgrounds von 250 cps mit dem NaI-Zähler.

Wie zu erwarten, zeigen Untersuchungen von STALDER ET AL. (2011) für die Gegend relativ hohe Werte für die Urankonzentration in Trinkwasser, welche sich am oberen Rand, aber noch im Rahmen der WHO-Empfehlungen bewegen. Falls nötig, können für das Trinkwasser Massnahmen ergriffen werden (siehe beispielsweise MALLICK 2007).

Postskriptum: Radon

Am 16. August 2023, einem windstillen Tag zu Beginn der August-Hitzewelle, wurde im kühlen Weinkeller des Autors ein Experiment zum Radonproblem durchgeführt.

Dazu wurde vor den Stutzen eines Staubsaugers eine Wegwerf-Corona-Schutzmaske gespannt und direkt über dem Naturboden (untere Süsswassermolasse) während einer Stunde die Luft des Kaltluftsees durch die Maske gesaugt. Anschliessend wurde mit



Abb. 14: «Radio-aktives Bächlein» etwas unterhalb der Entnahmestelle von Bodenprobe TA11-29 in Abb. 3. Das Rinn-sal fließt +/- entlang einer in der geologischen Karte eingezeichneten Störung und zeigt deutlich erhöhte Werte um 1 kcps. Hier dürfte ein guter Teil der Zählrate auch auf Uranerz zurückgehen, weil sich das Lager in unmittelbarer Nähe befinden muss. Ein Ausbiss (TA11-32) mit einer sehr hohen Rate von 52 kcps befindet sich etwa 100 m tal-abwärts.

dem NaI-Spektrometer sofort (Halbwertszeiten!) ein Gammaskpektrum erstellt. Abb. 15 zeigt das Resultat. Auf den ersten Blick ähnelt das Spektrum sehr demjenigen des Gleichgewichts, mit einem entscheidenden Unterschied: der 186keV-Peak fehlt!

Natürlich hat dieses Experiment keinen direkten Zusammenhang mit den Moosalp-Untersuchungen, aber die Verlockung für den Autor war gross, das Gleichgewichtsproblem einmal von der «Rückseite» her anzusehen (siehe zur Illustration wieder Abb. 4). Die durch andere Experimente erhärtete Idee ist, dass die durch Alpha- oder Beta-Emission ionisierten Radon-Töchter an Aerosole andocken, welche beim Saugen teilweise in der Maske hängen bleiben. Dies zeigt das Spektrum schulbuchmässig: Es sind nur die Peaks von Pb214 und Bi214 zu sehen und nichts vom Ra226- bzw. U235-Peak bei 186 keV.

Bemerkung 1: Ursprünglich, im Frühjahr 2020, wurde das Experiment durch den Autor konzipiert, um die Wirksamkeit von Corona-Schutzmasken zu demonstrieren

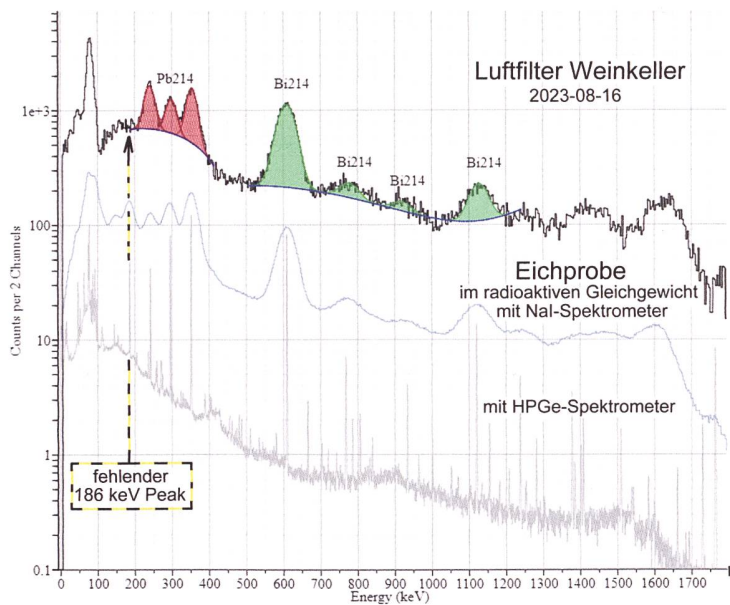


Abb. 15: Das Spektrum der Radon-222-Töchter Blei-214 und Bismut-214 (Details siehe Haupttext) ist aufgetragen gegen Gleichgewichtsspektren zum Vergleich.

(Viren docken auch an Aerosole s.l.). Wenn man zwei Masken in Reihe schaltete, sog und anschliessend die Zählraten jeder einzelnen Maske mass, konnte man mit einer einfachen Rechnung zeigen, dass «normale» Wegwerfmasken etwa 80% der Aerosole filterten und daher wirksam waren und sind.

Bemerkung 2: Solches Ergebnis animiert natürlich nicht dazu, wie ursprünglich geplant, das Nachtlager während zunehmend häufigerer Hitzeperioden in den kühlen Keller zu verlegen. Dem gelagerten Wein wird's nicht schaden.

Nun, am Ende der ausgiebigen Beschäftigung mit reichlich Spektren, kommt der Autor nicht umhin, seinen längst verstorbene Chef am LHEP Uni Bern, Professor Beat Hahn zu zitieren: «I love peaks»!

Dank

Zunächst möchte ich gerne Dr. Christoph Thalmann, Redaktor der NGB-Mitteilungen, für die angenehme Zusammenarbeit herzlich danken. Ein besonders grosses Dankeschön geht an Alex Gottstein und Dr. Isidre Mateu vom Laboratorium für Hochenergiephysik LHEP der Uni Bern für ihre Bereitwilligkeit, Zeit zu opfern, um mit dem HPGe-Spektrometer Messungen vorzunehmen. Solche waren unverzichtbar fürs Gelingen dieser Arbeit. Ohne das Einverständnis von Prof. Dr. Saverio Braccini und Prof. Dr. Michele Weber vom LHEP wäre die Benützung des Spektrometers allerdings nicht möglich gewesen. Ihnen beiden sei ganz herzlich für die unkomplizierte Unterstützung gedankt.

Literatur

- ERÖSS A., 2020. Natürliche Radioaktivität im Grundwasser – neue Parameter und Herausforderungen für die Trinkwasserversorgung. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* (2020) 25:111–112. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00449-9>
- GILLIÉRON F., 1988. Zur Geologie der Uranmineralisation in den Schweizer Alpen. *Beitr. Geol. Schweiz, Geotech. Ser. 77*
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IAEA, 2024. *LiveChart of Nuclides – Advanced version*. <https://www.iaea.org/resources/databases/livechart-of-nuclides-advanced-version>
- INTERSPEC v1.0.11., 2023. <https://sandialabs.github.io/InterSpec/releases/>
- IVANOVITCH M., HARMON R. S., 1992. *Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences*. Clarendon Press.
- MALLICK R., 2007. Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen – Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung, Teil I. Bayer. Landesamt für Umwelt. Augsburg. https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get_pdf.htm?art_nr=lfu_stra_00012
- MAP.GEO.ADMIN.CH, 2024a. https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers_visibility=false&layers_timestamp=18641231&E=2629476.05&N=1123734.54&zoom=5

- MAP.GEO.ADMIN.CH, 2024b. https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&E=2630963.94&N=1122834.48&zoom=10&catalogNodes=508,532,653&layers=ch.swisstopo.swissalti3d-reliefschattierung,ch.bafu.bundesinventare-flachmoore,ch.bafu.bundesinventare-hochmoore&layers_opacity=0.55,0.75,0.75
- MAP.GEO.ADMIN.CH, 2024c. https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&E=2631307.18&N=1123173.85&zoom=10&catalogNodes=457,508&layers=ch.swisstopo.swissalti3d-reliefschattierung&layers_opacity=0.55
- MAUZ B., NOLAN P.J., APPLEBY P.G., 2022. Technical note: Quantifying uranium-series disequilibrium in natural samples for dosimetric dating – Part 1: gamma spectrometry. *Geochronology*, 4, 213-225, 2022. <https://doi.org/10.5194/gchron-4-213-2022>
- MEISSER N., 2012. La Minéralogie de l'uranium dans le massif des Aiguilles Rouges. *Mater. Géol. Suisse, Sér. géotech.* 96
- PREGLER A., SURBECK H., EIKENBERG J., WERTHMÜLLER S., SZIDAT S., TÜRLE A., 2019. Increased uranium concentrations in ground and surface waters of the Swiss Plateau: A result of uranium accumulation and leaching in the Molasse basin and (ancient) wetlands? *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol 208-209, 106026. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106026>
- SCHKADE U.-K., HECKEL A., WERSHOFEN H., 2018. Gammaspektrometrische Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide, Hrsg. Bundesamt für Strahlenschutz. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/strlsch_messungen_gamma_natrad_bf.pdf
- SCHOTT B. & WIEGAND J., 2003. Processes of radionuclide enrichment in sediments and ground waters of Mont Vully (Canton Fribourg, Switzerland). *Eclogae geol. Helv.* 96 (2003) 99-107. <https://doi.org/10.1007/S00015-003-1079-0>
- STALDER E., BLANC A., HALDIMANN M., DUDLER V., 2011. Occurrence of uranium in Swiss drinking water. *Chemosphere* 86 (2012), 672–679. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.11.022>
- STIEGHORST C., 2010. Gammaspektroskopische Untersuchungen von Uran und seinen langlebigen Zerfallsprodukten an landwirtschaftlichen Auenböden entlang der Zwickauer Mulde und Vereinigten Mulde. Diplomarbeit am Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie der Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover. <https://www.irs.uni-hannover.de/fileadmin/irs/Arbeiten/Diplom/diplstie.pdf>
- STUCKI R., 2023a. Ein schneller Szintillationszähler für den Feldeinsatz. *VSMP Bull.* 151. St. Gallen. [https://www.vsm.ch/bulletin/archiv/files/Bulletin 151.pdf](https://www.vsm.ch/bulletin/archiv/files/Bulletin%20151.pdf)
- STUCKI R., 2023b. Radiometrische Anomalien in der Umgebung von Törbel, nahe Visp im Wallis. *Mitt. Naturforsch. Ges. Bern NF Bd. 80*, S. 40–63. https://ngbe.ch/de/uuid/i/71e95c71-8347-54ba-b4a7-50b00a5b209a-Radiometrische_Anomalien_in_der_Umgebung_von_T%C3%B6rbel_nahe_Visp_im_Wallis



Ruedi Stucki

Jahrgang 1957. Aufgewachsen und Volksschulen besucht im Berner Seeland in Ins. Lehrer:innenseminar, Sekundarlehramt und ab Herbst 1982 Physikstudium an der Uni Bern als «Werkstudent» mit ein paar Math-Lektionen an der Berufsmittelschule Bern. Diplomarbeit 1989 «Szintillationseigenschaften ausgewählter Materialien bei tiefen Temperaturen» im Labor für Hochenergie LHEP unter den Profs. Beat Hahn und Klaus Pretzl. Ein knappes Jahr als wissenschaftlicher Assistent am LHEP tätig. Dann drei Semester lang Physiklehrer am Gymnasium Kirchenfeld; am Staatlichen Seminar für Haushaltungslehrerinnen und -lehrer bis zu dessen Auflösung 2002 und ab 1997 zunehmend am Gymnasium Lerbermatt bis zur Retirierung 2022.

Die Photographie zeigt den Autor im Jahr 2011 beim Anschneiden einer «radioaktiven» Torte, gestiftet von der Promotion 2012f des Gymnasiums Lerbermatt.

Kontakt: rudolfstucki@bluewin.ch