

# Messungen von Radioaktivität und Dosis auf einer Reise zum Bikini Atoll

Dr. Claus Bunnenberg  
Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie  
Leibniz Universität Hannover  
bunnenberg@zsr.uni-hannover.de

Oktober 2009

## **Vorbemerkung:**

Vom 24.02. bis zum 11.03.2008 hat ein Filmteam der Context TV GmbH, Berlin, mit einer Gruppe von Wissenschaftlern und Technikern eine Reise zum Bikini Atoll unternommen, um im Hinblick auf die Vergangenheit dieser Inselgruppe als Kernwaffentestgelände der USA die heutige Situation zu dokumentieren. Der Autor hat dabei einerseits durch Messungen der Dosis auf der Reise und an den Drehorten sichergestellt, dass unvertretbar hohe Strahlenbelastungen etwa durch Hinterlassenschaften der Tests nicht aufgetreten sind. Andererseits hat er an den verschiedensten Stellen auf Bikini und auf anderen Inseln des Atolls sowie in der Nähe der Schiffswracks auf dem Grund der Lagune Dosisleistungsmessungen durchgeführt und an ausgewählten Stellen Umweltproben entnommen, die anschließend im Isotopenlabor des Zentrums für Strahlenschutz und Radioökologie (ZSR) der Leibniz Universität Hannover auf Gehalte an radioaktiven Substanzen untersucht worden sind.

Wenn auch die Auswahl der mitgeführten Messeinrichtungen klein und die Zahl der Messungen vor Ort gering sind, geben sie in Verbindung mit den Probenanalysen im Labor einen gewissen Einblick in die gegenwärtige Situation von Strahlung und Radioaktivität, wie sie der Autor auf dem Bikini Atoll vorgefunden hat. Allerdings ist zu betonen, dass es sich lediglich um zufällige Stichproben und nicht um eine repräsentative Darstellung des Testgeländes handelt.

Filmberichte über diese Reise wurden am 07.12.2008 im Discovery Science Channel in den USA unter dem Titel „Radioactive Paradise“ und am 11.10.2009 im ZDF in der Reihe ‚Terra X‘ unter dem Titel „Die Geisterflotte vom Bikini Atoll“ gesendet.

Der Autor dankt Herrn Prof. Dr. Rolf Michel, Leiter des Zentrums für Strahlenschutz und Radioökologie der Leibniz Universität Hannover, für die Bereitstellung von Messgeräten und Analyseeinrichtungen sowie Frau Dipl.-Chem. Tanja Bisinger und Herrn Dipl.-Phys. Jonny Birkhan für die Analysen und Auswertungen der Bikini Proben.

## Das Kernwaffentestgelände Bikini Atoll

Das Bikini Atoll liegt in Äquatornähe im Südpazifik etwa 850 km nordwestlich der Hauptinsel Majuro am nördlichen Rand der Marshall Inseln. Das Atoll selbst umfasst 23 Inseln und Inselchen, von denen nur Bikini und Enyu vor 1946 permanent besiedelt waren. Nach Evakuierung der Einwohner wurden das Bikini und das Enewetak Atoll zwischen 1946 und 1958 von den USA zum Testen der Auswirkungen von Kernwaffen benutzt. Über 70% der nuklearen Sprengkraft von insgesamt 110.000 Kilotonnen (kt) TNT-Äquivalent wurden in 23 Explosionen über und unter Wasser allein auf dem Bikini Atoll gezündet, der übrige Anteil auf dem 350 km weiter westlich gelegenen Enewetak Atoll.

Die Testphase auf dem Bikini Atoll begann mit der „Operation Crossroads“ und den Atombombenexplosionen „Able“ (1. Juli 1946) und „Baker“ (25. Juli 1946), die innerhalb des Atolls wenige Kilometer südwestlich der Insel Bikini gezündet wurden und eine Sprengkraft von je 23 kt TNT hatten. Bei diesen beiden Versuchen dienten etwa 90 ausgediente Kriegsschiffe als Versuchsobjekte („Nuclear Fleet“), um die Folgen eines nuklearen Angriffs auf eine Flotte zu untersuchen. Einige der Schiffe, darunter der Flugzeugträger USS SARATOGA und das erbeutete japanische Schlachtschiff HIJMS NAGATO, sanken 7 Stunden bzw. 5 Tage nach dem Baker Test und sind heute ein beliebtes Ziel für Sporttaucher auf dem Grund der Lagune. Der ebenfalls exponierte, erbeutete deutsche Schlachtkreuzer PRINZ EUGEN wurde nur leicht beschädigt und zu Dekontaminierungsversuchen zum Kwajalein Atoll geschleppt.

Ab August 1946 blieb das Testgelände Bikini ungenutzt bis mit der Explosion der Wasserstoffbombe „Bravo“ (1. März 1954) die „Operation Castle“ eröffnet wurde. Diese thermonukleare Bombe besaß eine Sprengkraft von 15 Megatonnen (Mt) TNT und war damit der größte je von den Amerikanern durchgeführte Kernwaffenversuch. Er vernichtete drei kleine Inseln im Nordwesten des Bikini Atolls und hinterließ einen Krater von über 2 km Durchmesser und 75 m Tiefe. Da sich entgegen der ursprünglichen Versuchskonzeption die Hauptwindrichtung einige Stunden vor dem Test auf Ost gedreht hatte, zog die radioaktive Wolke über Bikini sowie über die bewohnten Atolle Rongelap, Rongerik und andere hinweg. Eine Warnung hatte es weder für die Bewohner noch für die Fischer in der Region gegeben. Nach 20 weiteren Tests wurde das Kernwaffenversuchsprogramm auf dem Bikini Atoll am 12. Juli 1958 beendet.

Die Bikinianer und ihre Nachkommen leben nach mehreren Umsiedlungen inzwischen verstreut auf einigen Marshall Inseln, vor allem auf der Insel Kili und auf der Hauptinsel Majuro. Einige haben sich auch in den USA niedergelassen. Versuche der dauerhaften Rücksiedlung sind zunächst an zu hohen Restkontaminationen und später wohl nicht zuletzt am Misstrauen gegenüber US-behördlichen Informationen zur Bewohnbarkeit der Insel gescheitert. Für mehr Klarheit hat inzwischen eine Studie der „International Atomic Energy Agency“ (IAEA), Wien, gesorgt, um die die Marschallesische Regierung gebeten hatte [*IAEA, Radiological Conditions at Bikini Atoll: Prospects for Resettlement, Radiological Assessment Reports Series, Wien, 1998*]. Daten aus diesem Bericht werden zur Einordnung der eigenen Ergebnisse herangezogen.

## Radiologische Grundlagen

Aufgrund des natürlichen Vorkommens von radioaktiven Substanzen und ionisierender Strahlung ergibt sich für den Menschen im globalen Durchschnitt eine mittlere effektive Dosis von 2,4 mSv/a (Millisievert pro Jahr). Dieser Mittelwert setzt sich zusammen vor allem aus Beiträgen von der kosmischen Strahlung, von terrestrischer Radioaktivität, insbesondere vom radioaktiven Kalium-40 und von der Inhalation von Radon, sowie von Uran- und anderen radioaktiven Vorkommen im Boden. Auch wenn die Einzelbeiträge auf Bikini unterschiedlich verteilt sind, weil z.B. der Boden weniger Kalium und kein Radon, das Sediment aber mehr Polonium enthält, das über den Fischverzehr aufgenommen wird, stellt sich ebenfalls ein natürlicher Mittelwert von 2,4 mSv/a ein, der folglich auch als Wert der Strahlenbelastung in der Zeit vor den Kernwaffentests angesehen werden kann. Der hier verwendete Begriff der „effektiven Dosis“ berücksichtigt sowohl die unterschiedlichen Arten ionisierender Strahlung als auch die unterschiedlichen Strahlungsempfindlichkeiten menschlicher Organe.

Als Folge der geografischen Lage und der Beschaffenheit des Untergrunds variiert der Mittelwert weltweit zwischen 1 und 20 mSv/a. Er kann in manchen Gegenden aber auch bis zu 100 mSv/a betragen, ohne dass negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen nachzuweisen wären. Vor diesem Hintergrund sind die international anerkannten Sicherheitsstandards zu sehen, die bei erhöhten Strahlenbelastungen zur Anwendung kommen und in den „Basic Safety Standards“ der IAEA definiert sind [IAEA, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA Safety Series No. 115, IAEA, Wien, 1996*]. Danach ist eine zusätzliche Dosis von 1 mSv/a durch menschliche kerntechnische Unternehmungen zulässig. Interventionen, wie z.B. Evakuierungsmaßnahmen, sind ab einigen 10 mSv/a in Betracht zu ziehen. Permanente Umsiedlung der Bevölkerung sollte erfolgen, wenn trotz Gegenmaßnahmen eine Lebenszeitdosis von 1 Sv, d.h. 14 mSv/a bei einer Lebenserwartung von 70 Jahren, voraussichtlich überschritten würde. Eine Rücksiedlung könnte erfolgen, wenn die Dosis unter einen Wert von 10 mSv/a sinken würde.

Die Studie der IAEA von 1998 hat gezeigt, dass auf der Grundlage der Lebens- und Ernährungsgewohnheiten der Bikinianer aus der Zeit vor ihrer Evakuierung und der Strahlungssituation und der Radioaktivität in Boden und Nahrungsmitteln von 1997 Dosiswerte von bis zu 15 mSv/a erreicht werden können. Bei dieser Abschätzung trägt die Dosis aus der Nahrungsaufnahme den weitaus größten Anteil bei und hierzu hauptsächlich das Radiocäsium (Cs-137). In der Studie wird deshalb empfohlen, die zur Nahrungsmittelproduktion genutzten Böden mit Kaliumdünger zu verbessern, um damit die Aufnahme des pflanzenphysiologisch ähnlichen Cäsiums zu reduzieren. Allein durch diese Maßnahme wird eine Abnahme der Radioaktivität um den Faktor 10 erwartet. Vom geforderten vollständigen Austausch der oberen Bodenschicht rät die Studie bis auf wenige ‚hot spots‘ ab.

## Reiseverlauf

Die Reise des Filmteams begann am 24.02.2008 in Berlin und führte per Flugzeug über Frankfurt, Los Angeles nach Honolulu; nach einem Tag Aufenthalt und einer kurzen Rundfahrt über die Insel Oahu (Pearl Harbour, Waikiki) weiter nach Majuro, der Hauptinsel der Marshall Inseln, wo das Team an Bord der Privatyacht M.Y. OCTOPUS ging. Die OCTOPUS verließ kurz vor Mitternacht am 26.02. den Hafen von Majuro und erreichte am frühen Morgen des 28.02. die vorgesehene Position innerhalb des Bikini Atolls in der Nähe der gesunkenen Schiffe der „Nuclear Fleet“, ca. 5 km südwestlich der Insel Bikini. Ein Teil des Filmteams verbrachte die folgenden Tage überwiegend an Bord der OCTOPUS, während die Wissenschaftler und der Rest des Teams vom 28.02. bis zum 06.03. in Gästezimmern der Tauchstation auf Bikini einquartiert waren. Dieser Aufenthalt war für den Autor unterbrochen durch verschiedene Ausflüge zu Filmaufnahmen und zur Messung von Ortsdosisleistungen auf anderen Inseln:

- 28.02.: Hubschrauberflug nach Rongelap (Rongelap Atoll, 150 km östlich von Bikini),
- 01.03.: Fahrt mit der Motoryacht MAN OF WAR quer durch die Lagune nach Westen zum „Shark Pass“ zur Hai-Beobachtung,
- 02.03.: Fahrt mit dem Taucher-Motorboot zum „Schnorchel-Revier“ der Insel „Aomen“ im Norden und zur Insel „Enyu“ im Südwesten des Atolls,
- 05.03.: Tauchfahrt mit dem U-Boot PAGOO zum gekenterten japanischen Schlachtschiff NAGATO,
- 06.03.: Tauchfahrt mit der PAGOO zum Wrack des Flugzeugträgers SARATOGA und zur Beobachtung der Sediment-Probennahme durch den Unterwasserroboter ROV (= Remote Operated Vehicle) zwischen zwei Flugzeugen der SARATOGA am Boden der Lagune (Sedimentprobe BS 8);  
Fahrt mit der MAN OF WAR zum „Bravo Krater“ im Nordwesten des Atolls zur Probennahme von Sediment aus dem Krater (Sedimentprobe BK 9).

In der übrigen Zeit hat der Autor mehrere Ausflüge auf der Insel Bikini unternommen und dabei Dosisleistungen an verschiedenen Punkten und radioaktive Kontaminationen an Oberflächen gemessen sowie Bodenproben am Bunker (BU 1), am Strand (BE 2), in einem Palmenhain (BL 5, 6, 7) entnommen, Muscheln am Strand (BM 3, 4) gesammelt und eine Kokosnuss (BN 10) in einem Palmenhain geerntet.

## Ausrüstung

Die Ausrüstung zur Dosismessung und zur Probennahme blieb letztlich beschränkt auf ein elektronisches Personendosimeter, wie es vom Personal in kerntechnischen Einrichtungen getragen wird, und ein kombiniertes Dosisleistungs- und Kontaminationsmessgerät. Eine Transportkiste mit weiteren Personendosimetern, Kontaminationsmessgeräten sowie Behältern und Werkzeugen für die Umweltprobennahme blieb für die Dauer der Reise am Flughafen Los Angeles ‚unauffindbar‘. Deshalb mussten die Zahl der Proben, aber auch die Zahl der dosisüberwachten Personen drastisch reduziert werden.

Das elektronische Personendosimeter wurde durchgehend fast ausschließlich vom Autor am Körper getragen. Das Gerät wurde vor der Reise am 21.02. auf Null gestellt und zeigte kontinuierlich die bis zum Ablesezeitpunkt aufsummierte Dosis in Schritten von 1 Mikrosievert ( $\mu\text{Sv}$ ) an. Ein zweites baugleiches Dosimeter war gleichzeitig im

ZSR in Hannover zu Vergleichszwecken an einem Büroarbeitsplatz deponiert. Ein drittes Gerät befand sich in der in Los Angeles vorübergehend verschollenen Transportkiste. Nach der Rückkehr nach Hannover wurden die in den drei Personendosimetern gespeicherten Daten ausgelesen.

## Messungen mit den elektronischen Personendosimetern

Der Autor hat während der Reise ein Tagebuch über Zeiten, Aufenthaltsorte, Tätigkeiten und Dosimeteranzeigen geführt. Diese Aufzeichnungen sind nach der Rückkehr mit dem Computerausdruck der im Gerät elektronisch gespeicherten Daten verglichen und auf deutsche Zeiten umgerechnet worden. Abbildung 1 zeigt die auf jeweils 24 Stunden berechneten Dosen für den Reiseverlauf in einem Histogramm.

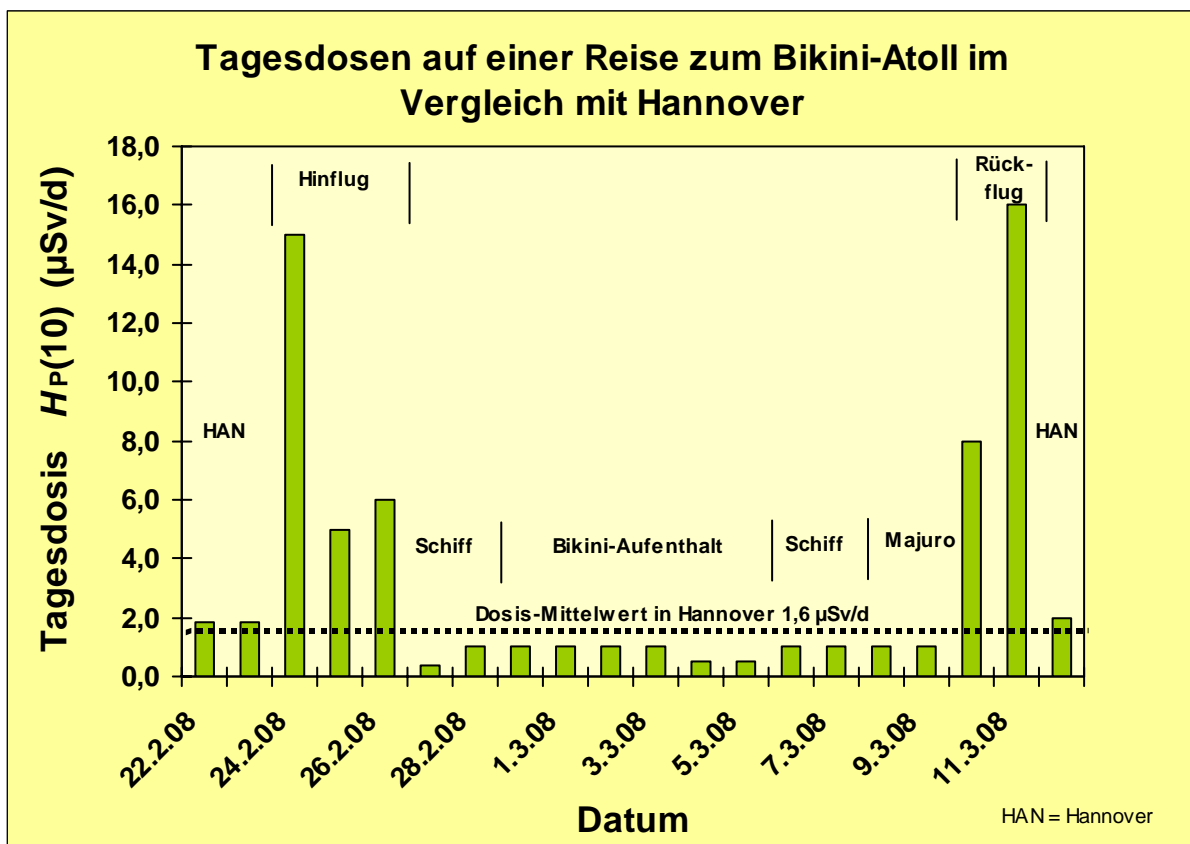


Abb. 1: Dosiswerte in Mikrosievert pro Tag ( $\mu\text{Sv/d}$ ) auf der gesamten Reise.

Gekennzeichnet sind dabei die grundsätzlichen Reisedaten bzw. Aufenthaltsorte. Für die parallele Dosismessung in Hannover ergibt sich ein Mittelwert von 1,6 Mikrosievert pro Tag ( $\mu\text{Sv/d}$ ). Der Mittelwert für den Aufenthalt auf Bikini liegt bei 0,75  $\mu\text{Sv/d}$ , also bei etwa der Hälfte des hannoverschen Wertes. Die Spitzenwerte von bis zu 16  $\mu\text{Sv/d}$  werden auf den Langstreckenflügen erreicht, was auf die Höhenstrahlung zurückzuführen ist. Nicht berücksichtigt hierbei ist der Beitrag von Neutronen, die ebenfalls in der Höhenstrahlung enthalten sind und den gemessenen Wert etwa verdoppeln würden.

Aus diesen Messungen ergibt sich eindeutig, dass der größte Teil der Dosis auf dieser Reise nach Bikini nicht während des Aufenthalts auf der Insel sondern auf dem Hin- und Rückflug aufgetreten ist. Es muss hier aber hinzugefügt werden, dass Filmteam und Autor auf Bikini ausschließlich importierte Speisen zu sich genommen haben, so dass die Aufnahme von Radioaktivität in lokal erzeugten Lebensmitteln vermieden werden konnte. Ähnlich würde es sicher einem Urlauber auf Bikini ergehen.

#### **Zusatz für den Taucher:**

Eine grobe, lediglich qualitative Aussage zur Frage der zusätzlichen Strahlenbelastung durch Tauchgänge zu den Schiffswracks der „Nuclear Fleet“ kann anhand von Messungen mit dem Personendosimeter gemacht werden. Bei den Tauchfahrten mit der PAGOO wurden beide Dosismessgeräte in der Nähe der Acryl-Frontscheibe des U-Boots platziert. Da die Frontscheibe Gamma-Strahlen (z.B. von Radiocäsium oder Radiokobalt) zwar schwächt aber nicht vollständig abschirmt und eine erhöhte Dosis nicht angezeigt worden ist, kann geschlossen werden, dass Taucher an den am Boden der Lagune angelauten Orten keiner erhöhten Strahlenbelastung ausgesetzt sind. Kontaminationsmessungen an Taucherhandschuhen und -anzug nach dem Auftauchen haben keine Hinweise auf anhaftende Radioaktivität gegeben.

Auch bei einem etwa einstündigen Tauchgang, bei dem ein Taucher eine Sedimentprobe (BK 9) vom „Bravo Krater“ genommen und das Personendosimeter in einer druckfesten Kunststoffkapsel (gamma-durchlässig) mitgeführt hat, konnte bei einer Minimalauflösung des Dosimeters von 1  $\mu\text{Sv}$  keine Dosiserhöhung festgestellt werden. Es ist allerdings zu betonen, dass die hier dargestellten Messungen und Ergebnisse nur sehr punktuell entstanden sind. Es wäre wünschenswert gewesen, mehr und messtechnisch noch leistungsfähigere Geräte verfügbar zu haben als die im Handgepäck mitgeführte Minimalausrüstung des Autors.

Bei einem Tauchgang zum Hangar der SARATOGA wurde das Dosimeter ebenfalls mitgeführt. Eine messbare Dosis war auch hier nicht nachzuweisen. Nach Robison wären hier die höchsten Konzentrationen an Co-60, Cs-137, Eu-155, Bi-207 und Am-241 im Sediment im Vergleich zu anderen Positionen im Bereich der Nuclear Fleet zu finden [Robison W.L.: *Estimates of the radiological dose to people living on Bikini Island for two weeks while diving in and around the sunken ships in Bikini Lagoon. In: The Archeology of the Atomic Bomb. US Department of the Interior, National Park Service, Southwest Cultural Resources Center Professional Papers No. 37, 1991*]. Gegenüber anderen Proben derselben Messreihe von Robison waren Sedimentproben vom Hangar bezüglich des Gehalts an Co-60 mit ca. 0,4 Bq/g auffällig hoch. Das radioaktive Co-60 wird durch die bei der Kernspaltung entstehenden Neutronen aus dem im Schiffsstahl enthaltenen stabilen Kobalt (Co-59) gebildet. Da es sich bei diesen Proben um Mischungen aus Sediment und Rostpartikeln gehandelt hat, ist davon auszugehen, dass die Konzentrationen im Rost selbst und folglich auch im Schiffsstahl um ein Vielfaches höher sind. Zur Orientierung: Nach der deutschen Strahlenschutzverordnung darf Metallschrott nicht zur Rezyklierung freigegeben werden, wenn der Co-60 Gehalt den Wert von 0,6 Bq/g überschreitet. Seit der Beprobung durch Robison im Jahre 1989 sind bis 2008 wieder  $3\frac{1}{2}$  Halbwertszeiten des Co-60 (HWZ = 5,3 Jahre) vergangen, so dass die Konzentration inzwischen auf etwa ein Zehntel des damaligen Wertes abgesunken ist.

## **ODL- und Kontaminationsmessungen (Hot Spots)**

Bei den Rundfahrten und Rundgängen über die Insel Bikini wurde neben dem Personendosimeter auch stets ein kombiniertes Dosisleistungs- und Kontaminationsmessgerät mitgeführt. Damit wurden etwa 50 Ortsdosisleistungsdaten (ODL) aufgenommen und ca. 100 Kontaminationsmessungen an den verschiedensten Oberflächen durchgeführt, wie an Straßen, Haus- und Bunkerwänden, Strand, bewachsenen Böden, Grabsteinen, Schrottteilen von Fahrzeugen und Baumaschinen, Kokosnüssen etc.

Die ODL-Werte stiegen prinzipiell vom Strand ausgehend zum Inselinneren an. Dabei lagen die niedrigsten Strandwerte bis zum Faktor 4 unter dem mittleren norddeutschen Wert von  $0,08 \mu\text{Sv/h}$  und die höchsten in der Inselmitte bis zum Faktor 2 darüber. Obwohl in Strandnähe gelegen wurden noch höhere ODL-Werte auf dem Friedhof gemessen, wo sie bis zum Faktor 3 über dem norddeutschen Wert lagen. Als Ursache für die erhöhte Dosis wurden einige alte Grabsteine und Grabumrandungen ausgemacht. Sie bestehen aus einem sehr porösen Sandstein, in den Fallout und Washout tief eingedrungen sein können, und sie sind mit Sicherheit vor den Testexplosionen angefertigt und aufgestellt worden. An diesen Oberflächen wurden auch die höchsten Flächenkontaminationen festgestellt. Durch Testmessungen mit den verfügbaren ‚Standard-Absorbern‘ zwischen Steinoberflächen und Messgerät (Blatt Papier absorbiert Alpha-Strahlung, Hand absorbiert bzw. schwächt Beta-Strahlung) konnte festgestellt werden, dass die Dosis durch Gamma-Strahlung verursacht wird, wobei an dieser Stelle in erster Linie Cs-137 als Strahlenquelle in Betracht kommt. Eine Probe für Laboranalysen wurde aus nahe liegenden Gründen nicht entnommen.

## **Probenanalysen von Boden, Sediment, Kokosnuss**

Die Dosis- und Kontaminationsmessungen vor Ort wurden durch gamma- und alpha-spektrometrische Analysen im Isotopenlabor des ZSR ergänzt. Sie ermöglichen die Identifizierung und eine genauere Quantifizierung der radioaktiven Bestandteile in den Proben. Untersucht wurden folgende Umweltproben von Bikini:

- BU 1: Bodenprobe 0 bis 2 cm vor dem Beobachtungsbunker im Inselinneren,
- BE 2: Bodenprobe 0 bis 2 cm vom Strand vor der Tauchstation,
- BM 3: Große Muschelschale vom Strand vor der Tauchstation,
- BM 4: Kleine Muschelschale von der Pazifikküste,
- BL 5: Bodenprobe 0 bis 2 cm vom Palmenhain im Inselinneren,
- BL 6: Bodenprobe 2 bis 7 cm vom Palmenhain im Inselinneren,
- BL 7: Bodenprobe 7 bis 15 cm vom Palmenhain im Inselinneren,
- BS 8: Sedimentprobe aus 80 m Tiefe vom Grund der Lagune bei der SARATOGA,
- BK 9: Sedimentprobe aus 15 m Tiefe von der östlichen Böschung des Bravo Kraters,
- BN10: Frisch geerntete Kokosnuss vom Palmenhain.

Bei der Identifizierung radioaktiver Materialien mittels Gamma-Spektroskopie wird die Tatsache genutzt, dass Gamma-Strahlung in bestimmten diskreten Energien auftritt, die charakteristisch sind für die radioaktive Substanz, die sie emittiert. Das äußert sich in scharfen Linien in einer Darstellung, in der die Strahlung - ähnlich wie durch ein optisches Prisma das sichtbare Licht - in diskrete Energien aufgefächert wird. Ein solches Gamma-Spektrum ist für die Bodenprobe BU 1 in Abbildung 2 (rote Linie) dargestellt. Die charakteristischen Linien für die drei bezeichneten Substanzen sind mithilfe eines Eichpräparats erzeugt worden und sind in Grau hinterlegt. So kann die Substanz bei identischen Linien leicht erkannt werden.

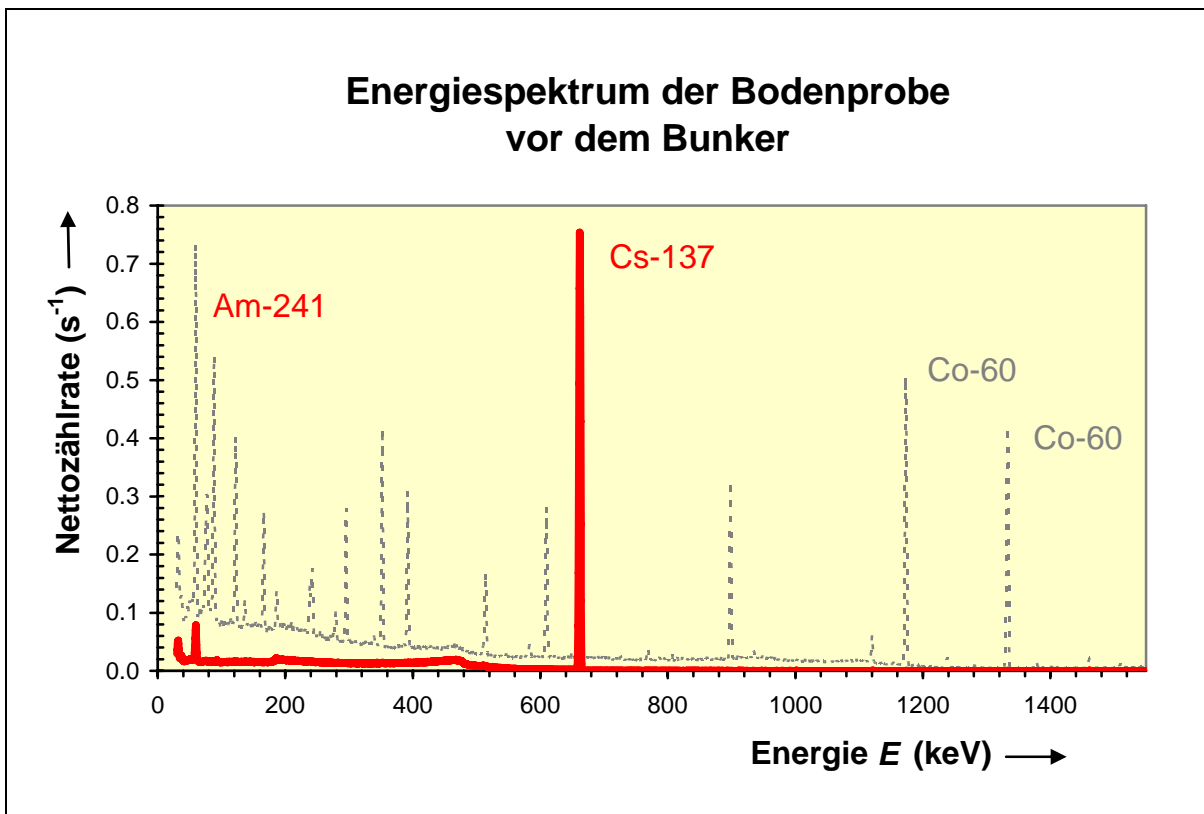


Abb. 2: Eichspektrum mit den gesuchten Linien (grau) und Probenspektrum (rot).

Aus den Zählraten (Zerfall pro Sekunde) kann die Radioaktivität in Becquerel pro Kilogramm (Bq/kg) berechnet werden. Das Spektrum zeigt, dass die Probe deutlich mehr Cs-137 als Am-241 und kein Co-60 enthält.

Während die Aufbereitung der Proben für eine gamma-spektrometrische Analyse relativ einfach ist, solange das Material für die Messung homogen in standardisierte Behälter gefüllt werden kann, ist die Vorarbeit für eine alpha-spektrometrische Bestimmung wesentlich aufwendiger, vor allem weil Alpha-Strahlen nur eine Reichweite im Bereich Millimeter haben und die Energielinien nicht so klar abgegrenzt sind wie bei der Gamma-Strahlung. Deshalb muss in mehreren chemischen Trennungsschritten die gesuchte Substanz möglichst von allen Beimengungen befreit und in einer



extrem dünnen Schicht auf einen Probenträger aufgebracht werden. Die Messung erfolgt dann in einer Vakuumkammer, um auch die Absorption der Alpha-Teilchen in Luft zu vermeiden.

Die Ergebnisse der Gamma-Analysen der Bodenproben sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Es fällt auf, dass die Gehalte von Cs-137 in den Sedimentproben von SARATOGA und Bravo Krater aber auch in der Strandprobe deutlich kleiner sind als die von Am-241. In den Bodenproben von Bunker und Palmenhain dagegen überwiegt das Cs-137 gegenüber dem Am-241.

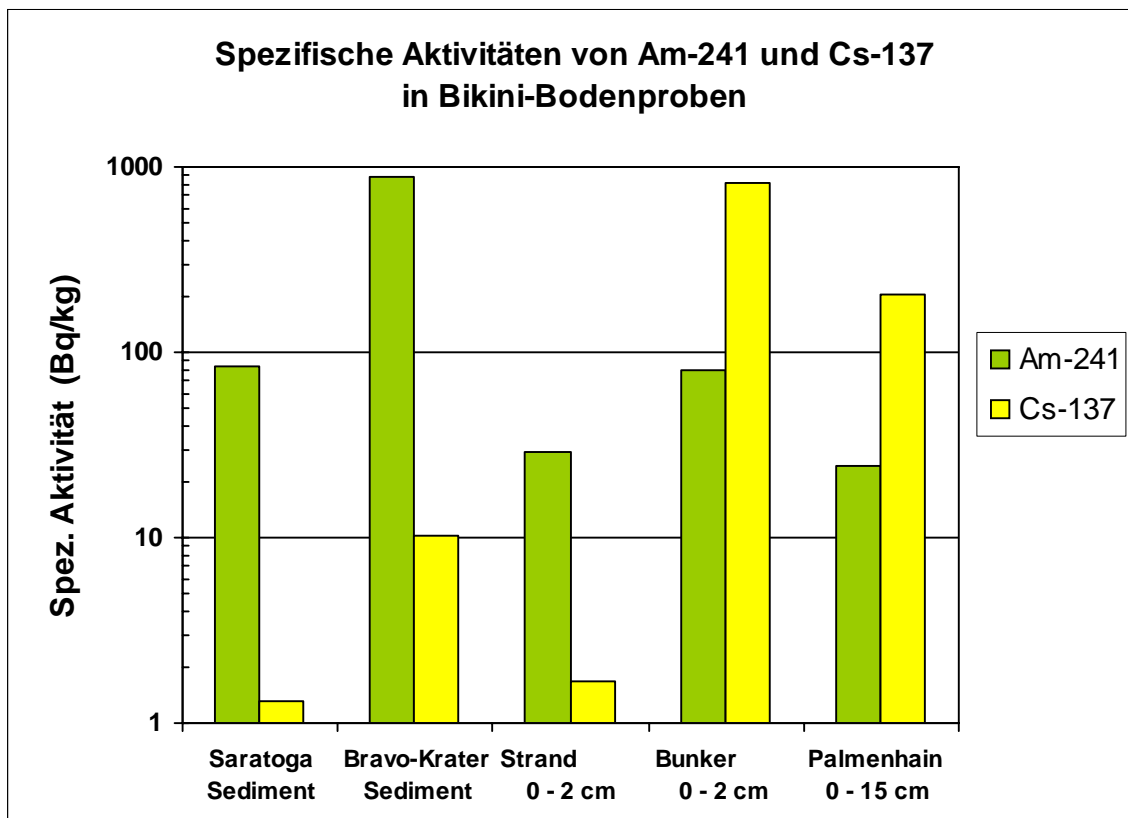


Abb. 3: Radioaktivitätsgehalte von Cäsium-137 und Americium-241.

Die Erklärung dafür liegt vor allem in der Tatsache, dass Cäsium im Gegensatz zu Americium häufig wasserlösliche Verbindungen eingeht, die folglich aus Proben, die von Wasser durchspült werden, leicht ausgewaschen werden. Der Cs-137 Gehalt in den oberen 15 cm des Bodens (Trockenmasse) im Palmenhain beträgt rund 200 Bq/kg, der des Am-241 etwa 25 Bq/kg. Ein ausgeprägtes vertikales Profil ist weder für Cs noch für Am erkennbar, was bedeuten könnte, dass der Boden vor der Anpflanzung der Palmen durchmischtes worden ist. Die IAEA Studie nennt für 1997 für die obere 15 cm Bodenschicht im Inselinneren für Cs-137: 1.900 Bq/kg und für Am-241: 250 Bq/kg, also um den Faktor 10 höhere Werte. In Oberbodenproben aus Deutschland sind die Cs-137 Gehalte mehr als zehnmals kleiner als die aktuell bestimmten.

Aufgrund des hohen Arbeits- und Zeitaufwands dauern die alpha-spektrometrischen Untersuchungen an. Im Vordergrund steht der Nachweis von Plutonium-239/240. Für die Strandprobe (BE 2) wurde eine Pu-239/240 Konzentration von 20 Bq/kg ermittelt.

Besonders hohe Konzentrationen von Cs-137 weist die IAEA Studie den für die Bikiniener sehr wichtigen Lebensmitteln Kokosnuss (Kokosmilch, Kokosfleisch), Brotfrucht und Pandana zu, wobei die Kokosnuss auch einen wesentlichen Beitrag zur Flüssigkeitsaufnahme leistet. Mit Spannung war daher die Ankunft der Kokosnuss (BN 10) erwartet worden, die am 1. März durch ‚Abschuss‘ mit einer alten Nuss frisch gerettet, am 2. Juni nach dreimonatiger Reise schließlich zur Messung vorlag.

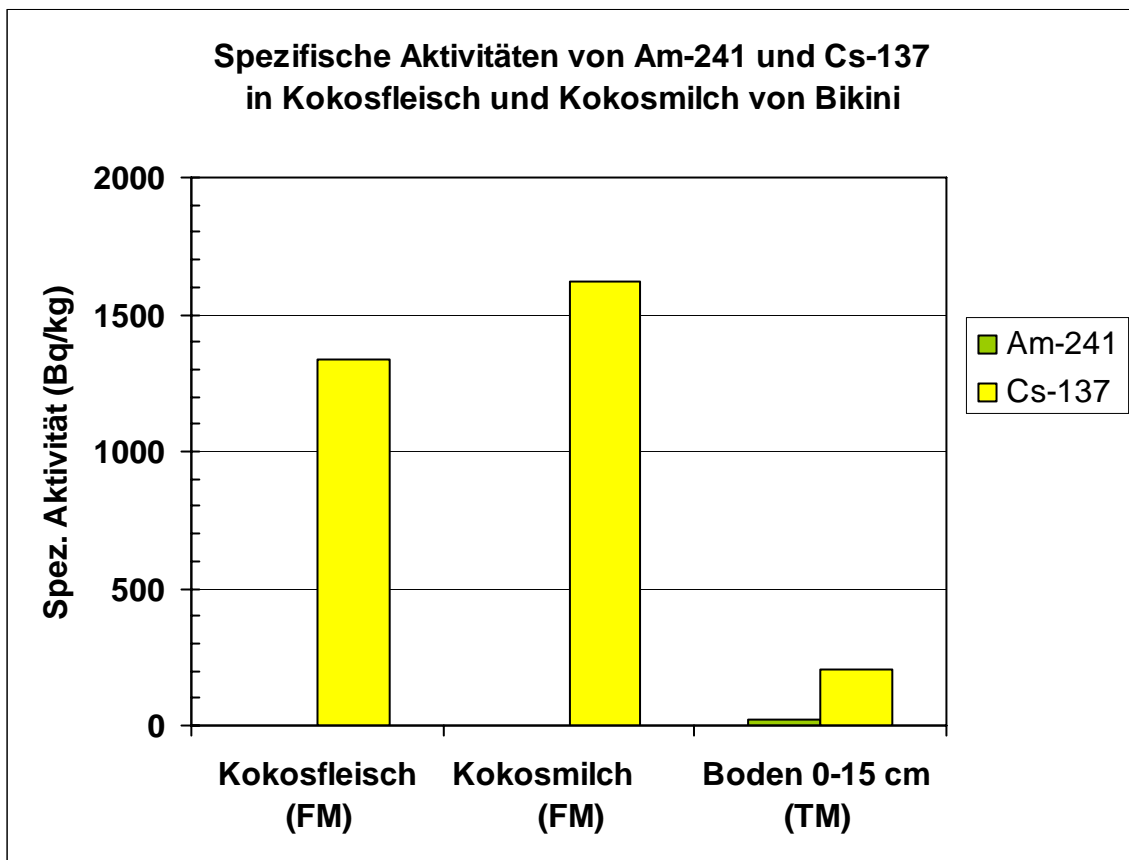


Abb. 4: Radioaktivitätsgehalte in der Frischmasse (FM) der Frucht im Vergleich zur Trockenmasse (TM) des Bodens.

Die gamma-spektrometrischen Messungen ergaben Cs-137 Gehalte von 1,6 kBq/kg für Kokosmilch und 1,3 kBq/kg für Kokosfleisch, bezogen auf die Frischmasse (FM), wie in Abbildung 4 dargestellt. Am-241 konnte nicht mehr nachgewiesen werden. Damit liegen die Cäsiumwerte dieser Kokosnuss zwar um den Faktor 2 bis 3 unter denen der IAEA Studie aber immer noch leicht über dem Richtwert der IAEA Basic Safety Standards von 1,0 kBq/kg für Nahrungsmittel, der aus den Richtlinien der Codex Alimentarius Commission (CAC) abgeleitet ist [*Food and Agriculture Organization of the UN, World Health Organisation: Codex Alimentarius, Guideline Levels for Radionuclides in Foods Following Accidental Nuclear Contamination, Rom, 1994*].

Abbildung 4 zeigt auch die Cs-137 Konzentration in den oberen 15 cm Boden des Palmenhains, wo die Kokosnuss geerntet wurde. Unter der Annahme, dass diese Konzentration in der gesamten Bodenschicht, aus der die Palme ihre Nährstoffe aufnimmt, die gleiche ist, kann man den so genannten Transferfaktor ( $TF_{Cs}$ ) für Cäsium vom Boden zur Frucht (Kokosmilch bzw. Kokosfleisch) berechnen, indem man die beiden Werte in Beziehung setzt: Frischmasse Frucht in Bq/kg zu Trockenmasse Boden in Bq/kg. Mit den aktuellen Daten ergibt sich für Kokosmilch ein  $TF_{Cs}$  von 8 und für Kokosfleisch ein  $TF_{Cs}$  von 6,5. Für deutsche Böden und Gemüseanbau, beispielsweise, wird dagegen ein mittlerer  $TF_{Cs}$  von = 0,05 gefunden. Die deutlich höheren Transferfaktoren auf Bikini haben ihre Ursache in dem sehr niedrigen Kalium- und dem geringen Tongehalt des von Korallen gebildeten Bodens. Das Cäsium kann nicht an die feinen Tonpartikel gebunden werden, ist also für die Pflanzen leicht verfügbar. Vor allem aber nehmen die Pflanzen in Ermangelung von Kalium das physiologisch ähnliche Cäsium auf, so dass beide Bodeneigenschaften zu den hohen Cäsiumgehalten in Früchten führen. Die logische Folge dieser Erkenntnis ist die bereits verschiedentlich vorgetragene Empfehlung der Aufbringung von Kaliumdünger. Ein Vorrat an Kaliumdünger wurde vom Autor in der Nähe der Reparaturwerkstatt entdeckt, ungenutzt und ungeschützt unter freiem Himmel, der Auflösung durch Regen preisgegeben.

Auch an dieser Stelle muss wieder darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der aktuellen Probennahme auf Bikini um sehr wenige und schon deshalb nicht repräsentative Proben, sondern allenfalls um Stichproben handelt.

Im Hinblick auf die Frage, ob eine permanente Be- bzw. Rücksiedlung unter den gegenwärtigen radiologischen Bedingungen zumutbar ist, sei auch angemerkt, dass völlig ungewiss ist, inwieweit die Ernährungs- und Lebensgewohnheiten nach Jahrzehnten abweichender, modernerer Lebensführung und mehreren Generationswechseln noch denen vor der Evakuierung entsprechen würden, wenn Bikinianer bzw. ihre Nachfahren auf die Insel zurückkehren. Die Abschätzung von Strahlenbelastungen auf der Basis überlieferter alter Daten ist deshalb sicher mit großen Fragezeichen behaftet. Bei den jetzt vorgefundenen Radioaktivitätspegeln erscheint ein Leben auf der Insel unter einigen Auflagen prinzipiell möglich. Zu diesen Auflagen sollte die Einrichtung einer Messstation gehören, in der Radioaktivitätsgehalte in Nahrungsmitteln bestimmt und Kontaminationen von Oberflächen bzw. von vermuteten Hot Spots gemessen werden können.

Für den Autor ist auf dieser Reise deutlich geworden, dass, obwohl mit vergleichbarer Vergangenheit belastet, die Reinigungs- und Wiederherstellungsaktionen auf Bikini bisher offenbar viel erfolgreicher waren als die auf dem sowjetischen Kernwaffentestgelände in Semipalatinsk, Kasachstan, das er ebenfalls vor wenigen Jahren besucht hat.

## Metallproben von der PRINZ EUGEN

Im Zusammenhang mit der Bildung von radioaktivem Co-60 im Schiffsstahl durch Neutronenstrahlung war die gamma-spektrometrische Analyse von zwei Metallstücken, ein Winkeleisen (Abbildung 5) und ein Flacheisen, von der PRINZ EUGEN von besonderem Interesse.



Abbildung 5: Zwei Ansichten des Winkeleisens der PRINZ EUGEN

Der deutsche Schlachtkreuzer PRINZ EUGEN ging nach der Kapitulation per Losentscheid unter den Alliierten in den Besitz der US Navy über, die sie am 5.1.1946 als USS PRINZ EUGEN in Dienst stellte. Nach einigen Umbauten wurde sie im Mai 1946 über Honolulu zum Bikini Atoll geschleppt, wo sie mit ca. 90 weiteren Schiffen als Test-Ziel bei den beiden Atombombenexplosionen der „Crossroad-Serie“ eingesetzt wurde. Sowohl den atmosphärischen „Able“-Test (Entfernung: 1.100 m) wie auch die Unterwasserexplosion „Baker“ (Entfernung: 1.800 m) überstand sie ohne deutlich sichtbare Schäden und wurde anschließend zum Marinestützpunkt des Kwajalein Atolls geschleppt. Ab Mitte Dezember 1946 stellte sich zunehmend Schlagseite ein, bis das Schiff am 22. Dezember desselben Jahres kenterte. Das Wrack liegt seit dem etwa 250 m vom Strand entfernt kieloben im seichten Wasser. Der hintere Teil des Rumpfes mit den Schraubenwellen und dem Ruder ragen sichtbar hervor.

Aufgrund des Einsatzes des Schiffes bei den Tests und der Messergebnisse von Robison an der SARATOGA, war erwartet worden, dass auch die Metallstücke der PRINZ EUGEN messbare Konzentrationen an Co-60 enthalten würden. Wie aus dem Gamma-Spektrum des Winkeleisens zu erkennen ist (Abbildung 6), enthält dieses Metallstück, wie auch das Flacheisen, keine nachweisbaren Gehalte an Co-60.

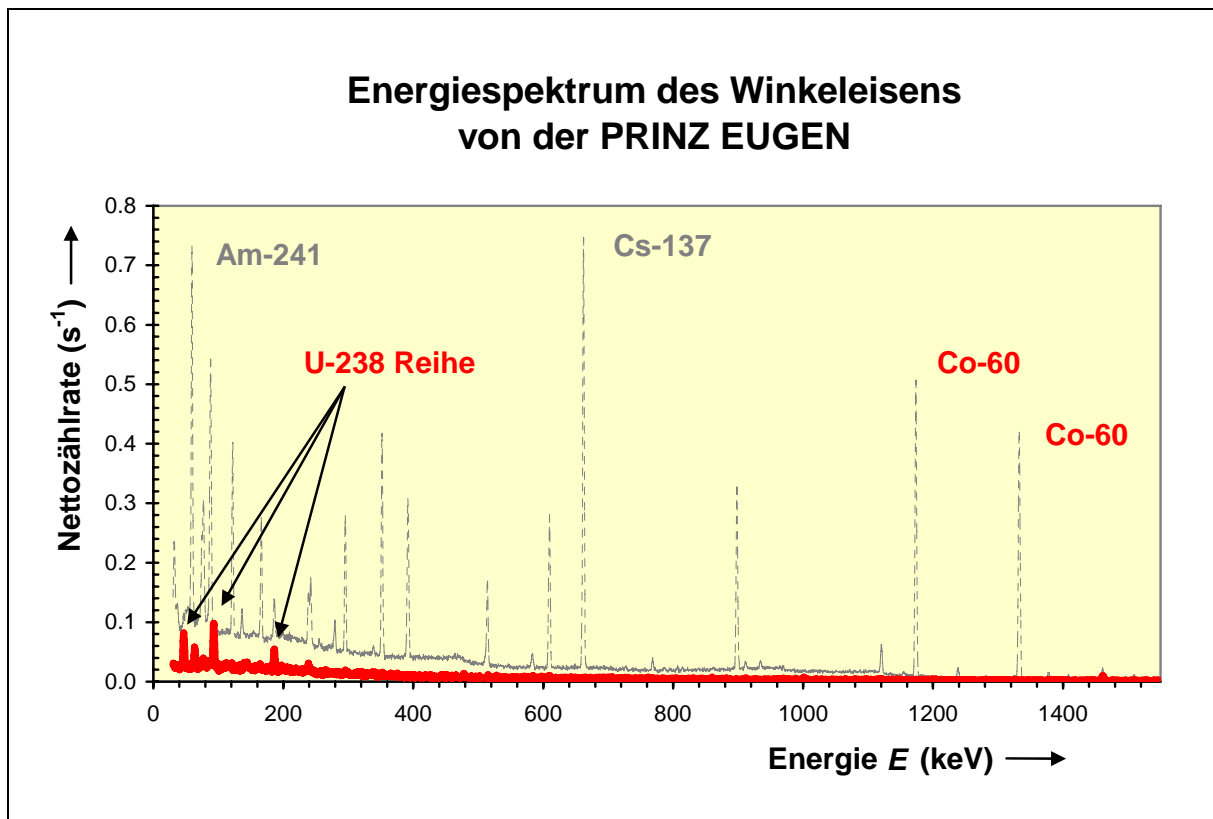


Abb. 6: Die Probe enthält kein Co-60, aber Radioaktivität aus der Uran-238 Reihe.  
(Die Nettozählrate der Metallprobe (rot) ist um das 20-Fache überhöht dargestellt.)

Zur Erklärung können mehrere Aspekte beitragen: a) Es konnte bisher nicht geklärt werden, von welchem Teil des Schiffes diese Metallstücke stammen bzw. ob sie bei den Tests überhaupt hinreichend großen Neutronenflüssen ausgesetzt waren, um die Bildung von entsprechenden Co-60 Konzentrationen hervorzurufen. b) Das Unterwasserschiff war von Wasser, d.h. von einem guten Neutronenabsorber umgeben, der den Neutronenfluss stark verringern konnte. c) Seit den Tests hat das gebildete Co-60 fast 12 Halbwertszeiten durchlaufen, was den heutigen Wert auf rund 1/4000 des ursprünglichen Wertes verringert hat. Radioaktivität aus der Uran-238 Reihe scheint in den organischen Anhaftungen des Metallstücks enthalten zu sein.

Aufgrund dieser beiden Analysen kann aber keinesfalls auf die Situation des gesamten Wracks geschlossen werden. Dazu wären Analysen von sehr viel mehr Proben von repräsentativen Stellen nötig, um etwa Fragen zur Gefährdung für Taucher an diesem Standort zu beantworten. Es ist davon auszugehen, dass gerade in Anbetracht der Nähe des Wracks zu einem Marinestützpunkt inzwischen mehr Details untersucht und bekannt sind.

**Weiterführende Veröffentlichungen am ZSR:**

Lachner J., Christl M., Bisinger T., Michel R., Synal H.-A.: Isotopic signature of plutonium at Bikini Atoll, Applied Radiation and Isotopes, submitted 2009.