

VKTA - 87
Januar 2008

**Messung geringer Radioaktivitäten in Untertagelaboratorien
mit Hilfe mehrdimensionaler Spektrometrie**

S. Niese

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Der Einfluss der natürlichen Radioaktivität auf den Untergrund.....	10
2.1	Radioaktivität von Gesteinen und Baumaterialien.....	10
2.2	Maßnahmen zur Verringerung der Radioaktivität von Detektoren.....	12
2.3	Auswahl von Konstruktions-, Abschirmungs- und Installationsmaterialien.....	12
2.3.1	Materialien für eine Abschirmkammer.....	12
2.3.2	Radioaktivität von Anstrichstoffen und Installationsmaterialien.....	12
2.3.3	Radon in der Luft.....	13
2.3.4	Abschirmung der Detektoren.....	13
2.3.5	Gesteine als natürliche Neutronenquellen.....	14
3	Kosmische Strahlung in der Atmosphäre.....	14
3.1	Vorgänge der Kosmischen Strahlung in der Atmosphäre.....	14
3.2	Intensitätsänderungen der kosmischen Strahlung mit dem Ort und der Zeit.....	16
3.3	Kernreaktionen in der Atmosphäre.....	16
3.4	Bildung von Neutronen.....	18
3.5	Myonen.....	18
3.6	Elektronen, Positronen und Photonen.....	19
4	Kosmische Strahlung in ober- und unterirdischen Laboratorien.....	20
4.1	Hochenergetische Neutronen und Protonen.....	20
4.2	Myonen.....	21
4.3	Neutronen.....	22
4.4	Reaktionen der kosmischen Strahlung mit den Detektor- und Abschirmmaterialien.....	23
4.5	Elektronen und Photonen.....	27
4.6	Der Einfluss der Tiefe auf den Untergrund der Detektoren.....	28
5	Ausgewählte Untertagelaboratorien.....	28
5.1	Oberflächennahe Untertagelaboratorien.....	30
5.2	Untertagelaboratorien in mittlerer Tiefe für die Messung geringer Radioaktivitäten.....	31
5.3	Untertagelaboratorien in großer Tiefe für kern- und astrophysikalische Experimente.....	35
6	Detektoren, Koinzidenz-, Antikoinzidenz-, mehrdimensionale Spektrometrie und Pulsformdiskriminierung in Untertagelaboratorien.....	38
6.1	Vergleich des Untergrundes von Ge-Halbleiterdetektoren in verschiedenen Untertagelaboratorien.....	38
6.2	Si-Detektor für Betastrahlung.....	39
6.3	Gaszähler in Untertagelaboratorien.....	39
6.4	Flüssigszintillationszähler.....	39
6.5	Neutronendetektoren.....	40
6.6	Mehrdimensionale Spektrometrie.....	40
6.7	Antikoinzidenzspektrometrie (AK).....	41
6.8	Anti-Compton-Spektrometrie.....	43

6.9	γ , γ^- und X, γ -Koinzidenz.....	44
6.10	Beta-Gamma-Koinzidenz.....	45
6.11	Anpassung der Verzögerungs- und der Koinzidenzsammelzeit.....	48
6.12	Pulsformdiskriminierung.....	48
7	Messungen von Proben geringer Radioaktivität.....	48
7.1	Datierung und Atmosphärenphysik.....	49
7.2	Untersuchung von Meteoriten und Mondproben.....	49
7.3	Neutronenaktivierungsanalyse.....	49
7.4	Radioaktivität in der Umgebung.....	49
7.5	Inkorporationsmessungen.....	50
7.6	Radioaktivität in Materialien für die Anwendung in der Technik.....	50
7.7	Untersuchungen für die Meeresforschung.....	50
7.8	Kontrolle von Kernexplosionen, Unfällen und anderen nuklearen Aktivitäten.....	50
7.9	Radioaktivität in Abfällen und in Materialien aus dem Betrieb, der Revision und der Stilllegung von Kernkraftwerken.....	50
7.10	Materialien für Detektoren für Low-level-Messungen.....	51
7.11	Der durch das Gerät selbst verursachte Untergrund.....	51
8	Schlussfolgerungen.....	51
9	Literatur.....	52
	Danksagung.....	61
	Lebenslauf.....	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere Konzentrationen c in % bzw. g/t und massenspezifischen Aktivitäten in Bq/kg radioaktiver Elemente in Gesteinen	10
Tabelle 2:	Konzentrationen von K, Th und U in ausgewählten Gesteinen der Lokalitäten von Untertagelabors sowie in verwendeten Baumaterialien. FK = Untertagemesslaboratorium „Felsenkeller“ in Dresden	10
Tabelle 3:	Gammaflüsse in Gesteinen, die jeweils 1g/t der radioaktiven Elemente enthalten	11
Tabelle 4:	Radionuklidkonzentration in Bq/kg in verschiedenen Materialien, die bei der Herstellung von Detektoren Verwendung finden.	12
Tabelle 5:	Spezifische Aktivitäten von Pigmenten für Korrosionsschutzanstriche [Bq/kg].....	13
Tabelle 6:	Aktivität von Installationsmaterialien [Bq].....	13
Tabelle 7:	Neutronenproduktionsrate in den oxidischen Bestandteilen der Gesteine.....	14
Tabelle 8:	Impulsraten r der Peaks in Zähler/h bei der Aktivierung von Germanium mit einer außerhalb der Bleiabschirmung angeordneten Isotopenneutronenquelle	24
Tabelle 9:	Untergrundzählraten r in Zähler/Tag von ausgewählten Peaks eines Ge –Detektors abgeschirmt mit 15 cm Blei und 10 cm Plastszintillator und verschiedenen Moderator-Absorberanordnungen innerhalb der Abschirmung	25
Tabelle 10:	Abschätzung der thermischen und schnellen Neutronenflüsse aus den in den Peaks in Germanium gemessenen Zählraten in cpd (Zähler /Tag)	26
Tabelle 11:	Zählraten [cps] neutroneninduzierter Nuklide in Ge-Detektoren, die im Untertagemesslabor FK und in einem oberirdischen Labor der PTB gemessen wurden.....	27
Tabelle 12:	Übersicht über Untertagelaboratorien.....	29
Tabelle 13:	Vergleich des Untergrundes von Ge – Spektrometern	38
Tabelle 14:	Untergrund r_U und $r_U(AK)$ ohne und mit Antikoinzidenz von Ge-Detektoren zwischen 40 und 2000 keV im Untertagemesslabor der IAEA (MEL)	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Neutronenenergiespektrum bei N. N.	18
Abbildung 2:	Schnitt durch den Hang an der Weißeritz beim	32
Abbildung 3:	Eingang zum Stolln mit dem Untertagemesslabor „Felsenkeller“	33
Abbildung 4:	HPGe-Detektoren in Bleiabschirmungen in der Messkammer mit Wänden aus Stahl und Blei.....	33
Abbildung 5:	Neutronendetektor der Fa. GBS-Elektronik im Labyrinth der	34
Abbildung 6:	Anordnung von sieben Plastdetektoren über einem	46
Abbildung 7:	$\beta\gamma$ -Koinzidenzspektren des NaI(Tl)-Detektors mit Plastdetektoren in der Mitte (1, 3), am Rande (2, 4), oberirdisch(1, 2) und 125 mwe untertage (3, 4)	47

1 Einleitung

Wenn die Nachweisgrenze bei der Messung geringer Radioaktivitäten zu hoch ist, muss man auch die Messung in einem unterirdischen Messraum in Betracht ziehen, denn eine Verbesserung der Nachweisgrenze im Untertagemesslabor findet immer dann statt, wenn bei der oberirdischen Messung die kosmische Strahlung wesentlich zum Untergrund der Messung beiträgt.

Der Aufbau und Betrieb eines Untertagemesslabors lohnt sich keinesfalls für alle Einrichtungen, in denen geringe Radioaktivitäten gemessen werden. Falls es sinnvoll erscheint, untertage zu messen, man aber selbst über kein entsprechendes Labor verfügt, bietet es sich an, die Probe in einem vorhandenen Untertagemesslabor zu messen oder messen zu lassen. So ist dieser Beitrag nicht nur für Betreiber von Untertagemesslabors gedacht, sondern auch für Mitarbeiter in anderen Labors, die eine Messung in einem Untertagelabor durchführen, durchführen lassen oder überhaupt erst einmal in Betracht ziehen. Dabei stützt sich diese Schrift auch auf ein Kapitel über Untertagemesslabors, das ich für den Band über Messung der Umweltradioaktivität in einer Serie über die Umweltforschung verfasst habe [1].

In diesem Beitrag wird neben den Möglichkeiten zur Messung in untertägigen Laboratorien auch auf die Anwendung der mehrdimensionalen Spektrometrie eingegangen, worunter Koinzidenz-, Antikoinzidenz- und zeitauflösende spektrometrische Verfahren zu verstehen sind. Letztere können in ähnlicher Weise wie die Messung in Untertagelaboratorien zur Verringerung des Untergrundes der Umgebungsstrahlung und darüber hinaus auch noch zur selektiveren Messung einzelner Nuklide und von Nuklidgruppen beitragen. Als Koinzidenz bezeichnen wir die Gleichzeitigkeit der Absorption von Energie in den interessierenden Bereichen in mehreren Detektoren. Bei der Koinzidenzmessung werden die gleichzeitigen oder in einem engen Zeitintervall erfolgenden Ereignisse für die Auswertung genutzt, bei der Antikoinzidenzmessung verworfen. Mit den entsprechenden Messanordnungen kann man sowohl Koinzidenz- als auch Antikoinzidenzmessungen durchführen. Sehr ausführlich wird auf die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Materie eingegangen weil die in Messlabors tätigen Mitarbeiter mit dieser Materie im Allgemeinen wenig vertraut sind. Das gilt auch für die Prozesse an denen Neutronen beteiligt sind. Dagegen wird auf die Messgeräte selbst wenig eingegangen, da darüber genügend Lehr- und Prospektmaterial im Umlauf ist. Die aufgeführten Anwendungen stellen nur Beispiele zur Illustration aus der Fülle der in den Publikationen beschriebenen und auf Veranstaltungen vorgetragenen dar.

Als vor 25 Jahren die ersten Messplätze in einer Untertagemesszelle in einem Stollen im Felsenkeller in Dresden installiert wurden, gehörte dazu neben einem Gammaskontrometer mit einem Ge(Li)-Detektor auch ein Messplatz mit sieben Plastdetektoren und einem NaI(Tl)-Detektor zur β, γ -Koinzidenzspektrometrie von radiochemisch abgetrennten Nukliden, insbesondere von ^{59}Fe . Auf diese Weise begann die Entwicklung des Untertagemesslabors Felsenkeller auch mit dem gleichzeitigen Einsatz von chemischer Trennung, untertägiger Messung und Koinzidenztechnik, die jede einzeln bereits einen Beitrag zur Verringerung des Untergrundes leisten, umso mehr in ihrer Kombination. Wenn man ein Untertagemesslabor nicht nur für eine sehr begrenzte Aufgabe betreibt, sollten auch viele Möglichkeiten zur Verbesserung des Nachweises von Radionukliden bereitgestellt werden. Dazu gehören neben der chemischen Abtrennung der in den Proben zu messenden Nuklide auch verschiedene Koinzidenzverfahren.

Die Quellen des Untergrundes einer Kernstrahlungsmessung sind die äußere Radioaktivität, die des Messsystems und die kosmische Strahlung, vorwiegend die darin enthaltenden Myonen und Neutronen. Da die Reichweite der hochenergetischen Nukleonen und Myonen, die größte Reichweite der von den radioaktiven Kernen ausgesandten Strahlung um ein bis zwei Größenordnungen übersteigt, benötigen wir für deren Reduzierung sehr dicke Abschirmungen. In diesem Beitrag soll ein Überblick über die physikalischen Grundlagen der Arbeiten im Untertagelabor und Beispiele für ihre technische Gestaltung, Instrumentalisierung und Anwendung gege-

ben werden. Die bei den Messungen in Untertagelabors gesammelten Erfahrungen sind ebenfalls für die Messung geringer Radioaktivitäten in oberirdischen Laboratorien von Nutzen.

Während zur Abschirmung gegen die Radioaktivität nur einige Zentimeter eines dichten Materials notwendig sind, erfordert die Abschirmung gegenüber den Komponenten der kosmischen Strahlung, die viel geringere Schwächungskoeffizienten besitzen, dicke Gesteinsschichten oder spezielle Antikoinzidenzdetektoren. In diesem Beitrag wird mit einer Einführung über die Komponenten der kosmischen Strahlung, deren Entstehung und Umwandlung in der Atmosphäre und deren Eigenschaften begonnen, um etwas von deren Herkunft und Wirkungen kennen zu lernen. Von ihren Umwandlungsprodukten sind die Neutronen und Myonen für die Messung geringer Radioaktivitäten nach der Abschirmung der Detektoren mit Metall am wichtigsten. Wem die Prozesse der Bildung und Wechselwirkungen der Komponenten der Höhenstrahlung zu kompliziert erscheinen, kann die entsprechenden Abschnitte beim ersten Lesen durchaus überspringen.

In den letzten Jahren hat man den für das Messergebnis eines Detektorsystems ohne Probe gebrauchten Ausdruck „Nulleffekt“ durch den Ausdruck „Untergrund“ ersetzt. Da die Verringerung dieses Untergrundes das Ziel der Einrichtung von unterirdischen Messlaboratorien ist, habe ich den häufiger gebrauchten Ausdruck „Untergrundlabor“ durch „Untertagelabor“ ersetzt, um Formulierungen, wie Messung des Untergrundes im Untergrundlabor, bei denen in einem Satz das gleiche Wort zwei verschiedene Bedeutungen hat, zu vermeiden.

Es gibt eine große Variation von Untertagelaboratorien bezüglich ihrer Tiefe, Konstruktion und Anwendung. Es wurden Messeinrichtungen in tiefen Gebäudekellern, alten Minen, in für den Verkehr genutzten Tunneln, in natürlichen Höhlen, alten unterirdischen Lagern, oder speziellen für die Messung angelegten unterirdischen Bauwerken eingerichtet.

Wir wollen uns besonders mit Laboratorien in mittlerer Tiefe beschäftigen, die für Probenmessungen genutzt werden. Die meisten Untertagelaboratorien sind sehr tief und dienen der Untersuchung grundlegender Probleme der Astro- und Elementarteilchenphysik, die für die Messung seltener Ereignisse einen extrem niedrigen Untergrund erfordern. Spezielle Untersuchungen wurden dabei ausgeführt, um Material mit geringster Radioaktivität für die Geräte und Abschirmungen auszuwählen bzw. herzustellen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen werden auch für Einrichtungen zur Probenmessung genutzt. Da auch in den tiefen Untertagelaboratorien nebenbei Proben geringer Radioaktivität gemessen werden, werden sie hier ebenfalls mit aufgeführt.

Bevor man Aktivitäten untertage gemessen hat, wurden die Empfindlichkeit und die Selektivität der Messung schon durch verschiedene Koinzidenzverfahren erhöht. Nachdem man mit diesen an Grenzen gestoßen war, schirmte man dann die kosmische Strahlung durch verschieden dicke Gesteinsschichten ab. Aber auch in den Untertagemesslabors sind Koinzidenzverfahren ebenso wichtig wie in oberirdischen Labors.

Die ersten unterirdischen Messungen der Radioaktivität wurden 1898 durch Julius Elster und Hans Geitel [2] aus Wolfsburg in 300 m und 800 m Tiefe in Bergwerken im Harz durchgeführt. Sie verglichen die Intensität der Radioaktivität von Radiumproben oberirdisch und in der Tiefe, um herauszufinden, ob die Quelle der Energie der radioaktiven Strahlung aus der Atmosphäre oder aus dem radioaktiven Stoff selbst stammt.

Vierzehn Jahre später, als allgemein anerkannt war, dass die Radioaktivität aus dem Zerfall der Atomkerne stammt und dass die Gesteine wegen ihres Gehaltes an Kalium, Thorium und Uran radioaktiv sind, nahm der Wiener Physiker Viktor Moritz Hess Elektrometer zu einer Reihe von Ballonflügen in der Annahme mit, dass sich die Intensität der Strahlung mit der Höhe wegen des größeren Abstandes zur Erdoberfläche verringert. Während bis zu einer Höhe von 1000 m die Intensität der ionisierenden Strahlung innerhalb der Messgenauigkeit konstant blieb, nahm

sie in größeren Höhen nicht wie erwartet ab, sondern zu. Dieses überraschende Ergebnis hat er bei einem Flug mit Sicherheit bestätigt, als er mit einem mit Wasserstoff gefüllten Ballon größere Höhen erreichen konnte. Er flog am 07.08.1912 von Aussig (jetzt Usti, CZ) über Bischofswerda nach Pieskow bei Berlin, wobei er am Schwielochsee eine Höhe von 5350 m erreichte und dabei mit der deutlich erhöhten Ionisation die kosmischen Strahlung entdeckte [3]. Der Beweis für die Existenz der Höhenstrahlung setzte einen geringen Eigenmesswert der Elektrometer und einen deutlichen die normalen Schwankungen überschreitenden Anstieg der Messwerte voraus. In den Folgejahren führte das intensive Studium der kosmischen Strahlung auch zur Entdeckung neuer Elementarteilchen [4].

Man erkannte bald, dass der Hauptanteil des Untergrundes von Gaszählrohren in den Messlaboratorien von der Höhenstrahlung stammt. Um deren Beitrag zu reduzieren, wurden die Zählrohre mit Antikoinzidenzzählrohren aktiv abgeschirmt. Die kosmische Strahlung durchdringt dicke Schichten von Detektorabschirmungen und kann mit dem Material der Abschirmung und des Detektors reagieren und dabei wieder Strahlung erzeugen. Der Beitrag der kosmischen Strahlung zum Untergrund wurde, nachdem man die Umgebungsradioaktivität mit Blei- bzw. Stahlkammern abgeschirmt hatte, immer wichtiger.

Perkins [5] von den Hanford Laboratories der General Electric Company in Richland, Washington, stellte auf der ersten Konferenz „Modern Trends in Activation Analysis“ in College Station, Texas, ein erstes sehr kompaktes und vielseitiges Koinzidenzspektrometer vor, worin später der zur Spektrometrie verwendete NaI(Tl)-Kristall, durch einen HPGe-Detektor ersetzt wurde. Perkins demonstrierte, wie der Untergrund sowohl mit einem Antikoinzidenzdetektor innerhalb der Bleiabschirmung als auch durch Anwendung der $\beta\gamma$ -Koinzidenz verringert wird. Aus den Hanford Works ist das in der Entwicklung von Methoden zur Messung geringer Aktivitäten und seltener Ereignisse in der Kern- und Astrophysik führende Pacific Northwest National Laboratory hervorgegangen.

Nachdem man den durch die kosmische Strahlung verursachten Untergrund mit Koinzidenztechniken schon beträchtlich reduziert hatte, begann man mit Untersuchungen in unterirdischen Laboratorien [6]. Es ist üblich, die Masseschicht, welche die Höhenstrahlung aus dem kosmischen Raum durchdrungen hat, in Meter Wasseräquivalent (mwe) anzugeben. Die Atmosphärendicke bei Meeresspiegel beträgt 10,2 mwe. Für Untertagelabors wird die Tiefe ebenfalls in mwe angegeben, wobei jedoch die Schichtdicke der Atmosphäre selten zu der, mit der Dichte multiplizierten Dicke der Gesteinsschicht addiert wird.

Tanaka et al. [7] beschrieben den Aufbau einer Untertagemesskammer in einer Tiefe von 100 mwe ($1 \text{ mwe} = 1000 \text{ kg/m}^2$) für Koinzidenzmessungen des Positronenstrahlers ^{26}Al in Meteoriten und demonstrierten, dass es vorteilhaft ist, auch bei untertägigen Messungen Koinzidenzverfahren einzusetzen. Später wurde in diesem Labor ein Beta-Gamma-Koinzidenz- und ein Antikoinzidenzspektrometer installiert [8]. Kaye et al. [9] führten systematische Untersuchungen des Untergrundes in einem Staudamm durch. In den folgenden Jahren wurde eine große Zahl von Untersuchungen in tiefen Tunnels und Bergwerken und anderen Lokalitäten durchgeführt und anschließend spezielle Untertagelabors für das Studium der Elementarteilchen und für die Messung geringer Aktivitäten errichtet [10].

Dabei erkannte man, dass sich die Vorzüge der Koinzidenzmethoden und die Installation der Messtechnik in Untertagelabors sehr gut verbinden lassen. Durch die Verringerung der Untergrundstrahlung in Untertagelabors verringern sich bei Koinzidenzmessungen auch die Zufallskoinzidenzen, wodurch die Messungen auf größere Sammelzeiten der Koinzidenzen ausgedehnt werden können. In dem Maße wie die Zählrate des Untergrundes durch solche Maßnahmen verringert wird, wachsen auch die Möglichkeiten, den zeitlichen Verlauf einzelner Impulse zu analysieren und für eine Identifizierung der Strahlungsquelle zu nutzen.

Die ersten Messungen von Proben zur Altersbestimmung mit Proportionalzählern, die in einem Untertagelabor installiert wurden, beschrieben Oeschger und Loosli [11]. Sie verglichen die Untergrundkomponenten in einem normalen Labor, in 70 mwe Tiefe unter dem Physikalischen Institut der Universität Bern und im St. Gotthard Tunnel in 3000 mwe Tiefe [12]. Der erste Einsatz eines Untertagelaboratoriums für die Neutronenaktivierungsanalyse erfolgte im Laboratorium "Felsenkeller" in Dresden bei 125 mwe [13]. In der Folgezeit wurden eine Anzahl Untertagelaboratorien für die Messung der Radioaktivität in mittlerer Tiefe und für grundlegende Untersuchungen in großen Tiefen eingerichtet, wobei die bei der Grundlagenforschung gesammelten Erfahrungen auch für die Konstruktion von oberirdischen Laboratorien und in mittlerer Tiefe angewendet wurden.

Bei den instrumentellen Messmethoden insbesondere bei der Aktivierungsanalyse wird der Untergrund meist durch die weiteren in der Probe vorhandenen Nuklide bestimmt. Deshalb ist für die Messung geringer Radioaktivitäten auch deren chemische Anreicherung in den meisten Fällen notwendig. Dabei ist es von großem Nutzen, wenn ein Untertagemesslabor strukturell oder partnerschaftlich mit entsprechenden chemischen Labors verbunden ist. Da es eine Vielzahl gleichberechtigter chemischer Anreicherungs- und Trennverfahren gibt und meist diejenigen die Besten sind, bei denen die entsprechenden Ausrüstungen und Erfahrungen im Labor existieren, wird auf eine entsprechende Darstellung verzichtet, um den Rahmen dieses Beitrages nicht zu sprengen. Damit soll auf keinem Fall ihre Bedeutung geschmälert werden.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts bestand eine Aufgabe der niederenergetischen Kernphysik darin, für die vielen neuen Radionuklide, die zum Teil recht komplizierten Zerfallschemata experimentell zu bestimmen, um Aussagen über die Kernstruktur gewinnen zu können. Dafür kamen Koinzidenzmethoden zum Einsatz, bei denen die Proben in die Nähe von zwei oder mehreren Detektoren gebracht und die Ausbeuten und Energien der in mehreren Detektoren gleichzeitig registrierten Ereignisse, die man als Koinzidenzen bezeichnet, analysiert wurden. Daneben wurden mit schnellen Registriereinrichtungen auch die zeitlichen Abstände zwischen den zueinander gehörenden Ereignissen gemessen und so die Lebensdauern angeregter Zustände, sofern sie nicht lang genug sind, dass man sie physikalisch oder chemisch isolieren konnte, bestimmt. Nach Kenntnis der Zerfallsschemata konnte man dann das gleiche Instrumentarium auch zur Bestimmung von Aktivitäten verwenden.

Dieses Instrumentarium, das wir hier unter dem Kapitel mehrdimensionale Spektrometrie zusammenfassen wollen, ist in vielen Fällen geeignet, den Untergrund aus der Umgebungsstrahlung und oft auch von störenden Nukliden zu unterdrücken. Dabei hat die Antikoinzidenzabschirmungen gegen Myonen, die außerhalb der Bleiabschirmung angebracht ist und auch als aktive Abschirmung bezeichnet wird, die Anti-Compton-Abschirmung, bei der der Koinzidenzdetektor innerhalb der Bleiabschirmung den Messdetektor umgibt und die Beta-Gamma-Koinzidenz auch in Untertagelaboratorien ein weites Anwendungsfeld. Koinzidenzmessanordnungen hatten sich schon bei oberirdischen Messungen zur Verringerung des Untergrundes bewährt. Aber bald erkannte man, dass in Untertagelabors geringer bis mittlerer Tiefe der Myonenfluss noch so hoch ist, dass sich auch hier die weitere Abschirmung mit Antikoinzidenzdetektoren und der Einsatz von Koinzidenzmethoden lohnt. Niese et al. [14] demonstrierten die Verringerung des Untergrundes bei Installation einer $\beta\gamma$ -Koinzidenzmesseinrichtung im Untertagelabor und Povinec et al. [15] installierten eine Messeinrichtung in einem Untertagemesslabor, mit der Koinzidenzen in vielfältiger Weise genutzt werden können.

Es können nicht nur die Erfahrungen bei der Arbeit in tiefen Untertagelaboratorien genutzt werden, sondern in Laboratorien geringer und mittlerer Tiefe können auch die Gesetzmäßigkeiten der Erzeugung und der Transport von aus Myonen erzeugten Neutronen und die Wirksamkeit von aktiven und passiven Abschirmungen zur Vorbereitung von Messungen in großen Tiefen untersucht werden. Weiterhin kann in ihnen das Neutronenspektrum untersucht werden, was durch Myonen und natürlicher Radioaktivität in den unterschiedlichsten Materialien erzeugt wird.

2 Der Einfluss der natürlichen Radioaktivität auf den Untergrund

2.1 Radioaktivität von Gesteinen und Baumaterialien

Die Radioaktivität der Gesteine und der aus ihnen hergestellten Baumaterialien ist sowohl in oberirdischen als auch in unterirdischen Laboratorien die Hauptquelle des Untergrundes bei unabgeschirmten Gammastrahlungsdetektoren. Wir können die Radioaktivität des umgebenden Materials direkt messen oder sie aus der chemischen Zusammensetzung des Materials berechnen. 1 g/t K, Th oder U (g/t = Mikrogramm pro Gramm oder ppm) produzieren eine massenspezifische Aktivität von 0,0031, 4,06 oder 12,5 Bq/kg der radioaktiven Nuklide ^{40}K , ^{232}Th und $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$. Dazu kommen noch jeweils gleiche Aktivitäten für die im Gleichgewicht befindlichen Radionuklide der Zerfallsreihen. Die mittleren Konzentrationen der radioaktiven Elemente in der oberen Erdkruste betragen 2,5 % Kalium, 2,5 g/t Uranium und 11 g/t Thorium. Das entspricht Aktivitäten von 772 Bq ^{40}K , 31 Bq ^{238}U und 44 Bq ^{232}Th pro kg Gestein.

Die radioaktiven Elemente gehören zu den großionigen lithophilen Elementen (LILE). Sie werden in Gesteinen und Mineralen der oberen Erdkruste mit erhöhtem Alkaligehalt, z. B. in Granitoiden, an- und in den basischen und ultrabasischen Gesteinen des Erdmantels abgereichert. Denn, die basischen Gesteine bildenden Ionen Mg^{2+} , Fe^{2+} und Si^{4+} haben so kleine Ionenradien, dass im Kristallgitter der aus ihnen gebildeten Minerale die großen Ionen der radioaktiven Elemente keinen Platz haben.

In der Tabelle 1 sind Mittelwerte für die Konzentrationen und massenspezifischen Aktivitäten langlebiger radioaktiver Elemente in verschiedenen Gesteinstypen aufgeführt. Aus den Gesteinen werden Baumaterialien mit den entsprechenden spezifischen Aktivitäten hergestellt: Kalk und Zement aus Kalkstein, Beton aus Zement und Gesteinen als Füllmaterial, Ziegel aus Ton.

Tabelle 1: Mittlere Konzentrationen c in % bzw. g/t und massenspezifischen Aktivitäten in Bq/kg radioaktiver Elemente in Gesteinen

Gesteinstyp	K [%]	^{40}K [Bq/kg]	Th [g/t]	^{232}Th [Bq/kg]	U [g/t]	^{238}U [Bq/kg]
Obere Kruste, MW	2,5	77,5	10,5	42	2,5	31
Ultrabasite	0,03	0,9	0,005	0,02	0,003	0,04
Dunit, Twin Sisters [16]	0,0001	0,003	0,01	0,04	0,004	
Basalte	0,83	26	3	12	0,5	6
Granite	3,3	100	18	72	3,5	44
Schiefer	2,3	71	11	44	3,2	40
Sandstein	1,1	34	1,7	6,8	0,45	5,6
Kalkstein	0,27	8,4	1,7	6,8	2,2	28

Tabelle 2: Konzentrationen von K, Th und U in ausgewählten Gesteinen der Lokalitäten von Untertagelabors sowie in verwendeten Baumaterialien. FK = Untertagemesslaboratorium „Felsenkeller“ in Dresden

Gesteinstyp	Lokalität	K [%]	Th [g/t]	U [g/t]
Serpentinit	Zöblitz (Sa.) für FK	0,01	0,08	0,1
Hornblendemonzonit	Plauenscher Grund (FK)	3,0	45	10
Steinsalz	Bergwerk Asse bei Braunschweig, in 925m Tiefe	< 0,1	< 0,005	<0,008
Kalkstein	Gran Sasso Laboratorium	0,02 – 0,17	0,06	0,35
Granit	Mont Blanc Tunnel	3,3 – 6,6	22,5	2,3 - 23

Wir können den Beitrag der natürlichen Radioaktivität auf den Untergrund im Gammasktrum eines abgeschirmten Detektors abschätzen. Dazu betrachten wir nur die hochenergetischen Gammalinien im Spektrum. Die Schwächung des von der Streuung hochenergetischer Linien stammende niederenergetische Anteil des Spektrums muss man nicht berücksichtigen, da dessen Form und Verhältnis zu den hochenergetischen Peaks sich nach wenigen cm Abschirmung nicht mehr verändert, weil die Quanten mit niedrigerer Energie einen höheren Absorptionskoeffizienten besitzen.

Der Gammafluss im Gestein ist proportional der Konzentrationen der radioaktiven Elemente. Wir erhalten eine massenspezifische Übergangsrate t einer bestimmten Linie als Produkt der spezifischen Aktivität a eines radioaktiven Elementes, dem Verzweigungsverhältnis b der interessierenden Zerfallskette und der Übergangswahrscheinlichkeit ω des Niveaus mit der interessierenden Gammaenergie.

$$t = a \cdot b \cdot \omega$$

Mit dem Absorptionskoeffizienten k_γ im Gestein erhalten wir einen spezifischen Gammastrahlungsfluss Φ_γ der entsprechenden Energie.

$$\Phi_\gamma = t/k_\gamma$$

Der Gammastrahlungsfluss wird durch eine Bleiabschirmung drastisch reduziert. Eine Abschirmung von 17cm verringert den Fluss der Gammalinie mit der höchsten Photonenenergie von 2.61 MeV, die von Tl^{208} , einer Tochter des Thoriums stammt, um das 6600fache.

Tabelle 3: Gammaflüsse in Gesteinen, die jeweils 1g/t der radioaktiven Elemente enthalten

Langlebige Radionuklide	^{40}K	^{232}Th	^{238}U
a, [Bq/mg] des Elements	0,0309	4,0	12,6
Tochternuklid mit der höchsten Energie	^{40}K	^{208}Tl	^{214}Bi
b, Verzweigung in der Zerfallsreihe	1,0	0,36	1,0
E_γ , [MeV]	1,460	2,614	1,764
w, Übergangswahrscheinlichkeit	0.107	1,00	0,16
t, spezifische Übergangsrate, [$s^{-1} mg^{-1}$]	$3,3 \cdot 10^{-4}$	1,44	2,02
k_γ , Absorptionskoeffizient im Gestein, [$cm^2 g^{-1}$]	0,052	0,039	0,05
Φ_γ , Gammafluss der entsprechenden Energie, [$cm^{-2} s^{-1}$]	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0,0369	0,0404
Mittlere Konzentration an K, Th und U in der oberen Erdkruste, [ppm]	30 000	10,5	2,5
Φ_γ , Mittlerer Gammafluss in der Kruste, [$cm^{-2} s^{-1}$]	0,19	0,39	0,101
k_{Pb} , Absorptionskoeffizient in Blei, [$cm^2 g^{-1}$]	0,056	0,042	0,047

Die chemische Zusammensetzung und die Gehalte an radioaktiven Elementen in den Gesteinen und Baumaterialien der Gebäude, in denen die Messgeräte aufgestellt sind, sind sehr verschieden, dementsprechend sind zur Abschirmung der von ihr ausgehenden Gammastrahlung unterschiedliche Dicken an Blei erforderlich. Dabei erhöht sich mit der Dicke der Bleiabschirmung nicht nur der Aufwand, der Platzbedarf und die Deckenbelastung, sondern in oberirdischen Labors und in geringer Tiefe werden durch hochenergetische Nukleonen und Myonen entsprechend der Masse an Blei mehr Neutronen erzeugt, die ihrerseits wieder den Untergrund der Messung erhöhen. Povinec et al. [15] führten Monte Carlo Rechnungen aus, wobei sie die jeweils optimale Dicke der Abschirmung ermittelten. Sie fanden für Blei 15 cm optimal. Ein geringerer Untergrund wird errechnet, wenn sich die Abschirmung sehr nahe am Detektor befindet. Rechtwinklige Abschirmungen erhöhen den Untergrund im Vergleich zu zylinderförmigen nur um einige Prozent.

2.2 Maßnahmen zur Verringerung der Radioaktivität von Detektoren

Während der Herstellung von Anlagenteilen ist zu vermeiden, dass einzelne Teile Zerfallsprodukte des Radons absorbieren [17]. Besonders wichtig ist die Auswahl der Materialien für die Photovervielfacher für Szintillationsdetektoren.

Es ist zweckmäßig für die Umhüllung der Germaniumkristalle Magnesium an Stelle von Aluminium zu verwenden. Indium, das normalerweise als Kontaktelement zwischen dem Germanium und dem Kupferkühlfinger verwendet wird, besitzt selbst eine geringe natürliche Radioaktivität, deshalb ist es zweckmäßig, das Indium durch reines radioaktivitätsfreies Blei zu ersetzen. Weitere Beispiele für Radionuklide in einigen Materialien sind in Tabelle 4 zusammengestellt [18]. Für einen extrem niedrigen Untergrund, wie er für einige grundlegende Untersuchungen notwendig ist, muss das Material für den Detektor selbst und das, welches mit ihm in Kontakt kommt, unterirdisch chemisch gereinigt und gelagert werden, um die kosmisch induzierte Radioaktivität aus dem Material zu entfernen und zu verhindern, dass neue gebildet wird [19].

Tabelle 4: Radionuklidkonzentration in Bq/kg in verschiedenen Materialien, die bei der Herstellung von Detektoren Verwendung finden.

Materialien	^{228}Tl	^{214}Bi	^{40}K
Aluminium	0,1 – 3,5	< 0,1 – 0,35	0,5 - 15
Beryllium	0,15	10	< 20
Epoxidharz	1 - 70	1 - 1000	< 20 - 1200
Molekularsiebe	8	40	150
Aluminiumbedampfte Mylarfolie	2	3	< 30
Gedruckte Schaltkreise	30	70	70
Quarz	0,1 - 1	< 0,3 - 15	< 3
Reflektormaterialien	< 0,01 – 1,5	< 0,1 - 3	< 0,1 - 5
Gummischwamm	1 - 3	1 - 20	< 10 - 30
Silikonschwamm	0,3	0,8	< 3

2.3 Auswahl von Konstruktions-, Abschirmungs- und Installationsmaterialien

2.3.1 Materialien für eine Abschirmkammer

Da zur Vorbereitung von Low-Level-Messungen zuerst die zum Bau der Einrichtung verwendeten Materialien auf ihre Radioaktivität hin gemessen werden müssen, sollen an dieser Stelle Materialien genannt werden, die vor ihrem Einbau in das Untertagemesslabor „Felsenkeller“ untersucht wurden. Die Wände der Metallkammer im Labor „Felsenkeller“ bestehen aus Stahlschichten unterschiedlicher spezifischer Aktivität an ^{60}Co . Beim Aufbau im Jahre 1994 enthielt das Außenblech von $9,3 \text{ g/cm}^2$ aus neuem Stahl $1,2 \text{ Bq/kg}$, es folgen 135 g/cm^2 Hartstahlgranulat mit $0,2 \text{ Bq/kg}$ und danach eine innere 71 g/cm^2 dicke Schicht aus altem Stahl und Blei, worin $< 0,1 \text{ Bq/kg}$ ^{60}Co gefunden wurde.

2.3.2 Radioaktivität von Anstrichstoffen und Installationsmaterialien

In vier kommerziellen Anstrichstoffen für den Korrosionsschutz der Stahlwände fanden wir im Mittel 10 Bq/kg ^{232}Th und 5 Bq/kg ^{226}Ra . Diese Aktivität war angesichts der Tatsache, dass man mit einer Anstrichmenge von $0,2 \text{ kg/m}^2$ rechnen muss, zu hoch. Die festen Bestandteile der Farbe waren Eisenoxid, Aluminiumpulver und Bariumsulfat. Zur Verringerung der Aktivität erwies es sich als sinnvoll, Bariumsulfat durch Talkum und Aluminium durch Zinkpulver zu ersetzen und das beste verfügbare Eisenoxid auszuwählen (Tab. 5).

Tabelle 5: Spezifische Aktivitäten von Pigmenten für Korrosionsschutzanstriche [Bq/kg]

Material	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Eisenoxid	2	1,3		0,5	0,4
Talkum	0,7	0,6	0,9	0,12	2,7
Zinkpulver	< 1	< 0,1		< 0,02	< 0,004

Installationsmaterialien enthalten ebenfalls beträchtliche Aktivitäten an natürlichen Radionukliden. Im Plastmaterial ist auch hier der mineralische Füllstoff die Hauptquelle der Radioaktivität. Tabelle 6 zeigt einige Beispiele für kommerziell erhältliche Installationsmaterialien.

Tabelle 6: Aktivität von Installationsmaterialien [Bq]

Material	Mengen- angabe	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Thermometer	1 Stück	0,3	0,35	0,08	1,2
Leuchtstofflampe	1 Stück	1,8	1,9	1,5	72
Kabel	30 m	7,5	22	15	18
Installationsmaterial	7 kg	11	18	1,5	7,4
Sockel	5 Stück	0,5	0,2	0,5	< 2,5
Verteiler	1 Stück	< 0,2	0,4	< 0,2	< 0,6
Schalter	1 Stück	< 0,05	< 0,03	< 0,04	< 0,3

2.3.3 Radon in der Luft

Um die Radonkonzentration in der Luft innerhalb der Detektorabschirmung zu verringern, wird in diese der im Kryostaten verdampfende Stickstoff eingeleitet. Die je nach geologischen Bedingungen erhöhten Radonkonzentrationen in Höhlen, Bergwerken oder anderen unterirdischen Orten wird dadurch verringert, dass man unter Überdruck klimatisierte Außenluft einführt. Ohne Frischluftzufuhr fanden wir im Stollen im „Felsenkeller“ eine Aktivität an ^{222}Rn von ungefähr 200 Bq/m³. Nach Installation der Luftzirkulation betrug die Aktivität der Radonzerfallsprodukte in den abgeschirmten Messkammern zwischen 30 und 60 Bq/m³, was der Aktivität außerhalb des Stollens entspricht.

2.3.4 Abschirmung der Detektoren

Wegen der hohen Kosten für Blei mit geringen Aktivitäten an ^{210}Pb wird das Material mit extrem niedrigen Werten an ^{210}Pb (0,5 - 2 Bq/kg) nur für die inneren 2 cm und für die folgenden 5 cm meist Blei mit ungefähr 40 Bq/kg eingesetzt. Die äußeren Schichten dürfen dann höhere Aktivitäten an ^{210}Pb enthalten. ^{210}Pb erhöht den Untergrund bei den Messungen nicht nur durch Bremsstrahlung aus dem Betazerfall des Tochternuklids ^{210}Bi , sondern auch von der, wenn auch mit einer äußerst geringen Übergangswahrscheinlichkeit auftretenden Gammastrahlung des ^{210}Po , das über ^{210}Bi aus ^{210}Pb gebildet wird.

2.3.5 Gesteine als natürliche Neutronenquellen

Während in oberirdischen Labors und in solch geringer Tiefe die Neutronen vorwiegend durch hochenergetische Neutronen und Protonen und in mittleren Tiefen durch Myonen gebildet werden, gewinnt in Tiefen unter 50 mwe die Neutronenproduktion in Gesteinen durch (α, n) -Reaktionen der Alphastrahlung der natürlichen Zerfallsreihen mit leichten Atomkernen wie ^9Be , ^{17}O , ^{23}Na , ^{25}Mg , ^{27}Al , ^{29}Si größere Bedeutung. Bei großen Gesteinsbedeckungen werden die Neutronen ausschließlich durch natürliche Radioaktivität gebildet, indem Alphateilchen der Nuklide der Thorium- und Uranzerfallsreihen im Gestein mit den leichten Elementen reagieren. Dazu kommt noch ein geringerer Anteil von Neutronen aus der Spontanspaltung von ^{238}U .

Im Gran Sasso Laboratorium wurden unter einer Bedeckung von 3400 mwe in einer Arbeitskammer, die in den Kalkstein gehauen war, die Neutronen von Rindi et al. [20] in den Energiebereichen thermisch $< 0,05$ eV, $0,05$ eV – 1 keV, und > 2.5 MeV gemessen. Sie verwendeten ^3He -Zähler für thermische, moderierte Zähler für schnelle und Zähler mit Moderator und Cd-Mantel für epithermische Neutronen. Sie fanden 0,02, 0,013 und 0,026 Neutronen $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

In einem typischen Granit in einem alten Bergwerk in Brook Hills, Australien, der 3,3 ppm U und 12,9 ppm Th enthält, beträgt die Neutronenausbeute $19.5 \text{ cm}^{-3}\text{y}^{-1}$ aus (α, n) -Reaktionen der natürlichen Radioaktivität und unter Berücksichtigung des Beitrages der spontanen Spaltung insgesamt $23.8 \text{ cm}^{-3}\text{y}^{-1}$. Unter Gleichgewichtsbedingung ist in den Gesteinen die Produktionsrate an Neutronen $R_{N,p}$ gleich der Absorptionsrate $R_{N,a}$. Mit einem Absorptionskoeffizienten $K_a = 1,53 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ und einer Produktionsrate von $7,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ berechneten Hashemi-Nezhad und Peak [21] einen Neutronenfluss von $\Phi = 0,49 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die entsprechenden Neutronenproduktionsraten sind in (Tab. 7) angegeben.

Tabelle 7: Neutronenproduktionsrate in den oxidischen Bestandteilen der Gesteine

Oxide	Oxide im Gestein [Gewichts-%]	$R_{N,p}$ [$\text{g}^{-1}\text{y}^{-1}$] pro 1 ppm Th und 1 g Oxid	$R_{N,p}$ [$\text{g}^{-1}\text{y}^{-1}$] pro 1 ppm U and 1g Oxid
SiO_2	57,6	0,184	0,42
Al_2O_3	23,8	0,89	0,48
FeO	7,52	0,157	0,046
K_2O	4,21	0,23	0,078
MgO	1,78	1,15	0,62
H_2O	1,16	0,096	0,046
TiO_2	0,97	0,45	0,25
CaO	0,91	0,048	0,023
Fe_2O_3	0,89	0,137	0,049
Na_2O	0,81	3,70	3,00

3 Kosmische Strahlung in der Atmosphäre

3.1 Vorgänge der Kosmischen Strahlung in der Atmosphäre

Um das Verhalten der kosmischen Strahlung in den Gesteinsschichten und Konstruktions- und Detektormaterialien im Untertagelaboratorium verstehen zu können, ist es nützlich, etwas über ihre Quellen und ihre Wechselwirkung in der Atmosphäre zu wissen. In der kosmischen Physik gibt man meist die vom außeratmosphärischen Raum aus gesehene Tiefe der Atmosphäre und weniger die von der Erdoberfläche aus gesehene Höhe an. Als Einheit der Tiefe verwendet man g/cm^2 oder Meter Wasseräquivalent (mwe). $1 \text{ mwe} = 100 \text{ g}/\text{cm}^2$. Normalnull hat dann eine Tiefe

von 1020 g/cm^2 , was $10,2 \text{ mwe}$ entspricht. Die Höhe gibt man wie üblich in m oder km an. Die Prozesse in der Atmosphäre nahe der Erdoberfläche sind denen in den oberen Erdschichten sehr ähnlich. Sie werden ausführlich von Schopper et al. [22], Theodorsson [23], Heusser [24] und Ziegler [25] beschrieben.

Die in die Atmosphäre eindringende primäre kosmische Strahlung besteht aus leichten Atomkernen folgender relativen Zusammensetzung:

Protonen	86 %
Helium	12,7 %
Schwerere Kerne	1,3 %.

Die Teilchen besitzen eine sehr hohe Energie, die 10^{20} eV erreicht. Die Energieverteilung $n(E)$ der eintreffenden Teilchen pro Raumwinkel, pro Sekunde und GeV wird für Teilchenenergien von 10 GeV und darüber durch

$$n(E) = 0,3/E^{2,5 \pm 0,2}$$

beschrieben. Der Fluss der primären Teilchen beträgt annähernd $1000 \text{ Partikel m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die kosmische Strahlung ist im erdfernen Raum isotropisch. Wenn sie sich der Erde nähert, wird ihre Richtung durch den starken Dipol des magnetischen Erdfeldes beeinflusst, wobei niederenergetische Strahlung in den Raum zurückgelenkt wird. Ein vertikales Teilchen muss am geomagnetischen Äquator eine Energie von mindestens 15 GeV besitzen, um die Erde zu erreichen, in mittleren geomagnetischen Breiten beträgt das Minimum 1 – 4 GeV, während an den magnetischen Polen die vertikale Strahlung nicht beeinflusst wird.

Während des Durchganges der Protonen und der anderen Kerne durch die Atmosphäre finden mit deren Atomkernen Reaktionen statt, die zu einer veränderten Zusammensetzung der kosmischen Strahlung und der Energie der einzelnen Komponenten führen. Da die Energien der kosmischen Strahlung mehrere Größenordnungen höher als die Bindungsenergie der Nukleonen im Kern ist, kann man alle Nukleonen der an Reaktionen mit hochenergetischer Strahlung beteiligten Kerne als frei ansehen. Bei den Prozessen entstehen Pionen, Neutronen, Myonen, Elektronen und Photonen. Die Gesamtintensität der kosmischen Strahlung wird beim Durchgang durch die Atmosphäre verringert.

Auf Meeresniveau außerhalb eines Gebäudes betragen die Flussdichten [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] in Teilchen der einzelnen Bestandteile im Mittel [26]:

Myonen	190
Elektronen	46
Protonen	1,4
Pionen	0,13
Neutronen	64

Wir erkennen, dass der Fluss der Protonen durch die Atmosphäre insgesamt um einen Faktor von ca. 700 verringert wird. Dabei ist der Reduktionsfaktor bei Protonen höherer Energie größer als bei denen niedrigerer Energie. Für Protonen mit einer Energie von $0,2 \text{ GeV}$ beträgt er $2 \cdot 10^3$ und für solche von 10 GeV $5 \cdot 10^3$.

Da sich während des Durchgangs durch Materie die Art der Bestandteile, ihre Anzahl und ihre Energie verändert, müssen die Prozesse mit komplexeren Angaben als bei niederenergetischen kernphysikalischen Vorgängen beschrieben werden. So werden die mittleren freien Weglängen (Absorptionslängen) entweder auf alle Teilchen oder nur auf Nukleonen bezogen, da es nicht nur Prozesse gibt, wo nach Verlust ihrer Energie die Teilchen eingefangen oder neutralisiert werden, sondern auch Prozesse, bei denen aus einem hochenergetischen Teilchen mehrere

zum Teil auch andere Teilchen von niederer Energie entstehen. Dementsprechend sind auch die Absorptionslängen nicht in allen Tiefen konstant.

Außerhalb der Erdatmosphäre ist die mit einem in einer Rakete angeordneten Geiger-Zähler gemessene Zählrate konstant. In einer Höhe von ca. 50 km, nachdem die primären kosmischen Teilchen eine Atmosphärenschicht von 2 g/cm^2 durchdrungen haben, beginnt die Zählrate anzusteigen, um bei einer Tiefe von 150 g/cm^2 (1,5 mwe), die einer Höhe von 13,7 km entspricht, ein Maximum zu erreichen. Der Anstieg der Zählrate in der oberen Atmosphäre wird durch die Produktion sekundärer Teilchen verursacht. In der Höhe der maximalen Zählrate ist die Produktion sekundärer Teilchen gleich dem Verlust jener Teilchen, die ihre gesamte Energie, hauptsächlich durch Kernstöße, teilweise auch durch Ionisation, verlieren. Unterhalb dieser Region nimmt die Zählrate drastisch ab, da der Verlust an ionisierenden Teilchen größer als die Bildung neuer ist. Eine Vielfalt von sekundären Teilchen wird in allen Arten von Materialien produziert, wobei die Produktion teilweise in zwei und mehr Stufen stattfindet.

3.2 Intensitätsänderungen der kosmischen Strahlung mit dem Ort und der Zeit

Die Veränderung der Intensität der kosmischen Strahlung mit dem Ort und der Zeit wird ausführlich von Ziegler [25] beschrieben. Er hat ihre Intensität, die durch die geomagnetische Breite beeinflusst wird, für wichtige Orte der Erde zusammengestellt. Während an den magnetischen Polen alle primären Teilchen ungehindert in die Atmosphäre gelangen, werden mit wachsender geomagnetischer Breite nur Teilchen, die je nach Breite eine Mindestenergie besitzen müssen, von dem abschirmenden Magnetfeld in die Atmosphäre gelassen.

Die magnetische Modulation durch solare Eruptionen bewirkt eine Veränderung der Intensität der kosmischen Strahlung in einem Zyklus von 11 Jahren, die umgekehrt mit der Sonnenfleckentätigkeit korreliert ist. Eine zusätzliche Verringerung der Intensität der kosmischen Strahlung bis zu 10 % wird durch "solare Stürme" verursacht. Diese dauern meist einige Tage, können aber auch mehrere Wochen anhalten. Weitere Veränderungen der Intensität bewirken Veränderungen des Druckes der Atmosphäre und saisonale und tageszeitliche Temperaturschwankungen.

3.3 Kernreaktionen in der Atmosphäre

Indem die primären hochenergetischen Protonen die Atmosphäre durchdringen, verringert sich sowohl ihre Zahl als auch ihre Energie. Die mittlere freie Weglänge für Stöße (Stoßlänge l_P) energiereicher Protonen beträgt in der Atmosphäre weitgehend unabhängig von ihrer Energie ca. 80 g/cm^2 . Im Mittel verlieren die Protonen bei jeder Kollision ungefähr die Hälfte ihrer Energie. Die hochenergetischen primären Teilchen verursachen explosionsartige Ereignisse, wenn sie auf Atomkerne, meist von Stickstoff und Sauerstoff, treffen. Die Reaktionen sind für alle Kerne ähnlich. Die erste Phase besteht im Zusammentreffen mit einem Nukleon innerhalb des Kernes, denn gegenüber den hochenergetischen Teilchen verhalten sich die Nukleonen im Kern wie isolierte Teilchen. Es folgen wiederholte elastische und inelastische Stöße, wobei Pionen, Protonen und Neutronen mit Energien von 200 bis 500 MeV erzeugt werden. Diese werden in die Richtung des ursprünglichen Protons emittiert. Nach dieser energiereichen nuklearen Kaskade befinden sich die verbleibenden Kerne in einem hoch angeregten Zustand und verdampfen dann weitere Protonen und Neutronen isotropisch mit einem breiten Energiespektrum bis etwas über 10 MeV, wobei sich das Maximum bei ca. 1 MeV befindet. Sie stellen im Sinne der kosmischen Strahlung die niederenergetischen Sekundärnukleonen dar.

Beträgt die Energie des auftreffenden Protons weniger als 1 GeV, so sind die emittierten Teilchen vorwiegend Protonen und Neutronen, über 1 GeV steigt der Anteil der Pionen. Energereiche Neutronen und Pionen können die gleiche Art von Kollisionen wie Protonen bewirken und ihre Stoßlänge ist ähnlich. Nach einer Kollision besitzen die energiereichen Protonen ebenso wie die energiereichen Neutronen in der Atmosphäre eine mittlere freie Weglänge für Absorpti-

on (l_a = Absorptionslänge) von 120 g/cm^2 , die beträchtlich größer als ihre Stoßlänge l_r von 80 g/cm^2 ist. Da die Gesamttiefe in der Atmosphäre ca. 13 Stoßlängen beträgt, erreicht praktisch kein primäres Proton ohne Kollision die Erdoberfläche. Während die Stoßlänge, welche die mittlere Weglänge eines Teilchens bis zur nächsten Wechselwirkung beinhaltet, leicht zu verstehen ist, ist die für die Beschreibung der Gesamtprozesse zutreffende Absorptionslänge eine viel komplexere Größe, beinhaltet mehrere Prozesse, die sowohl zur Erhöhung als auch zur Verringerung der Anzahl der Teilchen führen und ist von größerer praktischer Bedeutung. Für die Beschreibung der Prozesse mit hochenergetischen Teilchen wird die Absorptionslänge häufiger benutzt als der zur Beschreibung der Absorption radioaktiver Strahlung übliche reziproke Absorptionskoeffizient

$$k_a = 1/l_a$$

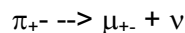
Die Stoßlänge $l_{rP} = 1/n\sigma_g$ entspricht annähernd dem Wert, der sich aus dem geometrischen Wirkungsquerschnitt σ der beteiligten Teilchen,

$$\sigma = \pi (r_T + r_{CR})^2$$

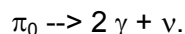
den Radien r_T und r_{CR} für den Targetkern T und der Teilchen der kosmischen Strahlung CR, die sich aus dem Nukleonenradius $r_0 = 1,37 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ und der Nukleonenzahl A der beteiligten Kerne berechnen lassen [27, 28].

$$r = r_0 A^{1/3}$$

Bei den hochenergetischen Stoßkaskaden werden neutrale, positive und negative Pionen (π -Mesonen) π_0 , π_+ und π_- mit annähernd gleicher Wahrscheinlichkeit gebildet. Deren Lebensdauer ist sehr kurz. Ein geladenes Pion zerfällt mit einer Halbwertszeit von $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ in ein geladenes Meson μ und ein Neutrino ν ,



und ein neutrales Pion mit einer Halbwertszeit von $1,8 \cdot 10^{-16} \text{ s}$ in zwei Gammaquanten γ und ein Neutrino



Ein geladenes Pion reagiert intensiv mit Kernen und verursacht weitere Kernreaktionen. In Luft in Meereshöhe, bei der höchsten Gasdichte, besitzt ein Pion der Energie von 1 GeV eine mittlere Weglänge von 7 g/cm^2 . Da das nur 8 % ihrer Wechselwirkungslänge sind, zerfällt der Hauptteil der Pionen in der Atmosphäre ohne Kollisionen mit Atomkernen. Wegen ihrer geringen Halbwertszeit bewegen sich die neutralen Pionen π_0 in Luft bis sie zerfallen nur einige Mikrometer. Die gebildeten Photonen bilden elektromagnetische Kaskaden und sind die Hauptquelle der weichen Komponente der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre.

Hochenergetische Protonen und Pionen werden in der oberen Atmosphäre exponentiell mit der Tiefe mit einer Absorptionslänge von ca. 120 g/cm^2 absorbiert. Die Protonen produzieren mit einer dem Fluss annähernd proportionalen Rate kontinuierlich Sekundärteilchen. Das Flussverhältnis von Pion zu Proton steigt mit der Tiefe langsam an und beträgt in Meereshöhe annähernd 0,08.

3.4 Bildung von Neutronen

Jedes primäre Proton produziert eine große Zahl von Neutronen mit einem breiten Energiespektrum. Dazu gehören sowohl Stoßneutronen der Hochenergiekaskaden als auch Verdampfungsneutronen. Das Energiespektrum letzterer wird durch

$$P(E)dE = E e^{-E/E_0} dE$$

ausgedrückt, wobei die Temperatur der angeregten Kerne E_0 , ungefähr 1 MeV beträgt. Die Weglänge der Neutronen in der Atmosphäre ist größer als die der Protonen, denn sie verlieren keine Energie durch Ionisation. Die Neutronen werden durch elastische und inelastische Stöße mit Atomkernen abgebremst, bis sie schließlich eingefangen werden. Die mittlere freie Weglänge beträgt ungefähr 150 g/cm^2 . Da Produktions- und Bremsprozesse der Neutronen in jeder Höhe ungefähr gleich sind, verändert sich unterhalb 200 g/cm^2 zwar deren Intensität aber nicht deren Energiespektrum. Auf Meereshöhe (N.N.) erstreckt sich das Energiespektrum von thermischer Energie bis etwas über 1 GeV. Das an sich kontinuierliche Neutronenspektrum dessen Intensität mit der Energie abnimmt, hat drei ausgeprägte Maxima. Eines wenig über der Umgebungstemperatur, das den thermischen Neutronen zugeordnet ist, ein Maximum bei 1 MeV, das durch die Verdampfungsneutronen verursacht wird, und ein drittes bei ungefähr 80 MeV, der häufigsten Energie der Kollisionsneutronen (Abb.1). Mehr als 10 % der Neutronen besitzen eine Energie über 10 MeV.

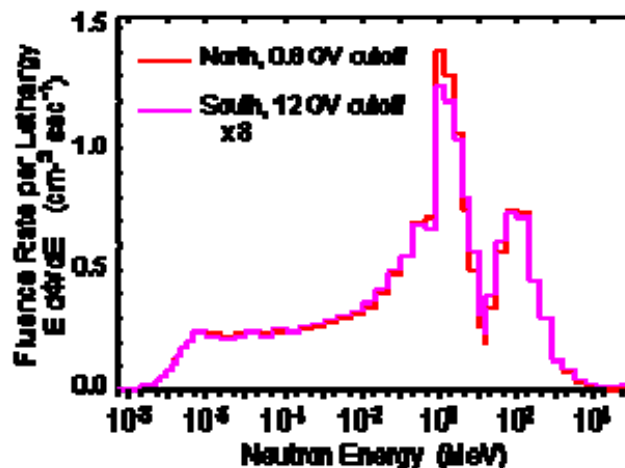


Abbildung 1: Neutronenenergiespektrum bei N. N.

In einer senkrechten Säule der Atmosphäre werden je $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 6.2 Neutronen erzeugt, davon ungefähr 80 % durch Verdampfen und 20 % durch Stoßprozesse. Jedes primäre Proton erzeugt in der Atmosphäre im Mittel 20 Neutronen. Nach Thermalisierung werden 64 % der Neutronen durch Stickstoffkerne in einer $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ -Reaktion unter Bildung von ^{14}C , 20 % der Neutronen bei anderen Prozessen eingefangen und 16 % verlassen die Atmosphäre. Da die Neutronen keine Energie durch Ionisation verlieren, steigt das Verhältnis der Flüsse von Neutronen und Protonen von ca. 22 in der oberen Atmosphäre bis zu 38 auf Meeresebene an.

3.5 Myonen

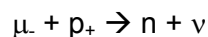
Myonen sind Zerfallsprodukte der geladenen Pionen und Elementarteilchen mit der gleichen Ladung wie Elektronen aber einer 207fachen Ruhemasse. Die Myonen übernehmen von den Pionen die ungefähre Bewegungsrichtung und annähernd 80 % ihrer Energie. Da sie ihre Energie praktisch nur durch elektromagnetische Wechselwirkung verlieren, und ihr Wirkungsquerschnitt mit Kernen nur ca. $2 \cdot 10^{-33} \text{ m}^2$ beträgt, sind sie sehr durchdringend. Die überwiegenden Prozesse sind Ionisation und Anregung, daneben finden Stoßreaktionen mit Elektronen und in

geringerem Maße die Erzeugung von Bremsstrahlung und Paarbildung statt. Das Energiespektrum der Myonen ist bei ihrer Entstehung ungefähr gleich dem der Pionen. Es wird aber beim Durchgang durch die Atmosphäre durch Ionisationsverluste, Zerfall und Einfang negativer Myonen stark verändert. Beim Durchgang durch Materie verlieren sie ihre Energie in gleicher Weise wie Elektronen durch Ionisation. Sie ionisieren dabei ungefähr mit $2 \text{ MeV}/(\text{gcm}^{-2})$.

Beim Zerfall in Elektronen übernehmen diese ungefähr $1/3$ der kinetischen Energie der Myonen während die Neutrinos den Rest der Energie übernehmen. Elektronen und Neutrinos teilen sich dabei auch in die Energie der Restmasse der Myonen von 106 MeV . Die Maximalenergie der Elektronen ist dabei 50 MeV und deren Mittelwert ungefähr 40 MeV . In dichten Materialien verlieren die meisten Myonen ihre Energie durch Ionisation, bevor sie zerfallen. In einer Höhe von 10 km , was einer Tiefe der Atmosphäre von 270 g/cm^2 entspricht, sind ungefähr 90% der in der Atmosphäre entstehenden Myonen gebildet worden. Trotzdem ein großer Teil der Myonen in der Atmosphäre zerfällt, erreicht doch ein beträchtlicher Anteil den Meeresspiegel. Wegen ihrer großen Durchdringungsfähigkeit verringert sich ihr Fluss mit der Tiefe der Atmosphäre langsamer als ihre primären Teilchen, die Protonen.

Das Verhältnis der Zahl der positiven zu negativen Myonen bei N.N. beträgt ungefähr $1,2$ [29]. Die abgebremsten negativen Myonen μ^- werden durch Atome eingefangen. Nach einem solchen Einfang werden myonische Röntgenstrahlen emittiert. Wegen der im Vergleich mit den Elektronen höheren Masse liegen ihre Bahnen dem Atomkern näher und die Energien der myonischen Röntgenstrahlen sind deshalb höher als die normaler Elektronen.

Als zweiter Prozess konkurriert mit dem Zerfall der Myonen der Einfang durch ein Proton im Kern, wobei ein Neutron n und ein Neutrino ν gebildet wird.



In Materialien mit niedriger Kernladungszahl ist der Myonenzerfall wahrscheinlicher, dagegen dominiert bei Kernen mit höheren Kernladungszahlen Z wegen der größeren elektrostatischen Anziehung der Einfang. Für $Z = 20$, werden 80% der negativen Myonen eingefangen und bei $Z = 50$ beträgt dieser Wert 95% . Dabei wird die Restmasse der Myonen (106 MeV) frei und der Kern gelangt in einen hoch angeregten Zustand, der dann unter Emission von einem Neutron oder mehreren Neutronen zerfällt. Die Zahl der emittierten Neutronen hängt von der Masse des Einfangkernes ab. In Blei beträgt sie ungefähr $1,6$ Neutronen pro Myon.

Die Abhängigkeit der Intensität der Myonen vom Einfallswinkel δ wird durch die Beziehung

$$I_\delta = I_0 \cos^n \delta$$

ausgedrückt. Von N.N. bis zu einer Tiefe von 300 mwe ist n dabei annähernd konstant 2 [29].

3.6 Elektronen, Positronen und Photonen

Die Elektronen der kosmischen Strahlung mit einer Energie E_0 verlieren ihre Energie hauptsächlich durch Emission von Bremsstrahlung, das sind Photonen mit einem ziemlich flachen von Null bis E_0 reichenden Energiespektrum. Die Photonen erhalten im Mittel 40% von E_0 . Die mittlere Länge l_0 , die sich ein Elektron bewegt, bevor es sich in ein Photon umwandelt, wird in g/cm^2 gemessen. Sie ist praktisch unabhängig von der Energie E_0 , aber annähernd umgekehrt proportional der Kernladungszahl des zu durchdringenden Materials. Der wahrscheinlichste Prozess der Wechselwirkung von Photonen ist die Bildung von Elektron – Positron - Paaren. Die mittlere freie Weglänge der hochenergetischen Photonen ist nahezu gleich der der hochenergetischen Elektronen.

Die wiederholte Kombination dieser beiden Prozesse führen zu den elektromagnetischen Schauern oder Elektron – Positron – Photon - Kaskaden, die als weiche Komponente der kosmischen Strahlung bezeichnet werden. Die Schauer können durch energiereiche Photonen initiiert werden, die beim Zerfall von neutralen Pionen, welche in mittleren und großen Höhen dominieren, emittiert werden. Sie werden auch durch ein Elektron ausgelöst, das seine hohe Energie von einem Myon erhalten hat. Die Photonen und Elektronen in Schauern bewegen sich vorwiegend in einem engen Raumwinkel und in die gleiche Richtung wie das Ursprungsteilchen.

Die Bildung eines Schauers beginnt mit einem Elektron der Energie E_0 . Dieses verliert nach einer Strahlungslänge die Hälfte der Energie durch ein Bremsstrahlungsphoton. Ein Photon bildet nach einer zweiten Strahlungslänge ein Elektronenpaar, wobei jedes Elektron die Hälfte der Photonenenergie erhält ($E_0/4$). So haben wir nach zwei Strahlungslängen zusätzlich zum ursprünglichen Elektron, ein Photon, ein Elektron und ein Positron, jedes mit einer Energie von $E_0/4$. Dieser Multiplikationsprozess wird so oft wiederholt bis eine kritische Energie E_c erreicht ist, bei der dann die Elektronen mehr Energie durch Ionisation als durch Strahlung und die Photonen mehr Energie durch Compton-Streuung als durch Paarbildung verlieren. Danach hört die Multiplikation im Schauer auf. Die kritische Energie hängt von der Kernladungszahl ab und beträgt für Luft, Beton, Eisen und Blei 81 MeV, 50 MeV, 21 MeV und 7,4 MeV.

Am Ende des elektromagnetischen Schauers in Luft beträgt die mittlere Energie von Elektronen und Photonen 81 MeV. Sie haben noch eine maximale Reichweite von ungefähr 55 g/cm^2 . Danach verlieren die Elektronen ihre Energie hauptsächlich durch Kollisionen, produzieren aber auch einige Photonen. Die Photonen verlieren ebenfalls Energie, meist durch Compton-Streuung und erhöhen dadurch den Anteil an Photonen geringerer Energie. Deren Absorptionslänge ist in Luft bei ungefähr 500 m N.N. im Energiebereich zwischen 10 – 80 MeV 55 g/cm^2 , sie verringert sich auf 20 g/cm^2 bei 2 MeV. Eine beträchtliche Zahl von Photonen hat eine bedeutend größere Reichweite als die Elektronen. Auf Meeresniveau gibt es Photonen und Elektronen mit Energien von einigen zehn MeV, die in Schauern in geringer Höhe erzeugt wurden. Die niedrigerenergetischen Elektronen werden abgebremst und von jedem Photon werden in der Nähe der kritischen Energie eine Anzahl von Compton-Photonen produziert.

Die Elektronen besitzen die gleiche spektrale Energieverteilung wie die Photonen, ihr Fluss verringert sich in der Nähe von N.N. jedoch viel langsamer. Das Verhältnis von Elektronen zu Photonen ist über weite Strecken nahezu konstant, steigt aber in einer Tiefe von 700 m an. Während in der oberen Atmosphäre die Elektronen vorwiegend aus, beim Zerfall neutraler Pionen gebildeten energiereichen Photonen entstehen, werden sie unterhalb 700 m vorwiegend beim Zerfall der Myonen gebildet, da sich der Fluss der Myonen in der Tiefe langsamer verringert als der von Protonen.

4 Kosmische Strahlung in ober- und unterirdischen Laboratorien

4.1 Hochenergetische Neutronen und Protonen

Die Materialbedeckung der verschiedenen Laboratorien variiert in weiten Grenzen. Die Mess-einrichtungen können in Räumen stehen, die nur mit einem dünnen Dach bedeckt sind, aber auch im Keller eines mehrstöckigen Institutsgebäudes. Große Gebäude haben im Allgemeinen 6 oder mehr Deckenplatten über dem Messraum. Die Messgeräte können aber auch in speziellen Räumen unter einigen Meter Boden oder Gestein, in Höhlen, Tunneln oder alten Bergwerken untergebracht werden. In Gesteinen und Baumaterialien beträgt die Absorptionslänge der hochenergetischen Neutronen und Protonen ca. $1,6 \text{ mwe}$ (160 g cm^{-2}) und ist damit etwas höher als in Luft. Sind Φ_P und Φ_{P_0} die Flüsse an Protonen unter einer Abdeckung der Masse m in mwe, und ohne Abdeckung, so beträgt der Schwächungsfaktor f_P :

$$f_P = \Phi_P / \Phi_{P_0} = e^{-m/1.6}$$

Dieser Schwächungsfaktor gilt auch für die hochenergetischen Neutronen:

$$f_N = f_P$$

Eine Messung der Protonenflüsse in Meereshöhe ist schwierig, da die Protonen von den meisten Detektoren schlecht von denen 640-mal mehr vorhandenen Myonen und wegen der ständigen gegenseitigen Umwandlung auch nur schlecht von den Neutronen unterschieden werden. Deshalb ist es üblich, die Flüsse an hochenergetischen Neutronen und Protonen gemeinsam zu messen. Dafür werden mehrere Detektoren für thermische Neutronen, meist mit BF_3 oder ^3He gefüllte Gaszählrohre jeweils mit Polyäthylen zur Thermalisierung der Verdampfungsneutronen und mit Blei zur Erzeugung von Verdampfungsneutronen aus den hochenergetischen Hadronen ummantelt. Solche Neutronenzähler sind über die ganze Erde verteilt und messen auf indirektem Wege kontinuierlich die örtliche und zeitliche Verteilung der Intensitäten der in die Atmosphäre eindringenden primären kosmischen Strahlung.

4.2 Myonen

Myonen sind sehr durchdringend, ihre hochenergetische Komponente gelangt bis Hunderte von Metern unter die Erdoberfläche. Ihre Schwächung

$$f_\mu = \Phi_\mu / \Phi_{\mu_0}$$

kann annähernd durch

$$f_\mu = 10^{-1.32 \log d - 0.26 (\log d)^2}$$

ausgedrückt werden. Der Parameter

$$d = 1 + m/10$$

stellt die Gesamtbedeckung einschließlich der Atmosphäre dar, wobei $d = 1$ die gleiche Massendichte wie eine Atmosphäre ausdrückt. Φ_{μ_0} ist der Myonenfluss ohne und Φ_μ unterhalb von m (mwe) Gesteinsbedeckung. Diese Gleichung beschreibt nach Theodorsson [23] den Myonenfluss mit einer Genauigkeit von 5 % bis zu einer Tiefe von 100 mwe und von 10 % bis zu 1000 mwe. Die Schwächung der Myonen in dicken Blei- oder Eisenabsorbern zeigt dabei nur einen geringen Unterschied zur Absorption in Gesteinen.

Eine andere Darstellung der Tiefenabhängigkeit des Myonenflusses, die nicht für geringe Gesteinsdicken gilt, geben Enqvist et al. [31] an:

$$\Phi_\mu = A (m_0/m)^n \cdot e^{-(m/m_0)}$$

mit $A = (0,025 \pm 0,004) \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, $n = (2,18 \pm 0,12)$ und $m_0 = (1330 \pm 140) \text{ mwe}$.

Die kosmischen Myonen sind die Hauptquelle für den Untergrund in abgeschirmten Detektoren. Sie ionisieren jegliche Materie, die sie durchdringen, so auch das Detektormaterial. Dort bewirken sie einen Impuls der proportional der Zahl der produzierten Ionenpaare ist und diese sind wiederum proportional der Länge des durchlaufenen Weges im Detektor. Da die Reichweite der Myonen viel größer als die Größe der Detektoren ist, repräsentiert ein gemessenes Impulshöhenspektrum nicht die Energie der Myonen, sondern die Dimension des Detektors. In Germanium verlieren die Myonen ungefähr $6 - 7 \text{ MeV cm}^{-1}$.

Das Untergrundspektrum eines 2000 mm² x 20 mm Low-Energy-Ge-Detektors ist wegen der Compton-Streuung der Gammalinien und der von kosmischer Strahlung verursachten Bremsstrahlung zwischen 100 und 1500 keV ziemlich steil. Ein breiter Peak bei 13 MeV ist dem Energieverlust der Myonen beim Durchgang durch den Detektor zuzuschreiben [32]. In einem zylindrischen Germanium - Detektor mit einer auf einen 3" x 3" NaI-Detektor bezogenen relativen Effektivität der 1333 Linie von ⁶⁰Co von 20% mit einer Länge von 5,7 cm, einem Durchmesser von 4,86 cm und einem Bohrloch von 4,4 cm Länge und 1,2 cm Durchmesser verursacht die kosmische Strahlung einen Beitrag zum Untergrund bis 80 MeV mit einem deutlichen Maximum bei ungefähr 35 MeV und einer Halbwertsbreite (FWHM = full width half maximum) von ungefähr 18 MeV [33].

Ein Antikoinzidenzdetektor, der den Detektor für die Spektrometrie außerhalb der Bleiabschirmung umgibt, schirmt die Myonen weitgehend ab. Wenn die Myonen beide Detektoren durchlaufen und dabei in beiden Detektoren Ladungsträger bzw. Lichtquanten erzeugen, können die Ereignisse, wenn gleichzeitig in beiden Detektoren Ladungsimpulse anliegen, in einem Koinzidenzkanal elektronisch ausgesondert und deshalb im Antikoinzidenzspektrum nicht registriert werden.

4.3 Neutronen

Ohne Bedeckung werden bei N.N. 92 % der Neutronen durch hochenergetische Hadronen und 8 % durch Myonen gebildet. Die in Meereshöhe gemessenen Werte für den Neutronenfluss zeigen beträchtliche Schwankungen: Cocconi und Tongiorgi, [34] und Yamashita et al. [35] fanden 40 bzw. 62 Neutronen m⁻²s⁻¹. Letztere fanden dabei 29 Neutronen m⁻²s⁻¹ im Energiebereich von 0,4 eV – 0,1 MeV, 16 Neutronen m⁻²s⁻¹ für 0,1 – 1 MeV, und 17 Neutronen m⁻²s⁻¹ für 1 – 10 MeV.

Als Mittelwert für den gesamten Neutronenfluss werden 64 Neutronen m⁻²s⁻¹ angegeben [26]. Der Fluss an thermischen Neutronen wurde mit Goldtargets zu 10 – 20 m⁻²s⁻¹ bei einem Cadmiumverhältnis von 5 - 10 [36] und zu 7 – 35 m⁻²s⁻¹ [37] bei einem Cadmiumverhältnis von 5 gemessen. Das Cd-Verhältnis 5 sagt aus, dass 1/5 des gemessenen Flusses den epithermischen Neutronen zuzuschreiben ist. Als Spaltneutronenfluss wurde 28 m⁻²s⁻¹ [38] gemessen. Für den Fluss an Neutronen mit Energien oberhalb des Spaltspektrums ergibt sich daraus ca. 15m⁻²s⁻¹. Lindstrom et al. [39] berechneten oberirdisch in einer 15 cm dicken Bleiabschirmung im Untergrundspektrum von Germaniumdetektoren aus den Peaks der inelastischen Neutronenstreuung an ⁷⁴Ge und ⁷²Ge von 596 keV und 693 keV mit einem Wirkungsquerschnitt von 80 mb einen schnellen Neutronenfluss von 200 m⁻²s⁻¹. Die Erhöhung von ca. 30 m⁻²s⁻¹ auf 200 m⁻²s⁻¹ wird durch Reaktionen von hochenergetischen Hadronen und Myonen mit Blei verursacht. Ein 1 l Marinellibecker in der Bleiabschirmung erhöht auch den thermischen Neutronenfluss von ca. 20 m⁻²s⁻¹ auf 200 m⁻²s⁻¹.

An der Grenzfläche zwischen Luft und Beton steigt der thermische Neutronenfluss wegen der im Vergleich zur Luft höheren Neutronenausbeute von Beton zuerst an und erreicht ein Maximum bei einer Bedeckung von 0.4 mwe. Somit ist die Konversion von Protonen in Neutronen unter der ersten Deckenplatte höher als in der darüber befindlichen Luft. Bei der Bedeckung von 4 mwe sind die Anteile der Neutronen aus Protonen und Myonen gleich und einige mwe darunter ist die Bildung aus Protonen zu vernachlässigen.

Dep et al. [40] verglichen die Ergebnisse von Messungen und Monte Carlo Berechnungen für den relativen Neutronenfluss unter verschiedenen dicken Betonschichten. Bei 17 mwe wurden 0.081 Neutronen m⁻²s⁻¹ gefunden [41]. Die Flüsse der Neutronen und Myonen werden mit der Tiefe verringert, wobei die Neutronen dann durch elektromagnetische Wechselwirkung von schnellen Myonen mit dem Kernen des Gesteins und durch Myoneneinfang entstehen.

Die Produktionsrate r_n an Neutronen pro g Gestein ist

$$r_n = 1,7 \cdot 10^{-3} \Phi_\mu$$

wobei Φ_μ der Myonenfluss ist. Unter Berücksichtigung der Gesteinsdichte ρ , mit einem für die Neutronenbildung aus der natürlichen Radioaktivität stammenden Absorptionskoeffizienten

$$k_n = 1,53 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

erhält man für den aus Myonen stammenden Neutronenfluss

$$\Phi_n = r_n \cdot \rho / k_n$$

$$\Phi_n = 0,11 \cdot \rho \cdot \Phi_\mu$$

Nach Angaben von Boehm et al. [42], beträgt die Neutronenausbeute bei 32 mwe $Y_{tot} = (3.60 \pm 0.31) \cdot 10^{-5}$ Neutronen pro Myon und g/cm^2 .

Mit $k_n = 1,53 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ und $\rho = 2,3$ ergibt sich daraus

$$\Phi_n = 5,4 \cdot 10^{-3} \Phi_\mu$$

4.4 Reaktionen der kosmischen Strahlung mit den Detektor- und Abschirmmaterialien

Besondere Beachtung bei der Gestaltung der Messeinrichtungen verdienen die Bedingungen, unter denen Neutronen produziert werden. In oberirdischen Laboratorien und solchen mit geringer Abdeckung werden die Neutronen nicht nur durch hochenergetische Nukleonen, sondern auch durch negative Myonen vorwiegend durch Einfang gebildet. Cocconi und Tongiorgi [33] führten Messungen der Neutronen in geringen Tiefen durch. Sie bestimmten die relative Zahl der Neutronen, die in einer Bleischicht produziert werden, bei der auf beiden Seiten ein in Paraffin eingebetteter Neutronenzähler angeordnet ist. Diese Einrichtung wurde in verschiedenen Tiefen eines Sees versenkt. Dabei zeigte sie, dass die Neutronenintensität in eine den hochenergetischen Hadronen mit einem Massenschwächungskoeffizienten von 1,6 mwe und eine den Myonen zugeordnete exponentielle Komponente mit einem geringeren Wert zugeordnet werden kann.

Innerhalb einer 10 cm dicken Bleiabschirmung ist der äußere Gammastrahlenfluss aus der natürlichen Radioaktivität des Laboratoriums, ebenso wie die Schauer, die außerhalb der Abschirmung entstehen, stark unterdrückt. Hochenergetische Protonen, Neutronen und Myonen durchdringen dagegen die 10 cm dicke Bleischicht. Die energiereichen Protonen und Neutronen unterliegen im Blei einer beträchtlichen, die Myonen einer geringeren Absorption. Die direkt durch die Hadronen und Myonen im Detektor erzeugten Impulse können durch Pulshöhendiskriminierung oder durch Antikoinzidenzdetektoren diskriminiert werden.

Die bedeutendste Komponente kommt aber von einer tertiären Strahlung, von schnellen Neutronen, Elektronen und Photonen, die erst im Blei von den hochenergetischen Hadronen und Myonen produziert wird. Damit wird die Bleiabschirmung zu einer effektiven Neutronenquelle. Die Stoßlänge der hochenergetischen Neutronen und Protonen (Hadronen) in Blei beträgt ca. $170 \text{ g}/\text{cm}^2$ (15cm Blei). Ungefähr 50 % der auf die Abschirmung treffenden Hadronen erfahren deshalb eine Kollision, bei der mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere Neutronen erzeugt werden.

Blei hat einen geringen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen. Ohne Moderator oder Absorber innerhalb der Abschirmung ist diese für thermische Neutronen durchlässig. Deshalb ist der Fluss an thermischen Neutronen innerhalb und außerhalb der Abschirmung gleich. Arthur et al. [43] haben die thermischen und schnellen Neutronen innerhalb einer Bleiabschirmung mit einem BF₃-Proportionalzähler, der nur auf thermische Neutronen anspricht, gemessen. Um den Fluss der erzeugten schnellen Neutronen zu messen, haben sie den Zähler mit einer 5 cm dicken Paraffinschicht umgeben. Die Zählrate der schnellen Neutronen innerhalb der Abschirmung stieg mit deren Dicke an. Der Detektoruntergrund wurde bestimmt, indem der Detektor mit einer 0,05 mm dicken Folie aus Cadmium umhüllt wurde, die alle externen thermischen Neutronen absorbierte. Auch diese Messungen zeigten die Entstehung von schnellen Neutronen im Blei. Blei zeigt jedoch bei der Messung mit einem unmoderierten Detektor innerhalb der Abschirmung keine Wirkung auf thermische Neutronen.

In oberirdischen Laboratorien stammen die meisten Neutronen aus der Wechselwirkung von hochenergetischen Neutronen und Protonen. Diese können auch Spaltungen verursachen, die man im Gammaspektrum eines abgeschirmten Germaniumdetektors am gebildeten ⁵⁷Co erkennt. In der Bleiabschirmung werden die Neutronen durch hochenergetische Neutronen und Protonen gebildet.

Die Produktion von Neutronen im Blei durch Myonen überwiegt schon bei einer Gesteinsabdeckung von einigen Metern. Die Neutronenausbeute wächst mit der Kernladungszahl Z des Materials. Die im Blei gebildeten schnellen Neutronen erzeugen in Germanium durch (n,2n)-, (n,p)- und (n,n⁻)- Reaktionen ⁷¹Ge, ⁷²Ga und ^{76m}Ge. ⁷¹Ge wird auch durch eine (n,γ)-Reaktion mit thermischen Neutronen gebildet. In tiefer gelegeneren Laboratorien, wo auch der Myonenfluss stark reduziert ist, überwiegt die Bildung von Neutronen aus natürlichen Radionukliden. Deren Energie ist niedriger und ein Teil von ihnen wird durch die leichten Elemente des Gesteins thermalisiert. Deshalb beobachten wir dann nur noch (n,γ)- und (n,n⁻)-Reaktionen.

Es ist nicht leicht, die Peaks in Untergrundspektren einzelnen Neutronenenergien zuzuordnen. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse eines Experiments bei dem eine 100 mCi ²⁴¹Am-Be-Neutronenquelle, die ca. 10³ Neutronen s⁻¹ emittiert, auf eine 10 cm starke Bleiabschirmung gelegt wurde. Der Abstand zwischen Quelle und einem 2000 mm² · 20 mm Ge- Detektor betrug ca. 20 cm. Es wurde mit und ohne einer zusätzlichen 1 cm dicken Piacrylschicht gemessen [32]. In beiden Fällen hat man eine Mischung von schnellen und thermischen Neutronen.

Tabelle 8: Impulsraten r der Peaks in Zähler/h bei der Aktivierung von Germanium mit einer außerhalb der Bleiabschirmung angeordneten Isotopenneutronenquelle

E _γ [keV]	r, ohne Piacryl	r, mit Piacryl	Zuordnung
53,4	13,4 ± 5,4	19,1 ± 9,5	⁷² Ge(n, γ) ^{73m} Ge, ⁷⁴ Ge(n,2n) ^{73m} Ge
66,7	4,5 ± 5,0	20,0 ± 8,1	^{73m} Ge, sum:13.3+53.4 keV
68,7	16,6 ± 8,0	4,9 ± 4,9	⁷³ Ge(n,n ⁻ γ) ^{73m} Ge, asymmetrisch und verbreitert,
139,6	7,4 ± 4,5	25,5 ± 6,6	⁷⁴ Ge(n, γ) ^{75m} Ge, ⁷⁶ Ge(n,2n) ^{75m} Ge
159,5	7,1 ± 5,6	49,9 ± 8,0	⁷⁶ Ge(n, γ) ^{77m} Ge
174,9		14,6 ± 7,8	⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge, ⁷² Ge(n,2n) ^{71m} Ge
198,3	6,7 ± 4,2	21,8 ± 5,2	⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge ⁷² Ge(n,2n) ^{71m} Ge
595,6	6,5 ± 5,0	15,8 ± 5,4	⁷⁴ Ge(n, n ⁻ γ) ^{74m} Ge, asymmetrisch und verbreitert, ⁷³ Ge(n, γ) ^{74m} Ge
691,3	10,6 ± 5,3	17,8 ± 7,5	⁷² Ge(n, n ⁻ γ) ^{72m} Ge, asymmetrisch und verbreitert

Arthur und Reeves [44] bestimmten die Zählraten r (in Zähler pro Tag) in ausgewählten Peaks von Aktivierungsprodukten des Germaniums in einem oberirdisch angeordneten Germaniumdetektor von 31,5 % relativer Effektivität bei aus- und bei eingeschalteter

Antikoinzidenz (AK). In der Abschirmung befand sich eine 4,8 l Wasser fassende Plastikbox, die bei einigen Versuchen mit Wasser (H₂O), mit einer zusätzlichen Kadmiumhülle (AK + H₂O + Cd), mit in Wasser gelöster Borsäure (H₂O + ¹⁰B) beziehungsweise Lithiumcarbonat (H₂O + ⁶Li) gefüllt waren. Bei einem weiteren Versuch wurden außerhalb der Abschirmung noch 10 cm Blei hinzugefügt (Pb + AK) (Tabelle 9).

Tabelle 9: Untergrundzählraten r in Zähler/Tag von ausgewählten Peaks eines Ge – Detektors abgeschirmt mit 15 cm Blei und 10 cm Plastszintillator und verschiedenen Moderator-Absorberanordnungen innerhalb der Abschirmung

E [keV]	Nuklid	r	r AK	r H ₂ O	r AK+H ₂ O	r AK+H ₂ O +Cd	r AK+H ₂ O+ ⁶ Li	r H ₂ O+ ¹⁰ B	r Pb+AK
53,6	^{73m} Ge	64	68	270	220	37	88	54	41
66,7	^{73m} Ge	< 50	43	240	240	29	68	56	75
139,5	^{75m} Ge	89	45	404	320	37	53	44	51
159,7	^{77m} Ge	48	17	327	71	14	< 6	< 6	5,1
198,4	^{71m} Ge	121	46	407	266	38	62	58	55
596,6	⁷⁴ Ge*	59	6,3	151	81	16	4,7	3,3	9,1
691,3	⁷² Ge*	90	9	69	14	< 3	< 2	< 2	3,9
569,6	²⁰⁷ Pb*	41	10	< 17	<7	< 4	< 3	2,5	5,6
803,3	²⁰⁶ Pb*	< 23	8	< 16	<8	28	< 2	3,5	< 1
1063	²⁰⁷ Pb*	18	7	< 13	<7	< 3	< 2	4,6	3,6

* bedeutet angeregter Zustand

Wasser innerhalb der Abschirmung erhöht den Fluss an thermischen Neutronen und damit die Ausbeute der (n,γ)-Reaktionen. Die Absorber für thermische Neutronen Cd, ⁶Li und ¹⁰B verringern den Fluss an thermischen Neutronen und die Ausbeuten der entsprechenden Reaktionen. Zusätzliches Blei erhöht nicht den Neutronenfluss. Es scheint, dass die von dem zusätzlichen Blei erwartete Erhöhung durch eine entsprechende Verringerung des Flusses an hochenergetischen Hadronen kompensiert wird.

Aus den gemessenen Zählraten in den Peaks ohne Antikoinzidenz und ohne zusätzliches Wasser kann man unter den in Tabelle 10 aufgeführten angenommenen Kerndaten, unter der Voraussetzung dass die Produkte nur aus thermischen oder nur aus Spaltneutronen gebildet werden, scheinbare Flüsse abschätzen. Für die Anzahl der Germaniumatome N_{Ge} wurde $7 \cdot 10^{24}$ eingesetzt. Mit den oberirdisch bestimmten Werten für den thermischen Fluss von ca. $30 \text{ n m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ hat man unter der Annahme, dass der thermische Fluss außerhalb der Bleiabschirmung durch das Blei als Neutronenquelle, das Plastmaterial des Koinzidenzdetektors als Moderator wirkt, der thermische Fluss dadurch etwas erhöht ist, und der Fluss innerhalb der Bleiabschirmung ungefähr dem Fluss außerhalb entspricht, für die Nuklide ^{73m}Ge und ^{71m}Ge vorwiegend thermische Aktivierung anzunehmen. Bei ^{75m}Ge und ^{77m}Ge sollte dann eine schnelle Aktivierung hinzukommen.

Die Neutronen erzeugen darüber hinaus im Blei Photonen, die im Detektor zu einem kontinuierlichen Untergrund beitragen. Myonen erzeugen bei der inelastischen Streuung Bremsstrahlung, die im Detektor ebenfalls zum Kontinuum beiträgt. Außerdem leisten die elastischen Streuungen von Neutronen im Detektor selbst einen Beitrag zum Kontinuum. Auf diese Weise ist der Beitrag der Neutronen zum Kontinuum wesentlich größer als der von den hier betrachteten Photopeaks. Andererseits eröffnen die Photopeaks die prinzipielle Möglichkeit zur Berechnung eines Neutronenspektrums.

Tabelle 10: Abschätzung der thermischen und schnellen Neutronenflüsse aus den in den Peaks in Germanium gemessenen Zählraten in cpd (Zähler /Tag)

E/keV	Nuklid	h	σ /barn	ω	ϵ (geschätzt)	cpd	Φ / $m^{-2}s^{-1}$
53,6	^{73m}Ge	0,2737	1,0	0,105	0,9	0,74E-3	th:41
66,7	^{73m}Ge	0,2737	1,0		0,9	< 0,6E-3	
139,5	^{75m}Ge	0,3674	0,16	0,34	0,9	1,03E-3	th:82
159,7	^{77m}Ge	0,0767	0,9	0,109	0,9	0,56E-3	th:117
198,4	^{71m}Ge	0,2055	0,28	1,0?	0,8	1,4E-3	th:42
596,6	$^{74}\text{Ge}^*$	0,3674	0,08	1,0	0,7	0,68E-3	f:330
691,3	$^{72}\text{Ge}^*$	0,2737	0,080	1,0	0,7	1,04E-3	f:680

Viele Kenntnisse über die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Blei verdanken wir den Messungen mit Neutronen - Monitoren, wie sie von Simpson et al. [45] vorgeschlagen worden waren. BF_3 -Zähler sind mit ca. 2 cm Polyethylen ummantelt, in 13,5 cm Blei eingebettet und in Bodenstationen über die ganze Erde verteilt, um kontinuierlich die Sekundärteilchen zu messen. Bercovitch et al. [46] zeigten, dass Sekundärnukleonen von Energien von 200 bis 300 MeV und mehr bei jeder Wechselwirkung in Blei ungefähr 8 Verdampfungsneutronen mit einer mittleren Energie von ca. 2 MeV erzeugen.

Der elastische Neutronenwirkungsquerschnitt in Blei im Energiebereich von Bruchteilen von eV bis zu 5 MeV beträgt 5 - 10 barn, was einer mittleren freien Weglänge von 3 – 6 cm entspricht. Die Neutronen verlieren bei jedem Stoß mit einem Bleikern im Mittel nur 1 % ihrer kinetischen Energie. Da bis zur Thermalisierung der schnellen Neutronen in Blei extrem viele Stöße notwendig sind, liefern die im Blei gebildeten schnellen Neutronen, wenn sich innerhalb einer Abschirmung kein Moderator befindet, keinen Beitrag zum thermischen Fluss.

In oberirdisch aufgestellten Messplätzen stammen die meisten im Blei erzeugten Neutronen von hochenergetischen Neutronen und Protonen. Auch die neu gebildeten Neutronen haben eine sehr hohe Energie und können deshalb im Germanium Spallationsprodukte, z. B. ^{57}Co erzeugen. Bei einer Bedeckung des Labors von einigen Metern dominiert die Bildung von Neutronen aus Myonen. Die dabei gebildeten schnellen Neutronen führen im Germanium zu $(n,2n)$ -, (n,p) -, und (n,n') -Reaktionen, wobei ^{71}Ge , ^{72}Ga und ^{76m}Ge entstehen. Als ein Produkt der (n,γ) -Reaktion mit thermischen Neutronen entsteht ebenfalls ^{71}Ge . In größeren Tiefen, wo der Myonenfluss stark verringert ist, stammen die Neutronen von den Reaktionen der natürlichen Alphastrahler mit leichten Kernen im Gestein und zum geringeren Teil von der Spontanspaltung des ^{238}U . Die Energie der so gebildeten Neutronen ist geringer, wobei ein großer Teil der Neutronen durch die leichten Kerne der Gesteine thermalisiert wird. Deshalb beobachten wir dann nur noch (n,n') - und (n,γ) -Reaktionen. In einer neueren ausführlichen Arbeit werden die durch die Neutronen einer Am-Be-Quelle in Blei und im Germanium verursachten Kernreaktionen gemessen und berechnet. Sie haben die Kalibrierung mit der Neutronenquelle aus der Intensität der Linie bei 692 keV den Neutronenfluss im Germanium berechnet. Aus den aufgenommenen Spektren kann man entnehmen, dass in mittleren Energiebereichen die Höhe des kontinuierlichen Untergrundes ungefähr 30 % der Höhe der deutlichen Germaniumpeaks beträgt [47].

In Tabelle 11 sind Zählraten in cps für vier Peaks in Untergrund von zwei Germaniumdetektoren aufgeführt, wovon einer, ein Bohrlochdetektor von 30 % Effektivität entsprechend 150 cm^3 , was bei einer Dichte von 5,35 eine Masse von 0,80 kg ergibt, unter einer 125 mwe Gesteinsdecke in der Messkammer 2 des Felsenkellerlabors (FK) Dresden in einer Abschirmung von 20 cm Eisen und 3 cm Blei und einer zusätzlichen Abschirmung von 17 cm Blei angeordnet war. Ein zweiter 160 ccm HPGe -Detektor, (0,856 kg) befand sich im Erdgeschoss eines oberirdischen zweistöckigen Gebäudes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig in einem Messraum mit Bleiwänden einer Dicke von 10 cm und einer zusätzlichen Abschirmung der Detek-

toren mit 10 cm Blei. Die Zählraten im Untertagemesslabor überschritten nur wenig die einfache Standardabweichung, so dass man nicht die einzelnen Impulsratenverhältnisse, sondern lediglich den arithmetischen Mittelwert (A.M.) diskutieren kann. Da nicht alle der oberirdisch gemessenen Linien auch unterirdisch gefunden wurden, ergibt sich daraus ein niedrigerer Mittelwert als in Tabelle 11 angegeben.

Tabelle 11: Zählraten [cps] neutroneninduzierter Nuklide in Ge-Detektoren, die im Untertagemesslabor FK und in einem oberirdischen Labor der PTB gemessen wurden.

E_γ, keV	FK	PTB/10/	Reaktionen	FK/PTB
140,5	5,0E-5	6.3E-4	$^{76}\text{Ge}(n,2n)^{75m}\text{Ge}$; $^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75m}\text{Ge}$	0,08
197,9	3,0E-5	6E-4	$^{70}\text{Ge}(n,\gamma)^{71m}\text{Ge}$; $^{72}\text{Ge}(n,2n)^{71m}\text{Ge}$	0,05
278	4,5E-5	5.9E-4	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$; $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	0,08
595.8	3,0E-5	4E-4	$^{74}\text{Ge}(n,n')^{74}\text{Ge}^*$; $^{74}\text{Ge}(n,p)^{74}\text{Ga}(\beta)^{74}\text{Ge}^*$	0,07
A.M.				0,075

Die Zählraten in einem Detektor der PTB [48] sind um einen Faktor 1,5 niedriger als die Werte von Arthur und Reeves [44]. Das könnte auf Unterschiede in der Messanordnung und der geomagnetischen Position zurückzuführen sein.

In einem Labor im Keller eines mehrstöckigen Gebäudes haben Canizzaro et al. [49] den Einfluss einer großen Zahl verschiedener Kombinationen von Abschirmmaterialien auf den Untergrund eines Ge-Spektrometers untersucht. Sie haben dabei auch außerhalb der Bleiabschirmung Schichten von Polyethylen und Borsäure angebracht. Sie fanden dabei keinen Einfluss auf die durch Neutronen erzeugten Linien im Germaniumdetektor, da bei der geringen Bedeckung des Labors die meisten Neutronen durch kosmische Strahlung im Blei erzeugt werden. Anders könnte es in größeren Tiefen sein, wo das Gestein die Quelle der Neutronen darstellt.

4.5 Elektronen und Photonen

Die Strahlungslänge von hochenergetischen Photonen und Elektronen in Beton beträgt 22 g/cm^2 und ihre kritische Energie 38 MeV. Die maximale Elektronendichte in einem durch 2,2 GeV Elektronen ausgelösten Schauer tritt in einer Tiefe von 145 g/cm^2 nach der Auslösung statt. Das entspricht der Masse von drei Betondeckenplatten. Damit kann ein Elektron-Photon-Schauer in einem Laboratorium sowohl von außerhalb als auch aus dem Baumaterial stammen. Da die kritische Energie in Beton niedriger als in Luft ist, ist das dadurch verursachte Gamma-spektrum innerhalb eines Laboratoriums im Vergleich zur Außenluft zu niedrigeren Energien verschoben.

Elektromagnetische Schauer, welche die weiche Komponente der kosmischen Strahlung darstellen und außerhalb der Abschirmung entstehen, können eine 10 cm dicke Bleischicht nicht durchdringen. Dagegen führt eine neue Generation an Schauern, die im Abschirmmaterial gebildet wird, zu einem Anstieg der Flüsse an Elektronen und Photonen innerhalb der Abschirmung. Diese Schauer entstehen sekundär aus hochenergetischen Hadronen und Myonen. Bei einer geringen Gesteinsabdeckung der Messeinrichtung produzieren die Myonen ungefähr $2/3$ und die hochenergetischen Hadronen ungefähr $1/3$ des Flusses an Elektronen. Die Myonenkomponente verringert sich mit der Dicke der Gesteinsbedeckung nur langsam, die der Hadronen jedoch schnell. Während bei 5 mwe die Hadronenkomponente auf einen unbedeutenden Anteil verringert wird, verringert sich der Myonenfluss nur auf 55 % des Wertes an der Oberflä-

che. Es kann angenommen werden, dass der Fluss an Photonen ähnlich ist. Entsprechend ist auch der Trend in Blei.

4.6 Der Einfluss der Tiefe auf den Untergrund der Detektoren

Mit der Tiefe der Gesteinsschicht erhöht sich der Neutronenfluss mit dem ersten mwe. Danach verringert sich der Fluss innerhalb von 10 Metern hauptsächlich durch die Verringerung der Hadronenkomponente, und danach innerhalb von mehreren 100 m durch die Verringerung des Flusses an Myonen. Unterhalb 100 mwe gewinnt neben den aus dem Detektor stammenden Untergrund der Beitrag der Neutronen aus der Radioaktivität des Gesteins an Bedeutung.

Neben dem Studium von durchdringenden Komponenten der kosmischen Strahlung erfolgen in tiefen Untertagelaboratorien Forschungen über seltene Kernzerfallsarten und Messungen der dunklen Materie. Die bei der Entwicklung der Messanlagen gesammelten Erfahrungen können auch für den Aufbau von Untertagelaboratorien in mittlerer Tiefe für die Messungen geringer Radioaktivitäten von Nutzen sein.

5 Ausgewählte Untertagelaboratorien

In Tabelle 12 wird eine Übersicht über einige Standorte von installierten Untertagelaboratorien nach ihrer Tiefe geordnet angegeben. Es sind auch einige Orte aufgenommen, wo Messungen durchgeführt wurden aber kein ständiges Laboratorium installiert wurde. Die meisten Tiefenangaben stammen von Povinec [10].

Tabelle 12: Übersicht über Untertagelaboratorien

Institut	Ort	Typ	Tiefe [m]	mwe	Anwendung
Physikal. Institut	München-Garching	Bauwerk mit Aufschüttung		15	Physikalische Experimente
MPI für Kernphysik	Heidelberg	Höhle		15	γ -Spektrometrie.
University of California.	Stanford	Laborgebäude		17	Kernphysik
IAEA-MEL ¹⁾	Monaco	Höhle		35	Low-level Messungen
Universität Arizona	Tucson, Arizona	Bauwerk unter Institut	10		LSC
NASA-JSC ²⁾	Houston, Texas	Bauwerk unter Institut	20		NAA
Physik. Inst. Universität	Bern, Schweiz	Bauwerk unter Institut	25	70	β -Zählung
Universität Tokio	Nokogiriyama, Japan	Höhle		180	Low-level Messung
VKTA ³⁾	Dresden	Höhle	47	125	Low-level Messung
Kanazawa Universität	Ogoya, Japan	Tunnel in Kupfermine	135	270	γ -Spektr.
Baradello Underground Lab.	Como, Italien	Natürliche Höhle		300	Neutronenmessung
Low Background Facility, LBNL	Oroville, CA	Wasserkraftwerk	180		NAA, γ -Spektr. von Material
IRMM ⁴⁾	Mol, Belgien	Probeschacht	223	500	γ -Spektr.
INR Ukrain. Akad. d. Wiss.	Solotvina Ukraine	Salzbergwerk	430	1000	
CPL Cheongpyung underground I.	Cheongpyung Korea		350	1000	Suche nach dunkler Materie
PTB ⁵⁾	Asse bei Braunschweig	Salzbergwerk	490	1100	Test von Dosimetern
Universität Minnesota	Soudan	Bergwerk		1800	Physik
Universität Zaragoza	Canfranc Spanien	Autobahntunnel		2100	Physik
IUS Sheffield University ⁶⁾	Boulby, England	Salzbergwerk	1100		Suche nach dunkle Materie
Universität Sydney	Broken Hills, Australia	Bergwerk	1230		
Universität Tokio	Kamioka Japan	Bergwerk		2700	Neutrinoforschung

Institut	Ort	Typ	Tiefe [m]	mwe	Anwendung
INFN ⁷	Gran-Sasso, Italien	Autobahntunnel	1400	3500	Physik
IfK Russ. AdW	Baksantal, Russland	Höhle		4400	Neutrinoforschung
PNL-USC ⁸	Homestake SD, USA	Bergwerk		4400	2 β -Zerfall
LSM ⁹⁾	Frejus, Frankreich	Autobahntunnel	1780	4800	Physik
SMSR ¹⁰⁾	Mont Blanc, Frankreich	Autobahntunnel	2200	5000	Neutrinoforschung
Universität Kingston,	Sudbury, Ontario, Kanada	Bergwerk		6200	Neutrinoforschung
TIFR ¹¹⁾	Kolar field, Indien	Bergwerk		8500	Neutrinoforschung

- 1) International Atomic Energy Agency, Marine Environment Laboratory
- 2) National Aeronautics and Space Administration, Johnson Space Center
- 3) Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf, Dresden
- 4) Institut für Referenz Materialien und Messungen, Geel, Belgien
- 5) Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig
- 6) Institute for Underground Science, Sheffield University
- 7) Istituto Nazionale Fisica Nucleare, Gran Sasso
- 8) Pacific Northwest Laboratory, University of South Carolina
- 9) Laboratoire Souterrain de Modane, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
- 10) Service Mixte de Sécurité Radiologique Monthery
- 11) Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai

5.1 Oberflächennahe Untertagelaboratorien

- **Messlabor des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg**

In Laboratorien einer Tiefe von 10 – 40 mwe ist zumindest die Hadronenkomponente der kosmischen Strahlung drastisch verringert. Die nur geringfügig verringerte Myonenkomponente kann sehr wirksam mit Hilfe einer aktiven Antikoinzidenzabschirmung verringert werden. Im Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg wurde ein Messlabor in eine Höhle mit einer Gesteinsdecke von 15 mwe direkt neben dem Institutsgebäude installiert. Mit Hilfe ausgesuchter radioaktivitätsarmer Materialien wurden mehrere Germaniumdetektoren hergestellt und bei einem wurde die Bleiabschirmung mit Antikoinzidenzzählrohren aus goldplattierten Wolframdrähten umgeben. Der Untergrund ist dadurch ausreichend verringert, um den Messplatz erfolgreich für die Auswahl von Materialien für den Aufbau von Messgeräten in tieferen Untertagelaboratorien zu nutzen [24].

- **Unterirdischer Messraum im Institut für Physik in München-Garching**

Ein besonderer Messraum mit Wänden aus Beton wurde in der Nähe des Physikalischen Instituts in München-Garching eingerichtet, worauf eine 5 m dicke Schicht von Bodenmaterial aufgebracht wurde. Im Messraum ist neben anderen Geräten ein Ger-

maniumspektrometer aufgebaut, bei dem eine Antikoinzidenzabschirmung aus einem plastischen Szintillator die Bleiabschirmung umgibt.

- **Laboratorium für Datierung der Universität von Arizona in Tucson**

Das Laboratorium für Datierungen mit Hilfe von Flüssigszintillationsspektrometern ist in 10 m Tiefe eingerichtet. Es sind mehrere LSC installiert. Der Untergrund für die Messung von ^{14}C mit dem Low-Level LSC vom Typ "Quantulus" der Fa. Wallac ist nur um den Faktor 2 reduziert, obgleich die kosmische Strahlung viel stärker verringert ist [50].

- **Laboratorium des JSC der NASA**

Das Laboratorium für Radioaktivitätsmessung (RCL) des Johnson Space Center (JSC) der NASA in Houston, Texas, ist in 20 m Tiefe gebaut worden, um bei kleinen aktivierten Proben von der Mondoberfläche die Nachweisgrenze zu verbessern [39]. Das Laboratorium wurde vorwiegend für die Messung kosmogener Nuklide und neutronenaktivierter kosmischer Proben genutzt.

5.2 Untertagelaboratorien in mittlerer Tiefe für die Messung geringer Radioaktivitäten

- **Marine Environment Laboratory (MEL) der International Atomic Energy Agency (IAEA) für Radioaktivitätsanalysen in Monaco**

Das Untertagemesslabor der MEL der IAEA ist in einem Keller in einer Tiefe von 30 mwe eingerichtet worden. Das Labor besitzt eine Belüftungseinrichtung, die konstante Werte für Überdruck, Feuchtigkeit und Temperatur sichert. Eine gemeinsame Bleiabschirmung umgibt vier großvolumige HPGe-Detektoren. Antikoinzidenz-Detektoren aus plastischen Szintillatoren umgeben die Bleiabschirmung zur Verringerung des Einflusses der kosmischen Strahlung. Ein Anti-Compton-Gammaspektrometer, bestehend aus einem n-Type HPGe Detektor und einer NaI(Tl)-Abschirmung sowie ein Low-Background-LSC vom Typ Quantulus sind ebenfalls im Untertagelaboratorium installiert.

Es wurde der Untergrund eines Bohrloch-HPGe-Detektors von 150 % relativer Effektivität gemessen, der in einer gemeinsamen Bleiabschirmung mit drei weiteren Detektoren untergebracht und gegen kosmische Strahlung durch einen plastischen Szintillator abgeschirmt ist. Die Bleiabschirmung besteht aus zwei Schichten, die äußere aus 7,5 cm niedrigaktivem Blei, die innere aus sehr niedrig aktiven Blei mit weniger als $0,1 \text{ Bqkg}^{-1}$ von 5 cm Dicke. Die Bleiabschirmung ist von allen Seiten und von oben mit 9 cm dicken Platten aus Plastszintillatoren umgeben, die mit Photovervielfachern versehen sind. Der Untergrund des HPGe-Detektors wurde in zwei Modi gemessen: 1. Nur mit Bleiabschirmung, 2. zusätzlich mit Antikoinzidenzabschirmung. Dabei wurde festgestellt, dass im ersten Fall der Annihilationspeak bei 511 KeV das Spektrum dominiert. Dieser Peak entsteht durch die Annihilation von Elektronen und Positronen in der Abschirmung als Produkte der Wechselwirkung der sekundären kosmischen Strahlung mit dem Umgebungsmaterial. Die zweite wichtige Feststellung ist ein intensives Untergrundkontinuum mit einem Maximum bei ungefähr 200 KeV, das durch Wechselwirkung der kosmischen Myonen mit der Bleiabschirmung erzeugt wird [51]. Der Untergrund des gleichen Detektors mit Antikoinzidenzabschirmung zeigte im Spektrum keinen Annihilationspeak mehr. Ebenso ist das Kontinuum viel niedriger. Die integrale Zählrate im Energiebereich 30 - 2300 KeV beträgt ohne Antikoinzidenzabschirmung $0,21 \text{ s}^{-1}$ und wird durch die Antikoinzidenz bis auf $0,02 \text{ s}^{-1}$ verringert. Das entspricht einem Untergrund ohne Antikoinzidenzabschirmung unter einer Gesteinsdecke von 200 m. Damit wird deutlich, dass Antikoinzidenzabschirmungen für Detektoren, die unter geringen Gesteinsdicken installiert sind, sehr wirksam sind [52, 53].

- **Laboratorium im Physikalischen Institut der Universität Bern**

1975 wurde das Low-Level-Laboratorium für Betastrahlungsmessung mit Flüssigszintillations- und Proportionalzählern für die Messung von ^{14}C , ^{37}Ar , ^{39}Ar zur Altersbestimmung 25 m (70mwe) unter dem Keller des Physikalischen Instituts der Universität Bern installiert [12]. Man gelangt zu ihm mit einem Fahrstuhl. 0,4 m dicke Wände aus niedrig aktivem Beton aus Serpentin und dänischem Zement dienen der Verringerung des Untergrundes aus dem Umgebungsgestein. Mit diesem Beton wurde der Fluss an Gammastrahlung um den Faktor 10 verringert. Der Myonenfluss ist durch die Gesteinsbedeckung um einen Faktor 10 verringert. Mit einem Neutronenzähler dessen Eigennulleffekt unbekannt war, wurde eine Verringerung des Neutronenflusses um den Faktor vier gemessen. Diese Verringerung kann in Wirklichkeit wesentlich größer sein.

Zum Vergleich haben die Autoren den Myonen- und den Gammastrahlungsfluss in einem Seitentunnel des St. Gotthard - Straßentunnels unter einer 1100 m dicken Granitbedeckung (3000 mwe) gemessen. Der Myonenfluss ist im Vergleich zu einem normalen Laboratorium um den Faktor 10^6 verringert, jedoch war der Gammastrahlungsfluss wegen der hohen Radioaktivität des Granits um den Faktor 3 erhöht.

- **Untertagelaboratorium "Felsenkeller" in Dresden**

Das Untertagelabor "Felsenkeller" in Dresden wurde in einem ursprünglich von einer Brauerei als Eislager genutztem künstlichen Stollensystem mit einer Gesteinsbedeckung von 47 m in einem Flusstal auf normalem Verkehrsniveau errichtet. Nach vorläufigen Messungen mit NaI(I)- und Ge(Li)-Detektoren [54] wurde eine spezielle Messkammer mit einer 0,7 m dicken Abschirmung aus dem niedrigaktiven ultrabasischen Gestein Serpentin aus Zöblitz (Sachsen) eingebaut [13]. Dieses Gestein enthält nur 0,01 % K, 0,08 ppm Th und 0,1 ppm U. Damit wurde die Strahlung aus dem umgebenden Gestein weitgehend abgeschirmt. Das Gestein des Felsens am Ort des Stollens besteht aus dem früher als Syenit bezeichneten Hornblendemonzonit, der 5 % K, 50 ppm Th und 10 ppm U und damit mehr als zwei Größenordnungen mehr Radioaktivität als der Serpentin enthält. Das entspricht Aktivitäten für ^{40}K , ^{208}Tl und ^{214}Bi von 1300, 72 und 120 Bq/kg. Die Gesteinsbedeckung von 47m (125 mwe) verringert den Myonenfluss um den Faktor 45. Der Fluss Weißeritz fließt oberhalb des Labs durch das Döhlener Becken, in dem in der Vergangenheit uranreiche Steinkohle abgebaut wurde und sich Halden mit erhöhtem Urangehalt befinden, die im Tal eine erhöhte Radonaktivität in der Luft von ca. 30 Bq/m³ verursachen. Trotz der erhöhten Radioaktivität in der Umgebung wurde das Labor wegen des bequemen Zuganges (Abb. 2, Abb. 3) und der Nähe zu Instituten in einen der vorhandenen Stollen installiert.

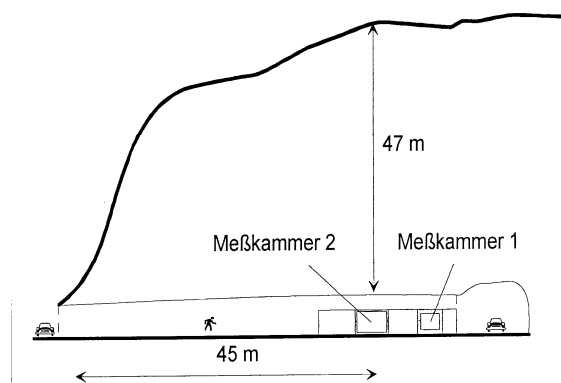


Abbildung 2: Schnitt durch den Hang an der Weißeritz beim Untertagemesslabor „Felsenkeller“



Abbildung 3: Eingang zum Stolln mit dem Untertagemesslabor „Felsenkeller“

1995 wurde das Laboratorium rekonstruiert und dabei eine zusätzliche Messkammer mit Wänden aus Stahl und Blei installiert (Abb. 4). Länge, Breite und Höhe der neuen Kammer betragen 6 m, 3 m und 2,2 m. Ihre Abschirmung besteht von außen nach innen aus 10 mm neuem Stahl, 270 mm Hartstahlgranulat, 36 mm Altstahl, 30 mm Blei und 12 mm Altstahl. Die Gesamtdicke beträgt 210 gcm^{-2} . Der thermischen Isolierung des Labors dient eine 10 cm dicke Schicht aus Polystyrenschaum (Styropor). Die HPGe-Detektoren haben jeder für sich eine Bleiabschirmung von 10 bis 17 cm [53, 54]. Die Aktivität an ^{222}Rn betrug im Stollen ursprünglich 200 Bq/m^3 . Im Laboratorium wird sie durch klimatisierte Außenluft reduziert. Der in den Kryostaten verdampfende Stickstoff wird in die Detektorabschirmung geleitet, um dort die radonhaltige Luft zu verdrängen.



Abbildung 4: HPGe-Detektoren in Bleiabschirmungen in der Messkammer mit Wänden aus Stahl und Blei

Einige der im Untergrund der Gammaspektren im „Felsenkeller“ bei langen Messzeiten noch erkennbaren Peaks stammen von Neutronen. Nach Heusser [24] beträgt die Neutronenflussdichte aus der kosmischen Strahlung in Meereshöhe ungefähr $80 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und unter einer Gesteinsdicke von 125 m mwe $0,5 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Wesentliche Quellen der Neutronen im Untertagelabor „Felsenkeller“ sind die natürliche Radioaktivität des Hornblendemonzonits und die Reaktion von Myonen mit dem der Abschirmung gegen Gammastrahlung dienendem Blei.



Abbildung 5: Neutronendetektor der Fa. GBS-Elektronik im Labyrinth der Messkammer mit der Abschirmung aus Serpentin

Mit einem Spaltstoffmonitor der Fa. GBS-Elektronik wurden Flüsse an schnellen Neutronen im Bereich des Spaltspektrums von ^{252}Cf oberirdisch $28 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, unter 125 mwe im uran- und thoriumreichen Hornblendemonzonit $2,6 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, im radioaktivitätsarmen Serpentin $0,26 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Abb. 5) und in einer 5 cm dicken Bleiabschirmung, die von Serpentin umgeben ist, $3,9 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gemessen [38]. Damit konnte die Wirkung der Gesteinsschicht, der Einfluss der natürlichen Radioaktivität des Umgebungsgesteins und die Wirkung einer Bleiabschirmung auf den Neutronenfluss demonstriert werden. Die von der Radioaktivität stammenden Neutronen sind wegen der geringen Konzentrationen an Thorium und Uranium im Serpentin mehr als zwei Größenordnungen niedriger als im Hornblendemonzonit. In dem gemessenen Wert von $0,26 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ist aber noch der von Neutronenmonitor selbst verursachte unbekannte Wert für den Untergrund enthalten. Hashemi-Nezhad und Peak [21] berechneten den Neutronenfluss für ein Gestein, mit 0.81 % Natriumoxid, 1ppm Uranium und 1ppm Thorium zu $0,5 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, wobei die Hälfte der Neutronen durch (α, n) -Reaktionen mit Natrium gebildet wurden. Für den Hornblendemonzonit mit 6 % Na_2O , 50 ppm Th und 10 ppm U würde das einen Neutronenfluss von ca. $50 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ergeben. Das deutet darauf hin, dass mit dem oben genannten Spaltstoffmonitor nur ein geringer Teil der Neutronen aus dem Gestein erfasst wird.

- **Installation im Grand Coulee Staudamm**

Kaye et al. [9] vom Batelle Memorial Institute, Richland, Washington installierten NaI(Tl)-Spektrometer in einer Galerie des Grand Coulee Staudamms 110 m unter der Dammkrone, um die Quellen des Untergrundes zu untersuchen. Die Betonmauer gewährleistete eine horizontale Dicke von 78 mwe stromabwärts und von 13 mwe stromaufwärts.

- **Ogoya Untertagelaboratorium**

Das Ogoya Untertagelaboratorium gehört zum Low-Level Radioactivity Laboratory der Kanazawa Universität in Tatsunokuchi (Japan). Es ist in einem 546 m langen Tunnel in einer 40 Jahre zuvor stillgelegten Kupfergrube mit einer Bedeckung von 135 m Gestein, einer Tuff Brekzie mit einer Dichte von 2,0, was eine Tiefe von 270 mwe ergibt, 15 km vom Low-Level Radioactivity Laboratory entfernt eingerichtet [57]. Die Konzentration an ^{222}Rn beträgt 20 Bqm^{-3} . Im Labor waren ein koaxialer HPGe-Detektor von 379 cm^3 und 93,5 % relativer Effektivität, ein 59 mm x 20 mm planarer Ge-Detektor mit Al-Fenster und ein PIPS-Si-Detektor von 19,5 mm Durchmesser und 0,5 mm Dicke mit einer Auflösung von 17 keV für Alpha- und 12 keV für Betastrahlen

installiert. Der Si-Detektor ist zur Verringerung des Untergrundes in einem 2" x 2" Bohrloch eines 3" x 3" NaI(Tl)-Detektors untergebracht.

- **Low-Background Facility (LBF) des Lawrence Berkeley National Laboratory**

Die LBF wurde vom LBNL in einem Kraftwerksraum im Staudamm in Oroville 180 m unter der Dammkrone eingerichtet. Es wurde zur Messung der Radioaktivität in Materialien genutzt, die ihrerseits wieder für Instrumente für low-level Messungen verwendet werden sollten [58].

- **Laboratorium Hades des IRRM in Mol, Belgien**

In einem Schacht, in dem das Langzeitverhalten von Nuklearen Abfällen in Ton untersucht wird, ist ein spezieller Bereich für Low-level-Messungen für das Institut für Referenzmaterialien und Radioaktivitätsmessungen (IRRM) eingerichtet. [59]. Eine durch 5 cm starke Stahlringe gehaltene Gallerie von 3,5 m innerem Durchmesser befindet sich in 225 m Tiefe in einer Tonschicht (ca. 500 mwe). Die Nukleonenkomponente der kosmischen Strahlung ist um 5 bis 6 Größenordnungen verringert, der Myonenfluss um den Faktor 800.

5.3 Untertagelaboratorien in großer Tiefe für kern- und astrophysikalische Experimente

- **Baksan Neutrinolaboratorium**

In dem sich in den nördlichen Ausläufern des Zentralkaukasus befindlichen Baksantal ist in einem horizontalen Stollen unter 660 mwe ein Raum für Experimente zur Messung geringer Radioaktivität eingerichtet. Um die Strahlung von der Radioaktivität des umgebenden Tongesteins zu verringern, wurden Wände aus zwei Schichten installiert. Die äußere besteht aus Beton mit dem niedrig aktiven ultrabasischen Gestein Dunit und die innere aus Dunit ohne Zement [60]. Später wurde das Laboratorium in einer Tiefe von 4400 mwe installiert [61].

- **Solotvina Untertagelaboratorium**

Das Solotvina Untertagelaboratorium (SUL) wurde im Jahre 1984 vom Institut für Kernforschung der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften errichtet. Es befindet sich in der westlichen Ukraine in Solotvina, einer Kleinstadt in der Region Hinterkarpaten nahe der rumänischen Grenze. Die Stadt ist wegen ihres Salzbergwerks und dem Allergiekrankenhaus mit einer unterirdischen Abteilung und Salzseen mit medizinischem Schlamm bekannt. Ziel des Laboratoriums ist die Suche nach seltenen Prozessen in der Kern- und Elementarteilchenphysik, in erster Linie des doppelten Betazerfalls (2β) von Atomkernen.

Das Laboratorium befindet sich im Salzbergwerk in 430 m Tiefe 146 m unter dem Meeresspiegel. Es besteht aus einer großen und mehreren kleinen Hallen mit einer Gesamtfläche von fast 1000 m². Die Temperatur beträgt 22 – 24°C. Das Laboratorium hat eine ständig laufende eigene Stromversorgung, damit die Messung bei Stromausfall im Bergwerk nicht unterbrochen wird. In der Tiefe von 430 m (1000 mwe) ist der Fluss an kosmischer Strahlung um den Faktor 10⁴ auf 0,017 m⁻² s⁻¹ verringert. Der Neutronenfluss beträgt < 0,027 m⁻²s⁻¹ und die Radonkonzentration in der Luft < 33 Bqm⁻³. Wegen der geringen Radioaktivität des Salzes ist der durch das Umgebungsgestein verursachte Untergrund im SUL niedriger als in vielen anderen Untertagelaboratorien. Neben Experimenten für die Kern- und Elementarteilchenphysik, werden viele Messungen für die Auswahl von Materialien für Einrichtungen mit geringem Untergrund durchgeführt [62].

- **Cheong Pyung underground laboratory (CPL)**

Das CPL befindet sich in der Nähe von Seoul, Korea, in einem Tunnel in granitoidem Gestein mit 4,8 ppm U, 6 ppmTh und 0,91 % Na₂O [63]. In dem Labor werden Experimente für die Suche nach dunkler Materie mit Hilfe von CsI(Tl) –Detektoren vorbereitet.

- **Untertagelabor der PTB Braunschweig**

1991 richtete die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig ein Untertagelaboratorium für Dosimetrie und Spektrometrie (UDO) im Salzbergwerk ASSE II in der Nähe von Braunschweig ein. Bei einer Tiefe von 490 m ist die Intensität der kosmischen Myonen um mehrere Größenordnungen verringert. Das umgebende Steinsalz besitzt eine sehr niedrige spezifische Aktivität, und die Konzentration an Radon ist in der Luft gering. Mit einem HPGe-Detektor von 88 % relativer Effektivität in einer Abschirmung von 20 cm niedrig radioaktiven Blei und 1 cm Elektrolytkupfer wurde an einem früheren 925 m tiefen Stolln im Bereich von 40 bis 2750 ein Untergrund von 0,012 s⁻¹kg⁻¹ gefunden [64].

- **Laboratorium im Homestake Goldbergwerk**

1965 hatte Raymond Davis vom Brookhaven National Laboratory im Homestake Bergwerk in South Dakota das erste Neutrinoexperiment unter Verwendung der Reaktion Cl(n,ν)Ar durchgeführt. Dafür erhielt er 2002 den Nobelpreis für Physik. Brodzinski et al. [65] demonstrierten die Ergebnisse des Pacific Northwest Laboratoriums und der Universität von South Carolina, die sie im Homestake Goldbergwerk erhalten hatten und haben Wege zur drastischen Verringerung des Untergrundes von Ge-Detektoren aufgezeigt. Das gegenwärtig erschöpfte Bergwerk nahe Leads in den Black Hills von South Dakota war ungefähr 125 Jahre in Betrieb. In diesem Bergwerk wurden viele kernphysikalische Experimente und Untersuchungen zur Verringerung des Untergrundes durchgeführt. Dazu gehörten Experimente zur Antikoinzidenz, für wirksame passive Abschirmungen, zur Pulsformdiskriminierung (PSD) und zur sorgfältigen Auswahl von Materialien und deren unterirdische Reinigung von den durch kosmische Strahlung gebildeten Radionukliden. In diesem Laboratorium wurde ein extrem niedriger Nulleffekt erreicht [66].

- **Laboratorium Soudan**

Das Laboratorium Soudan befindet sich in dem Staatspark Soudan Bergwerk mit dem ältesten Eisenbergwerk in Minnesota und wird jetzt von der School of Physics and Astronomy der Universität von Minnesota betrieben. Die ersten physikalischen Experimente in Soudan begannen 1980. Das jetzige Laboratorium wurde zwischen 1984 und 1986 errichtet. Im Soudan Laboratorium ist die Zahl der Teilchen der kosmischen Strahlung in einer Tiefe von 1800 mwe um einen Faktor von 10⁵ im Vergleich zur Oberfläche verringert.

- **Laboratoire Souterrain de Modane (LSM)**

Das Untertagelaboratorium in Modane (LSM) dient unter Verantwortung des französischen Nationalinstituts für Kern- und Elementarteilchenphysik (IN2P3), des Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) und der Direktion für Materialforschung (DSM) des Atomenergiekommissariats (CEA) der Forschung. Das Laboratorium befindet sich in der Mitte des Fréjus-Tunnels, der Modane in Frankreich mit Bardonecchia in Italien durch die französisch - italienische Grenze in 1260 m Höhe verbindet und wurde 1982 zusammen mit dem Tunnel eingerichtet. Es besteht aus einer Haupthalle von 31 m Länge, 10 m Breite und 11 m Höhe und einigen kleineren Räumen. In der großen Halle waren die Experimente NEMO [67] und EDELWEISS [68] aufgebaut.

Verschiedene Germaniumdetektoren sind in "weißen Räumen" für die Messung geringer Radioaktivitäten für Ozeanographie, Materialmessungen und Umweltkontrolle untergebracht. C-14-Zähler dienen der Datierung von archäologischen Proben [69].

- **Nationallaboratorium Gran Sasso**

Das Nationallaboratorium Gran Sasso (LNGS) ist eines von vier italienischen Nationallaboratorien. Es ist das größte Untertagelaboratorium für Experimente zur Teilchen- und Astrophysik in der Welt. Es befindet sich zwischen den Städten L'Aquila und Teramo, ungefähr 120 km von Rom entfernt, innerhalb des 10 km langen Autobahntunnels durch das Gran Sasso Gebirge. Es besteht aus drei großen Experimentierhallen, jede ungefähr 100 m lang, 20 m breit und 18 m hoch, sowie Versorgungstunnel mit einem Gesamtvolumen von ungefähr 180000 Kubikmeter.

Die 1400 m dicke Gesteinsdecke (3300 mwe) bewirkt eine Verringerung des Flusses an Myonen um ungefähr eine Million auf $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [70]. Der Neutronenfluss ist wegen der geringen Konzentrationen an Uranium und Thorium in dem Dolomit des Gebirges 1000mal geringer als an der Oberfläche. Er beträgt für thermische Neutronen $0,01 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und für das gesamte Spektrum $0,04 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [71]. Mit einem Ge-Detektor von 102 % relativer Effektivität wird im Energiebereich von 50 bis 2750 KeV ein Untergrund von $0,15 \text{ min}^{-1}$ gemessen [72]. Die Konzentrationen an Kalium, Thorium und Uranium im Kalkstein des Labors betragen 200 ppm, 0,1 ppm und 1 ppm [73].

Die Aufgabe des Laboratoriums besteht darin, Raum für Experimente zur Astroteilchenphysik, Kernastrophysik und für andere Disziplinen bereitzustellen, die einen geringen Strahlungsuntergrund erfordern. Zu den gegenwärtigen Forschungsprogrammen gehören Messungen von Neutrinos, die in der Sonne und in Supernovaexplosionen entstehen, Neutrinooszillationen mit einem Strahl aus CERN (CNGS Programm), Suche nach der Neutrinomasse beim neutrinofreien Doppelbetazerfall, nach dunkler Materie und anderen für die Astrophysik interessanten Kernreaktion.

- **Canfranc Untertagelaboratorium (LSC)**

Eine der wesentlichsten Aktivitäten der Gruppe für Kern- und Hochenergiephysik der Universität Zaragoza war der Aufbau und die Instrumentierung des Canfranc Untertagelaboratoriums (LSC). Es befindet sich in dem internationalen Eisenbahntunnel von Somport bei Canfranc in den Spanischen Pyrenäen. Als Standort für die Untersuchung seltener nuklearer Ereignisse wurde Mitte der 80iger Jahre der Canfranc Tunnel ausgewählt. Am Anfang gab es keine Infrastruktur, sondern nur zwei kleine Hallen von jeweils ca. 10 m^2 780 m vom spanischen Eingang unter einer Gesteinsbedeckung von 675 mwe. 1986 wurden mit einer mobilen Messeinrichtung entlang der Eisenbahnstrecke Messungen der Radioaktivität und der kosmischen Strahlung ausgeführt.

Im Ergebnis einer Zusammenarbeit mit der University of South Carolina (USC) und dem Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) kam im August 1988 der erste Ultra-low-level Germaniumdetektor nach Canfranc. Mit diesem wurden zuerst Messungen von Materialien wie Blei, Kupfer, Polyethylen durchgeführt und 15 Monate später begann die Suche nach dem Doppelbetazerfall von ${}^{76}\text{Ge}$. Dazu war unter 675 mwe ein 208 cm^3 ultra-low-level HPGe Detektor von 14 hexagonalen NaI -Szintillatoren in 4π Geometrie umgeben worden und mit 25 cm Blei, 5 cm borhaltigem Polyethylen, einer mit Stickstoff gespülten PVC-Box, 2 mm Cd-Blech und 20 cm Paraffin abgeschirmt.

1991 wurde eine neue vorgefertigte Kabine von 27 m^2 zusammen mit einer bereits vorhandenen von 15 m^2 in eine neue Position 1200 m vom spanischen Eingang unter

eine Gesteinsbedeckung von 1380mwe als Laboratorium Nr. 2 eingerichtet. 1994 wurde der neue Somport-Straßentunnel und bei dieser Gelegenheit auch eine neue Experimentierhalle (Laboratorium Nr. 3) mit 118 m² 2520 m vom spanischen Eingang entfernt unter einer Gesteinsdecke von 2450 mwe errichtet.

- **Sudbury Neutrinoobservatorium**

Das Sudbury Neutrinoobservatorium wird von der Queens Universität Kingston, Ontario, Canada, betrieben. In dem 6200 mwe tiefen Creiton Bergwerk ist ein 1000 t D₂O Cerenkov - Detektor installiert.

6 Detektoren, Koinzidenz-, Antikoinzidenz-, mehrdimensionale Spektrometrie und Pulsformdiskriminierung in Untertagelaboratorien

6.1 Vergleich des Untergrundes von Ge-Halbleiterdetektoren in verschiedenen Untertagelaboratorien

Der Vergleich der Werte für den Untergrund verschiedener Messsysteme in verschiedenen Standorten ist sehr nützlich, um nach weiteren Möglichkeiten zur Verringerung des Untergrundes zu suchen. Wir können dabei einzelne Peaks betrachten, aber es hat sich eingebürgert, bei Germaniumdetektoren die Untergrundzählraten r_U eines großen Energiebereiches zwischen 40 und 2750 keV zu vergleichen und dabei auf die Ge-Detektormasse m zu beziehen. Dabei wird angenommen, dass die Untergrundzählrate annähernd proportional der Detektormasse ist. In Tabelle 13 werden einige integrale Untergrundzählraten, die in verschiedenen Laboratorien, zum Teil in CELLAR (Collaboration for European Low-Level Underground Laboratories) gemessen wurden, mit und ohne Antikoinzidenz (AK) angegeben [74]. Die Antikoinzidenzdetektoren befinden sich dabei außerhalb der Bleiabschirmung und dienen lediglich der Verringerung des durch äußere Strahlung verursachten Untergrundes.

Tabelle 13: Vergleich des Untergrundes von Ge – Spektrometern

Laboratorium	Ort	Tiefe mwe	r_U ohne AK [s ⁻¹ kg ⁻¹]	r_U mit AK [s ⁻¹ kg ⁻¹]
ARC*)	Seibersdorf	1	0,58	0,095
PNNL**)	Richland		0,37	0,014
MPI IfK	Heidelberg	15	0,2	0,024
IAEA-MEL	Monaco	35	0,08	0,010
VKTA	Dresden	125	0,042	
Kanazawa Univ.	Ogoya u.l.	270	0,009	
IRMM	Mol	500	0,0030	
PTB	Asse	2100	0,0032	
LNGS	Gran Sasso	3800	0,0010	
LSCE	Frejus	4800	0,00035	

*) Österreichisches Forschungszentrum

***) Brodzinski [63]

In diesen Laboratorien verringert sich bis zu einer Tiefe von 500 mwe der Untergrund mit dem Myonenfluss. Danach wird der Myonenfluss viel stärker als der Untergrund verringert. Das zeigt, dass in größeren Tiefen andere Quellen des Untergrundes an Einfluss gewinnen. Die Werte der Tabelle 13 machen deutlich, dass bei Germaniumdetektoren der Untergrund um mehr als drei Größenordnungen verringert werden kann, wenn die Detektoren in tiefen Untertagelaboratorien installiert werden. Antikoinzidenzabschirmungen sind besonders in Laboratorien geringer Tiefe sehr nützlich. Sie wirken so, als ob die Detektoren in größere Tiefe installiert worden wären.

Im Untertagelabor MEL der IAEA in Monaco ist für die Messung von niederenergetischen Gammastrahlen ein HPGe-Detektor mit einem Fenster aus Kohlenstoff installiert. Über die Verringerung des Untergrundes eines Niedrig - Photonenergie - Germaniumdetektors (LEPD) im Untertagemesslabor im Vergleich zu oberirdischen Labors gibt es wenig Aussagen. Hier hatte bisher die Auswahl der Materialien für die Abschirmung und der Endfenster noch die größere Bedeutung.

Der Untergrund von NaI(Tl)-Detektoren und Szintillationsdetektoren aus anderen Materialien wird später im Zusammenhang mit der β, γ -Koinzidenzspektrometrie besprochen.

6.2 Si-Detektor für Betastrahlung

Komura [57] fand, dass der Untergrund eines Siliciumdetektors (PIPS, Durchmesser 19,5 mm, Dicke 0,5 mm) oberirdisch bei Anwendung eines NaI(Tl)-Antikoinzidenzdetektors um den Faktor 200 von 16 cpm auf 0,08 cpm verringert wird. Nach Installation im Untertagelabor Ogoya erfolgte im Bereich von 40 bis 2000 keV eine weitere Verbesserung um den Faktor 4 auf 0,02 cpm. Zwischen 250 und 2000 keV beträgt der Untergrund 0,005 cpm. Damit ist der Untergrund in Ogoya über eine Größenordnung besser als mit kommerziell erhältlichen Betastrahlungszählern oberirdisch gemessen wurde.

6.3 Gaszähler in Untertagelaboratorien

Loosli und Oeschger [75] hatten festgestellt, dass der Untergrund von Gaszählern nahezu ihrem Volumen proportional ist. Sie haben weiter gezeigt, dass selbst in einer Tiefe von 70 mwe, wo der Fluss an energiereichen Nukleonen aus der kosmischen Strahlung um 9 Größenordnungen und der Fluss der Myonen um den Faktor 11 verringert sind, der Untergrund nur um einen Faktor zwischen 2 und 4,5 verringert wird. Daraus schlossen sie, dass untertage die Hauptquelle des Untergrundes im Detektor selbst und der Umgebung zu suchen ist. Eine drastische Verringerung des Untergrundes wurde mit Miniatur-Proportionalzählern erreicht, die bei den GALLEX-Experimenten eingesetzt wurden [76].

In einem Multielement Proportionalzähler (MEPC) wird ein einfacher Drahtzähler durch eine Kammer ersetzt, die aus sieben oder mehr z. B. hexagonal angeordneten Zählern der gleichen Größe besteht, die jede voneinander nur durch Katodendrähte getrennt sind. Das ermöglicht sowohl eine externe als auch eine interne Antikoinzidenz, z. B. zur ^3H - Messung [77, 78]. Der Zähler kann auch als Spurendetektor benutzt werden [79]. Das Prinzip wurde auch erfolgreich für die Untersuchung des doppelten Betazerfalls von Xe in den Gran Sasso und Baksan Laboratorien angewandt [80].

6.4 Flüssigszintillationszähler

Von den kommerziellen Flüssigszintillationszählern (LSC) besitzt der von der Fa. Wallac entwickelte und gefertigte Typ „Quantulus“ den niedrigsten Untergrund. Er ist mit einem ringförmigen Antikoinzidenzzähler ausgerüstet, der den Detektor für die Aktivitätsmessung umgibt und die Myonen weitgehend „abschirmt“. Er ist auch mit einer Pulsformdiskriminierung versehen, mit deren Hilfe man die Impulse von Alphastrahlen von denen der Betastrahlen wegen der unterschiedlich langen Lebensdauer der von der Strahlung im Szintillator erzeugten angeregten Molekülzustände unterscheiden kann.

Während der Untergrund von kommerziell erhältlichen hochwertigen Germaniumdetektoren nicht allzu viel höher liegt, als jener, den man unter den besten Bedingungen erzielen kann, erreicht man mit kommerziell erhältlichen Low-Level-Flüssigkeitszählern bei weitem nicht die theoretisch möglichen Werte. Ungefähr 50 % des Untergrundes bei oberirdischen Messungen mit kommerziellen LSC stammen aus dem Gerät selbst, das viel Material enthält, welches nicht frei von natürlicher Radioaktivität ist. Selbst im Laboratorium in Gran Sasso zeigte ein LSC vom Typ

“Quantulus” im Bereich von ^{14}C nur eine Verringerung um 65 % im Vergleich zur Messung an der Oberfläche [81]. Sie zeigten, dass für den Untergrund die Aktivität des Messgerätes z. B. der Kaliumgehalt der Photovervielfacher verantwortlich ist. Ihre Installation in einem Untertagelaboratorium bringt deshalb nicht solche deutlichen Vorteile wie bei den Ge-Detektoren. Aber die Arbeiten der Grundlagenforschung zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, auch den Untergrund bei der LSC drastisch zu verringern, wie am Beispiel des BOREXINO – Experimentes zu sehen ist [82].

6.5 Neutronendetektoren

Als Neutronendetektor haben sich vor allem Zählrohre mit $^{10}\text{BF}_3$ und ^3He -Füllung bewährt. Bei den erstgenannten ist es leichter, gleichzeitig vorhandene Gammastrahlung zu diskriminieren, dafür ist es schwieriger, natürliche radioaktive Verunreinigungen aus dem Zählrohr zu entfernen. Die Zählrohre sprechen in erster Linie auf thermische Neutronen an. Um schnelle Neutronen zu messen, muss das Zählrohr mit einem Moderator ummantelt werden, und sehr energiereiche Neutronen werden am besten erfasst, wenn man den Moderator zusätzlich mit einem Bleimantel umgibt. Mit jeder Konfiguration wird bevorzugt ein Ausschnitt aus dem Neutronenspektrum erfasst. Deshalb wird, wie schon bei der Messung von Neutronenflüssen oberirdisch und in Untertagelaboratorien beschrieben, mit mehreren verschiedenen Detektorummantelungen ein Neutronenspektrum aufgenommen.

Es wurden an verschiedenen Kontrollstellen Neutronenmonitore installiert, die den Transport von Spaltstoff anzeigen sollen [83]. Um die Empfindlichkeit zu verbessern, wurden dabei mehrere größere mit einem Moderator ummantelte Zählrohre aufgestellt. Dabei sollte, die Kontrollstelle so ausgestaltet werden, dass der Neutronenfluss der Umgebung so gering wie sinnvoll ist.

6.6 Mehrdimensionale Spektrometrie

Unter mehrdimensionaler Spektrometrie wollen wir jede Spektrometrie verstehen, bei der mehr als ein Parameter gemessen wird, unabhängig davon, ob nur ein oder mehrere Zweige als Viel- oder Einkanalmessung der in einem oder mehreren Detektoren absorbierten Energie oder der zwischen zwei oder mehreren Ereignissen verstreichenden Zeiten registriert werden. Die Entwicklung der mehrdimensionalen Spektrometrie begann mit der Koinzidenzzählung, der gleichzeitigen Registrierung von Ereignissen in zwei Geigerzählern [84], wofür W. Bothe im Jahre 1954 den Nobelpreis erhielt. Nachdem man die Höhenstrahlung als wichtigste Ursache für den Nulleffekt von Geigerzählrohren erkannt hatte, nutzte man ein oder mehrere um das Messzählrohr angeordnete Zählrohre, um in Antikoinzidenz alle Ereignisse auszuschalten, die sowohl im Messzählrohr als auch in einem umgebenden Zählrohr registriert wurden. Waren es am Anfang vor allem ^{14}C und andere Betastrahler, die man mit Hilfe von Antikoinzidenzanordnungen bei verringertem Untergrund messen wollte, so sah man bald auch bei anderen Detektoren, die Möglichkeit, die Messbedingungen durch Antikoinzidenz oder Koinzidenz zu verbessern. Einmal wurde, wenn ein Gammastrahlungsdetektor von einem Antikoinzidenzdetektor direkt umgeben war, nicht nur der von den Myonen verursachte, sondern auch der von Comptonstreuung höherenergetischer Gammastrahlung stammende Untergrund reduziert. Wenn beim Zerfall eines radioaktiven Nuklides sowohl Teilchen als auch Quanten oder mehrere Quanten emittiert werden, ergeben sich weitere Möglichkeiten, die Koinzidenzmessung selektiv an das jeweilige Zerfallsschema anzupassen.

Die Messungen der Aktivitäten im Fall-out von oberirdischen Kernwaffentests und die stürmische Entwicklung der Neutronenaktivierungsanalyse zu Beginn der 60er Jahre stellten neue Anforderungen an die Radioaktivitätsmesstechnik. Für die Entwicklung der Koinzidenz- und Antikoinzidenzmethoden ist seit dieser Zeit das aus den Hanford - Werken hervorgegangene Pacific North West Laboratory in Richland beispielgebend. Perkins [5] hatte in Richland drei sehr kompakte und vielseitige Koinzidenzspektrometer aufgebaut.

Beim Summenkoinzidenzspektrometer befanden sich die Proben zwischen zwei großen NaI(Tl)-Kristallen, jeweils 9 3/8" im Durchmesser und 4" hoch. Werden die Impulshöhen beider Detektoren addiert, so ergeben sie ein Summenspektrum, daneben wird geprüft, ob der erhaltene Wert von einem Detektor stammt oder von beiden. Je nachdem wird das Spektrum in eine der beiden Hälften eines Speichers mit 400 Kanälen gespeichert. Das Summenspektrum gilt in erster Linie für Nuklide mit einem Übergang, das Koinzidenzspektrum gilt für solche mit zwei oder mehr Übergängen. Der Untergrund wird im Koinzidenzsummenspektrum besonders für niedrige Gammaenergien wesentlich verringert.

Beim zweiten Spektrometer wird ein NaI(Tl)-Kristall mit einem großen Plastszintillator ummantelt, der in Antikoinzidenz geschaltet wird. Gammastrahlen aus der Probe, die im Spektrometerkristall nicht vollständig absorbiert werden, verlieren ihre restliche Energie im Antikoinzidenzdetektor. Wenn dieser dann ein Signal abgibt, werden die Ereignisse im Spektrometerdetektor nicht mitgezählt. Das führt sowohl zu einer drastischen Verringerung des Compton-Untergrundes als auch des Untergrundes aus der Umgebung [85].

Das System für die β, γ -Koinzidenzspektrometrie enthält die gleichen großen NaI(Tl)-Kristalle wie das erste. Zusätzlich wird zwischen beiden Detektoren ein Betadetektor mit der Probe eingeführt. Die Probe wird in das Bohrloch eines Plastszintillator von 1/2" Durchmesser und 3/16" Dicke pipettiert, eingetrocknet und mit einem weiteren Plastszintillator verschlossen. Der Szintillator wird dann mit einem 3/4" SEV verbunden. Das Signal aus diesem Detektor wird zu einem Koinzidenzkreis geführt. Für den Fall der β, γ -Koinzidenz wird das Spektrum der Summe beider großen NaI(Tl)Detektoren in die eine Hälfte des Speichers und ohne Koinzidenz mit dem Betadetektor in die andere Hälfte des Speichers abgespeichert. Dabei kann man bei den NaI(Tl)-Detektoren zwischen der Summe der Impulsleistungen gleichzeitiger Ereignisse und der Summe der einzelnen Ereignisse wählen. Die Effektivitäten der Messung der Betastrahlung betragen bei den Maximalenergien von 0,31, 1,4 und 3,1 MeV für ^{60}Co , ^{24}Na und ^{106}Ru 54 %, 86 % und 92 %. Der Untergrund der Umgebungsstrahlung wird um drei Größenordnungen verringert.

Eine entsprechende Vielfalt an Messmöglichkeiten in einem Untertagemesslabor haben Povinec et al. [15] vorgestellt. Im Folgenden soll versucht werden, die Methoden der mehrdimensionalen Spektrometrie einzeln darzustellen, auch wenn mit den entwickelten Messsystemen mehrere Funktionen realisiert werden können, da man z. B zwei Detektoren sowohl in Koinzidenz als auch in Antikoinzidenz und auch als Summe schalten kann.

6.7 Antikoinzidenzspektrometrie (AK)

Ursprünglich wurde die AK zur Verringerung des Untergrundes bei Zählrohren angewandt und zuerst hat man auch für die Gammasppektrometrie Zählrohre für die aktive Abschirmung verwendet. Später kamen dafür vorwiegend Plastszintillatoren zum Einsatz, die in großen Dicken und Flächen gefertigt werden können [86]. In den kommerziell erhältlichen Low-level-Flüssigkeitsszintillationsspektrometern ist in den meisten Fällen die Probe mit dem flüssigen Szintillator und den Sekundärelektronenvervielfachern innerhalb der Bleiabschirmung mit einem mit flüssigen Szintillator gefüllten Antikoinzidenzzählrohr umgeben.

Mit Antikoinzidenzdetektoren, die außerhalb der Bleiabschirmung angeordnet sind, kann man den Untergrund verringern, welcher durch geladene Teilchen besonders von den Myonen der kosmischen Strahlung von außerhalb des Detektorsystems verursacht ist. Dieses Prinzip ist in oberirdischen und in Laboratorien geringer bis mittlerer Tiefe besonders wirksam, da hierbei geladene Teilchen von außen einen wesentlichen Beitrag zum Untergrund liefern. Antikoinzidenzabschirmungen werden auch als aktive Abschirmungen bezeichnet.

Das wurde zuerst bei Messungen mit Zählrohren beobachtet. Gegenwärtig sind Zählrohre für Low-level-Messungen meist von entsprechenden Antikoinzidenzzählrohren umgeben. Die meisten Myonen, die das Messzählrohr durchfliegen, haben auch das Antikoinzidenzzählrohr getroffen, so

dass in beiden ein Signal erzeugt wird. Die Elektronik sorgt dafür, dass nur die Ereignisse im Messzählrohr registriert werden, bei denen nicht gleichzeitig im AK-Zählrohr ein Ladungsimpuls erzeugt wurde.

Für die Betastrahlungsmessung mit Zählrohren wurden auch Antikoinzidenzdetektoren aus Na(Tl) angewandt [87]. Dabei wurde das Zählrohr für die Messung des durch Neutronenaktivierung aus dem langlebigen Spaltprodukt ^{129}I gebildeten ^{130}I im Bohrloch des Szintillatorkristalls angeordnet.

Als man den Einfluss anderer Quellen auf den Untergrund bei der Gammaskopimetrie so weit abgeschirmt hatte, dass die Myonen den größten Beitrag zum Untergrund lieferten, hat man auch bei den Gammastrahlungsdetektoren Antikoinzidenzdetektoren, in Form von ringförmigen Szintillatorkristallen oder Plastszintillatoren innerhalb oder von Zählrohren oder Platten aus Plastszintillatoren, außerhalb der Bleiabschirmung angeordnet.

Eine γ,γ,γ -Koinzidenzmessung wurde 1973 zur Bestimmung von ^{192}Ir in neutronenaktivierten Gesteinen von Gijbels und Govaerts [88] eingesetzt.

Koinzidenzanordnungen wurden anfangs nur oberirdisch angewandt. Aber bald erkannte man, dass in Untertagelabors geringer bis zu mittleren Tiefen der Myonenfluss noch so hoch ist, dass sich dessen weitere Abschirmung mit AK-Detektoren lohnt. Dieser Myonenfluss ist deutlich erkennbar, wenn man den Energiebereich des Spektrometers auf 100 MeV und darüber hinaus ausdehnt. Die absorbierte Energie repräsentiert die Weglänge der Myonen im Detektor und beträgt für Ge 7,3 MeV/cm. Dabei findet man einen Peak als Häufigkeitsmaximum für die absorbierte Energie, die der häufigsten Weglänge entspricht. Für einen Detektor mit 100 % relativer Effektivität fanden Povinec et al. [15] diesen Peak bei 61 MeV.

In dem Messraum des MPI für Kernphysik in Heidelberg, wo die hochenergetischen Hadronen mit 15 mwe Gestein abgeschirmt werden, wurde ein HPGe-Spektrometer aufgestellt, wo außerhalb der rechteckigen Bleiabschirmung fünf großflächige Antikoinzidenzzählrohre angeordnet waren. Ein Gammastrahlungsdetektor im Institut für Kernphysik in Garching in einem mit 5 m Erdschicht bedeckten Messraum war mit fünf großflächigen Plastszintillatordetektoren umgeben.

Im Labor CAVE des IAEA (MEL) sind vier nebeneinander aufgestellte mit Blei abgeschirmte HPGe-Detektoren gemeinsam von plattenförmigen Plastszintillatoren umgeben. Beim Vergleich der Faktoren um den sich der Untergrund der vier Detektoren durch die Antikoinzidenz verringert, stellten die Autoren beträchtliche Unterschiede fest (Tab. 14).

Tabelle 14: Untergrund r_U und $r_U(\text{AK})$ ohne und mit Antikoinzidenz von Ge-Detektoren zwischen 40 und 2000 keV im Untertagemesslabor der IAEA (MEL)

Detektor, rel. Eff. [%]	100	150	170	200
Typ	Coaxial	Bohrloch	Coaxial	Bohrloch
Material für Kryostat	Cu	Cu	Al	Cu
Material für Endkappe	C	Cu	Al	Cu
Masse Ge [kg]	2,15	2,50	3,29	4,18
r_U in $\text{h}^{-1} \text{kg}^{-1}$	290	239	230	205
$r_U(\text{AK})$ in $\text{h}^{-1} \text{kg}^{-1}$	40	27	59	33
$r_U(\text{AK}) / r_U$	7,2	8,9	3,9	6,2

Die Verbesserung des Untergrundes durch eine Antikoinzidenzabschirmung ist um so deutlicher, je geringer der Beitrag der anderen Untergrundquellen, vor allem der Radioaktivität in den Materialien der Messanordnung ist. Im Fall des 170 % Detektors trägt die natürliche Radioaktivität im Aluminium der Endkappe und des Kryostaten zur Erhöhung des Untergrundes bei.

Bei Gaszählern kann man in Übereinstimmung mit Monte Carlo Simulationen eine Verringerung des Untergrundes um den Faktor 100 erreichen. Mit HPGe Detektoren ist ein so hoher Wert nicht erreichbar, da wegen der hohen Effektivität des Ge Gammaquanten kosmischer Herkunft gestreut werden können, die Antikoinzidenzabschirmung keine 100 %ige 4π -Geometrie aufweist und ein kleiner Teil der Wechselwirkungen von Myonen mit der üblichen Sammelzeit des Koinzidenzkreises von bis zu 50 μ s nicht erfasst werden.

6.8 Anti-Compton-Spektrometrie

Ein Anti-Compton-Spektrometer ist ein spezielles Antikoinzidenz–Gamma-Spektrometer, bei dem der Antikoinzidenzdetektor den Nachweisdetektor innerhalb der Bleiabschirmung umgibt. Die im Nachweisdetektor nach der Compton–Streuung nicht absorbierte und den Nachweisdetektor als Photon verlassende Energie wird im umgebenden Detektor absorbiert, und bei gleichzeitiger Registrierung eines Signals in beiden Detektoren wird im Antikoinzidenzbetrieb kein Signal im Auswertebereich des Spektrums registriert. Das führt dazu, dass bei Spektren mit mehreren Linien der durch die höherenergetischen Photonen verursachte Compton-Untergrund verringert und niederenergetische Linien besser nachgewiesen werden können.

Cooper et al. [89] umgaben einen 20 cm³ Ge(Li)-Detektor mit einem großvolumigen Plastszintillator mit einem Durchmesser von 26" und einer Dicke von 24". Dieser war wiederum von 4" Bor-Paraffin und 4" Blei umgeben. Im Antikoinzidenzbetrieb wurde die Comptonkante des 662 keV Peaks vom ¹³⁷Cs um den Faktor 10 reduziert. Obwohl die Zählraten der Photopeaks vom ⁶⁰Co im Antikoinzidenzbetrieb im Koinzidenzspektrum für die Auswertung in voller Höhe erhalten blieben, waren sie im Antikoinzidenzspektrum um den Faktor 6,5 reduziert, woraus sich eine Reduzierung der Zählraten ihrer Comptonkanten um ca. 50 ergab. Auf diese Weise waren andere Nuklide wie ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁵Zn, ¹³⁷Cs und ²¹²Pb empfindlicher zu messen. Die Autoren demonstrierten den Vorteil dieser Methode bei der Messung von Umweltproben und von neutronenaktivierten Gesteinen.

Nachdem für die Gammaspektrometrie Ge(Li)-Detektoren mit einer besseren Energieauflösung als die von NaI(Tl) Szintillatoren zur Verfügung standen, wurden mit diesen ebenfalls Antikoinzidenzspektrometer aufgebaut. Eine sehr umfangreiche Arbeit dazu stammt von Cooper und Perkins [90] aus dem Pacific Northwest Laboratory in Richland. Ein Lithium-gedrifteter Germaniumkristall von 65 cm³ hatte eine relative Effektivität von 14,3 %. Der ringförmige Antikoinzidenzdetektor aus NaI hatte einen Durchmesser von 11,5", war 15" lang und hatte ein Bohrloch von 5,5" Durchmesser. Die Enden des Bohrloches waren ebenfalls mit NaI(Tl) Detektoren verschlossen. Mit dieser Anordnung konnten sie im Antikoinzidenzbetrieb, die bei 460 keV befindliche Compton-Kante, der 662 keV-Linie des ¹³⁷Cs um den Faktor 18 reduzieren. Der Untergrund der Umgebungsstrahlung wurde im Energiebereich oberhalb 300 keV um mindestens eine Größenordnung verringert. Die Autoren haben mit dieser Einrichtung sowohl im Koinzidenz- als auch im Antikoinzidenzbetrieb Bodenproben, Luftfilter und biologische Proben, z. B. Moos, spektrometriert. Dabei waren im Koinzidenzbetrieb Nuklide mit nur einem Gammaübergang wie ⁷Be, ⁴⁰K, ⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹³⁷Cs, ¹⁴¹Ce, ¹⁴⁴Ce unterdrückt.

Die Anti-Compton-Abschirmung verringert natürlich ähnlich wie ein Detektor außerhalb der Bleiabschirmung den durch Myonen und anderen geladenen Teilchen verursachten Untergrund. Dabei werden Teilchen, die erst in der Bleiabschirmung oder gar im Antikoinzidenzdetektor gebildet werden, mit berücksichtigt. Andererseits können größere Öffnungen in der Bleiabschirmung und die Radioaktivität dieses Detektors zu einer Erhöhung des Untergrundes führen. Neben dem Comptoneffekt werden auch Linien von Kaskadenstrahlern diskriminiert, wenn einer der Übergänge im Antikoinzidenzdetektor registriert wird. Das ist beispielsweise bei ⁶⁰Co der Fall.

Weitere Anti-Compton-Spektrometer wurden von Camp et al. [91], Wahl [92], Parus et al. [93], Petry [94] und Degering [95] vorgestellt. Wenn Anti–Compton- Spektrometer vorwiegend in oberirdischen Laboratorien zum Einsatz kommen, sind sie aber auch in Untertagelaboratorien von

Interesse. Povinec et al. [15] fanden bei einer oberirdischen Messung bis zu 3 MeV eine Verringerung des Untergrundes um zwei Größenordnungen, unterirdisch war sie etwas weniger ausgeprägt.

6.9 γ , γ - und X, γ -Koinzidenz

Bei der γ , γ -Koinzidenzspektrometrie wird die Probe in die Nähe zweier Detektoren gebracht, und das Signal gelangt nur dann in den Koinzidenzbereich des Speichers, wenn in beiden Detektoren innerhalb einer eingestellten Koinzidenzzeit Energie absorbiert wird. Dabei wird auf alle Fälle ein Detektor zur Vielkanalspektrometrie genutzt. Der zweite Detektor kann ebenfalls zu einem Vielkanalanalysator führen und das erhaltene Koinzidenzspektrum als 2D Spektrum ausgewertet werden. Man kann aber auch vom zweiten Detektor nur einen Energiebereich auswählen, z. B. den gesamten Energiebereich, oder den Bereich, in dem ein interessierender Übergang erwartet wird. Im Allgemeinen sind die Winkel, unter denen die koinzidenten Strahlungen emittiert werden, von einander unabhängig. Damit ist die Koinzidenzeffektivität

$$\epsilon_{\gamma,\gamma} = \epsilon_{\gamma_1} \cdot \epsilon_{\gamma_2}$$

das Produkt aus den Effektivitäten der beiden Detektoren ϵ_{γ_1} und ϵ_{γ_2} , wobei auch das Produkt der Übergangswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden muss.

Cooper [96] stellte ein Messsystem aus zwei gegeneinander gerichteten 70 cm³ Ge(Li)-Detektoren, die im Zentrum von zwei Antikoinzidenzdetektoren aus Plastszintillatormaterial von 30" Durchmesser und 15" Dicke angeordnet sind. Frucher [97] von der University of California, San Diego, La Jolla brachte bereits 1972 Flüssigszintillator in ein 8 ml Quarzröhrchen, das mit einem Photoelektronenvervielfacher optisch verbunden war, in das Bohrloch eines 3" NaI(Tl)-Kristalls. Bis zu 80 mg MnCl₂ konnten dabei in einem Xylen-Naphthalen-Szintillator-Gemisch gelöst werden, wobei die Effektivität 87 % im Vergleich zu einer nahezu masselosen Menge an MnCl₂ betrug. Die Effektivität des NaI(Tl)-Detektors betrug für die 835 keV Linie 11 % und der LSC hatte für die ausgewerteten Cr- Auger - Elektronen eine Effektivität von 55 %. In einer 6" dicken Eisenabschirmung betrug der Untergrund unter dem 835 keV Peak des ⁵⁴Mn im Spektrum einer aus einer Mondprobe von 15 g abgetrennten Mn-Fraktion von 30 mg 2 cpm bei 12 % Effektivität ohne Koinzidenz und 0,025 cpm bei 6,3 % Effektivität mit Koinzidenz. Bei der Apollo 12 Mission wurden von der Mondgesteinsprobe Nr. 12002 Proben aus unterschiedlichen Tiefen genommen und aus der Verringerung der spezifischen Aktivität mit der Tiefe auf die Anteile der durch galaktische und solare kosmischen Strahlung erzeugten Radioaktivität geschlossen.

Ein besonderer Fall der Koinzidenzspektrometrie liegt vor, wenn die Emissionswinkel der beiden zu registrierenden Strahlen korreliert sind. Das ist bei der Annihilation von Positronen der Fall, wo beide 511 keV - Photonen in entgegengesetzter Richtung emittiert werden. Wir hatten von einem unter der Probe befindlichen Ge-Detektor von ca. 30 % das vollständige Spektrum aufgenommen und von dem über der Probe angeordneten 4" · 3" NaI(Tl) Detektor nur den Peakbereich bei 511 keV zum Koinzidenzeingang geführt. Dabei gehen in die obige Gleichung für $\epsilon(\gamma_2)$ wegen der 180° Winkelkorrelation der Annihilationslinien für den NaI(Tl) Detektor 65 % Effektivität ein. Bei Erfassung der gesamten Energie bis 511 KeV in diesem Detektor hat man für $\epsilon(\gamma_2)$ sogar nahezu 100 % Effektivität. Im Speicher wurde neben dem Koinzidenzspektrum auch das Nicht-Koinzidenzspektrum registriert, mit dessen Hilfe man störende Aktivitäten z. B. von ²⁴Na korrigieren kann.

Im Nicht-Koinzidenzspektrum von ²⁴Na findet man, wie bei allen Nukliden mit hohen Gammastrahlungsenergien, eine Linie bei 511 KeV, die der Annihilation eines Positrons mit einem Elektron zuzuordnen ist. Im Koinzidenzspektrum fanden wir mit der beschriebenen Anordnung den 511 KeV Peak nur mit extrem geringer Effektivität, weil die Annihilation des Positronenstrahlers der Probe in deren unmittelbarer Nähe zwischen beiden Detektoren stattfindet, aber die aus hochenergetischen Gammalinien entstehenden Elektron-Positron-Paare in einem

weiteren Umkreis, vorwiegend in der Abschirmung gebildet werden. Wenn die dabei entstandenen Positronen annihilieren, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die beiden 511 keV Photonen auf beide Detektoren verteilen, sehr gering. Aus dem gleichen Grunde wird auch eine 511 keV Linie, die ihre Ursache in der Höhenstrahlung hat, unterdrückt. Das Verfahren hat sich bei der aktivierungsanalytischen Bestimmung von Cu in Halbleitersilicium bewährt, wo ^{24}Na , das mit schnellen Neutronen aus Si nach einer Reaktion $^{28}\text{Si}(n,\alpha p)^{24}\text{Na}$ gebildet wird, die Hauptaktivität ausmacht. Die intensivste Linie des ^{24}Na im Koinzidenzspektrum ist die Doppel-Escape-Linie bei 1732 keV, mit der man gegebenenfalls die Zählrate der 511 Linie korrigieren kann [98].

Bei der X,γ – Koinzidenz verwendet man als Koinzidenzdetektor zur Registrierung der Röntgenstrahlung für niedrige Energien einen organischen Szintillator und für höhere Energien einen flachen NaI(Tl)- oder einen Si-Detektor. Bei niedrigen Röntgenstrahlungsenergien ist die Fluoreszenzausbeute sehr gering und die Energie wird überwiegend von Augerelektronen übertragen.

Niese und Kleeberg [99] hatten für die Messung der X,γ - Koinzidenz für ^{85}Sr einen flachen NaI(Tl)-Kristall mit einem 30 % Ge-Detektor kombiniert. Wegen der langen Lebensdauer des angeregten Zustandes des aus ^{85}Sr entstehenden ^{85}Rb wurde für die Koinzidenz eine Verzögerungszeit von 100 μs und eine Sammelzeit von 2 ms eingestellt.

Der Untergrund wird durch Anwendung von Koinzidenzmethoden in unterirdischen Laboratorien weiter verringert. In einer Kammer unter 100 mwe Sandstein in der Nähe des Mt. Nokokiriyama, 100 km südlich von Tokio, installierten Tanaka et al. [7] eine Koinzidenzanlage aus zwei NaI(Tl) Detektoren in einer 20 cm dicken Eisenabschirmung auf die ein plastischer Szintillator als Antikoinzidenzdetektor angebracht wurde.

6.10 Beta–Gamma-Koinzidenz

Ursprünglich war die Beta-Gamma-Koinzidenz-Messung zur Untersuchung der Zerfallsschemata und zur Bestimmung der absoluten Aktivität von Radionukliden entwickelt und genutzt worden. Mit Beta-Gamma-Koinzidenz-Verfahren, kann man aber auch den Untergrund bei der Gammaskopimetrie um mehrere Größenordnungen verringern. Dabei werden die Proben zwischen einem oder mehreren Betadetektoren und einem Gammadetektor angeordnet und die Ereignisse dann berücksichtigt, wenn gleichzeitig mit dem Signal im Gammadetektor auch ein Signal im dem der Probe zugeordneten Betadetektor registriert wird. Wenn die Proben sich im flüssigen Szintillator befinden oder zwischen zwei flachen festen Detektoren angeordnet werden, hat man kaum Verluste in der Betaeffektivität und kann die Reduzierung des Untergrundes vollständig zur Verbesserung der Nachweisgrenze ausnutzen. Borg et al. [100] wandten die Beta-Gamma-Koinzidenzmessung als erste in der Aktivierungsanalyse an. Sie brachten Absorberfolien zwischen die Probe und das Betastrahlungszählrohr, um ^{56}Mn ($E_\beta = 2.8$ MeV) in Gegenwart von ^{24}Na ($E_\beta = 1,5$ MeV) selektiver messen zu können. Eine Aluminiumfolie von 200 mg/cm² verringert die Zählausbeute von ^{56}Mn um den Faktor 2, die des ^{24}Na um den Faktor 8.

Roedel [101] nutzte die Beta-Gamma–Koinzidenz, um den Untergrund bei der Messung von kosmisch induzierten Aktivitäten zu verringern. In Rossendorf wurde die Beta-Gamma-Koinzidenz zur Verbesserung der Nachweisgrenze für die empfindliche aktivierungsanalytische Bestimmung von Verunreinigungen in Reinstsilicium eingesetzt [102]. Dazu wurde der Probenhalter mit dem Probenschälchen zwischen einem 32 mm x 2 mm Plastdetektor und einem 4“ x 3“ NaI(Tl)-Detektor durch einen Schlitz einer zylindrischen Bleiabschirmung von 320 mm Außen– und 200 mm Innendurchmesser eingeführt. Die Abstände der Probe zum Plastdetektor und zum NaI(Tl)-Detektor betragen 11 mm bzw. 23 mm. Der Untergrund bei einer γ -Strahlungsenergie von 1 MeV war bei der Koinzidenzmethode um den Faktor 500 reduziert. Damit wurde der Verlust an Effektivität, der je nach Betastrahlungsenergie einen Faktor zwischen 3 und 7 ausmachte, mehr als kompensiert. Eine Verbesserung der Effektivität konnte durch Verwendung von Platin statt

Aluminium für die Probenschälchen erreicht werden, da die Rückstreuung mit der Kernladungszahl des Materials für die Probenunterlage wächst.

Um für die Proben eine längere Messzeit zur Verfügung zu haben, wurden als nächstes sieben Plastdetektoren von 29 mm x 2 mm nebeneinander angeordnet (Abb. 6) und die Koinzidenzen der Signale des Gammadetektors mit denen der einzelnen Betadetektoren in getrennte Kanalbereiche gespeichert, womit für jede einzelne Messprobe die siebenfache Messzeit zur Verfügung stand. Sofern die Unterschiede in den Aktivitäten der einzelnen Proben zwei Größenordnungen nicht übersteigen, ist das Übersprechen zwischen den einzelnen Messpositionen zu vernachlässigen [103].

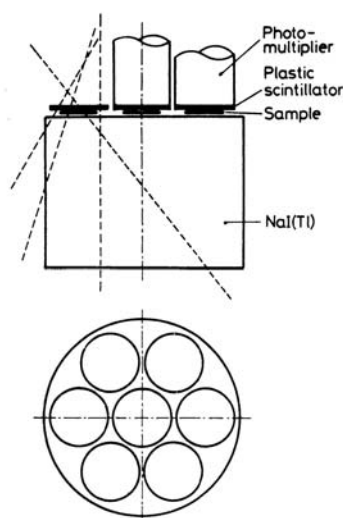


Abbildung 6: Anordnung von sieben Plastdetektoren über einem
4" x 3" NaI(Tl)-Detektor

Da in den Messpositionen am Rande neben einer leicht reduzierten Gammastrahlungseffektivität auch ein etwas erhöhter Koinzidenzuntergrund beobachtet und mit dem bei Randpositionen häufigeren Schneiden der Myonenwege an den Kanten des NaI(Tl)-Detektors erklärt wurde, was auch durch die Myonenpeaks bei 45 MeV in den Untergrundspektren bis 80 MeV plausibel ist [104], entstand der Wunsch, die gleichen Messungen bei einem reduzierten Myonenfluss untertage auszuführen. Das veranlasste uns erst zu provisorischen untertägigen Messungen und anschließend zum Aufbau des leistungsfähigen Untertagemesslabors „Felsenkeller“.

Im Felsenkeller wurde der Untergrund bei 45 MeV um den Faktor 50 verringert, was der Verringerung des Myonenflusses bei einer Gesteinsbedeckung von 125 mwe entspricht (Abb. 7). Bis 2 MeV erfolgte lediglich eine Verringerung um den Faktor 5. Das zeigt, dass in diesem Energiebereich die natürliche Radioaktivität der Detektormaterialien auch im Untertagemesslabor gemessenem Untergrund bei der β, γ – Koinzidenzspektrometrie dominierte [105].

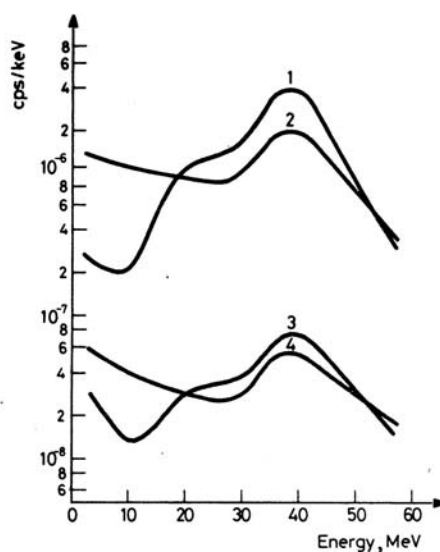


Abbildung 7: $\beta\gamma$ -Koinzidenzspektren des NaI(Tl)-Detektors mit Plastdetektoren in der Mitte (1, 3), am Rande (2, 4), oberirdisch (1, 2) und 125 mwe untertage (3, 4)

Die β,γ -Koinzidenzspektrometrie wurde von uns zuerst entwickelt, um die Nachweisgrenze für ^{59}Fe , das Aktivierungsprodukt des häufigsten Schwermetalls, zu verbessern und fand bald auch bei der Messung weiterer Nuklide Anwendung. Ein Beispiel dafür ist die Messung des aus der Bestrahlung von Silizium mit 14 MeV Neutronen aus Mg und Al über (n,p)- und (n, α)-Reaktionen gebildete ^{24}Na , die Maximalwerte für Mg und Al ergaben, welche eine Größenordnung niedriger waren, als die Werte, die aus der bei der Bestrahlung des Siliciums mit Reaktorneutronen in einer Cd-Hülle erhaltenen Aktivität an ^{24}Na berechnet wurden. Damit konnte bewiesen werden, dass das bei der Bestrahlung von Silicium mit Reaktorneutronen gebildete ^{24}Na nicht aus Mg oder Al sondern über die Reaktion ^{28}Si (n, α p) entstanden ist.

Yamogoshi und Nogami [8] brachten zwei halbzyylinderförmige Geiger-Müller-Zählrohre in das Bohrloch eines NaI(Tl)-Detektors von 6,5" Durchmesser und 4" Höhe und einem Bohrloch von 3,5" Durchmesser und 2,5" Höhe. Dieser war an einen SEV aus Quarzglas angeschlossen und von einem Tank mit flüssigen Szintillator als Antikoinzidenzabschirmung umgeben. Die Detektoren wurden von einer rechteckigen Stahlbox mit den Innenmaßen 110 cm (Höhe) · 140 cm · 110 cm abgeschirmt. Die Wände aus altem Stahl waren 25 cm dick. Das β,γ - Koinzidenzspektrometer wurde in eine Messzelle des Yoggihama-Tunnels bei einer Gesteinsbedeckung von 80 mwe installiert. Mit dem Gerät wurden vor allem, die durch kosmische Strahlung in Meteoriten gebildeten Nuklide ^{22}Na , ^{26}Al und ^{60}Co gemessen.

Die β,γ -Koinzidenzspektrometrie wurde weiter entwickelt, indem für die Gammaspectrometrie und die Betastrahlungsmessung Ge- bzw. Si-Detektoren eingesetzt wurden. Die besten Ergebnisse erhält man bei der Verwendung der LSC für den Nachweis der Betastrahlung und der Konversionselektronen [106, 107]. Goldbrunner hat die Koinzidenz für die Messung von ^{233}Pa und ^{239}Np eingesetzt, die bei der Neutronenaktivierung von Th und U entstehen. Dafür hat er einen 150 % HPGe-Detektor mit einem Flüssigszintillationsdetektor kombiniert. ^{233}Pa und ^{239}Np wurden vorher aus einer salpetersauren Lösung in Tributylphosphat extrahiert und der Extrakt vor der Messung mit der Szintillatorlösung UltimaGold gemischt. Der Vorteil der Verwendung der LSC für die Messung der Betastrahlung besteht in der höheren Effektivität, der Möglichkeit der gleichzeitigen Betaspektrometrie, und der relativ bequemen Messung von Konversionselektronen. Die Autoren führten ihre Messung in dem untertägigen Labor in München – Garching bei einer Bedeckung von ca. 15 mwe durch.

Ein Blick auf die Zerfallsschemata der radioaktiven Kerne zeigt, dass die beim Betazerfall gebildeten angeregten Zustände sehr unterschiedliche Lebensdauern haben, bevor sie unter Gammastrahlungsemission in den Grundzustand übergehen. Hier lassen sich Zustände mit längeren Lebensdauern sowohl unterdrücken als auch selektiv messen, wie es Goldbrunner [107] am Beispiel von ^{239}Np zeigte.

Im Untertagemesslabor MEL wurde ein Anti-Compton-Spektrometer aufgebaut, mit dem auch β, γ - und β, γ, γ -Koinzidenzspektrometrie betrieben werden kann. Ein U-Typ HPGe – Detektor von 100 % relativer Effektivität ist von einem zylinderförmigen NaI(Tl)-Detektor von 30 cm Durchmesser und 40 cm Länge umgeben und oben ist die Öffnung des Zylinders mit einem NaI(Tl)-Kristall verschlossen. Ein zweiseitiger Si-Betastrahlungsdetektor befindet sich zwischen dem oberen NaI(Tl)-Kristall und dem Ge-Detektor. [15].

Dewaraja et al. [108] stellten eine Messeinrichtung mit ortsempfindlichen Betadetektor vor, der aus einem 1mm dicken Plastdetektor mit ortsempfindlichen Photoelektronenvervielfacher (PSPMT = position sensitive photomultiplier tube) einer Fläche von $6 \times 5,5 \text{ cm}^2$ und einem Ge-Detektor von 4,4 cm Durchmesser besteht, mit der die Nuklidverteilung auf einer Fläche oder in verschiedenen Proben bestimmt werden konnte.

McIntyre et al. [109] aus dem PNNL stellten neuartiger Materialien für Phoswich-Detektoren, bei denen ein Beta- und ein Gammastrahlungsdetektor vor dem gleichen Sekundärelektronenvervielfacher angeordnet wird, vor. Dazu wurde für die Gammaskopimetrie neben Bismutgermanat (BGO) auch Yttriumaluminiumperowskit (YAP) verwendet.

6.11 Anpassung der Verzögerungs- und der Koinzidenzsammelzeit

Für spezielle Nuklide ist es vorteilhaft, zwischen den Koinzidenzsignalen eine Verzögerungszeit einzustellen und die Sammelzeit auszudehnen. Die Ausdehnung der Sammelzeit wird im Wesentlichen durch die Zählrate der Zufallskoinzidenzen begrenzt. Da diese aber mit der Untergrundzählrate abnimmt, kann man in einem Untertagelabor die Sammelzeit wesentlich größer als in oberirdischen Labors wählen. Es ist auch möglich, die Ereignisse einzeln mit den Informationen für Impulshöhe, Detektor und Zeitpunkt zu speichern. Bei einer solchen Einzelereignisanalyse, kann man dann auch die zeitlichen Grenzen nach der Messung frei wählen.

Eine interessante Variante der Zeitkorrelation von Ereignissen hat Buheitel [110] vorgestellt. Durch Registrierung von verzögerten Koinzidenzen der Impulse aus dem LSC konnte er nicht nur kurzlebige Mutter-Tochter-Paare am Beispiel der Tochternuklide des Radons getrennt erfassen, sondern gleichzeitig eine drastische Verringerung des Untergrundes erreichen.

6.12 Pulsformdiskriminierung

Die Pulsformdiskriminierung, die in den meisten kommerziellen LSC verwendet wird, kann auch für die Gammaskopimetrie von Proben extrem geringer Radioaktivität eingesetzt werden [111]. Das Verfahren wird im Einzelnen von Aalseth et al. [112] beschrieben. Sie demonstrierten, wie sich unterschiedliche Wege der Ladungsträger im Germaniumkristall in verschiedenen Pulsformen manifestieren.

7 Messungen von Proben geringer Radioaktivität

In den unterirdischen Laboratorien mittlerer Tiefe werden eine Vielzahl verschiedenartiger Proben geringer Radioaktivität für unterschiedlichste Aufgaben gemessen. Auch in einigen sehr tiefen Laboratorien z. B. LSM (Frejus Tunnel), UDO (Asse II), werden Proben für verschiedene Anwendungen gemessen, vorwiegend für die Auswahl von Materialien geringer Aktivität, die ihrerseits wieder in Messgeräten verwendet werden sollen.

7.1 Datierung und Atmosphärenphysik

Es gibt viele Anwendungen der ^{14}C -Datierung und von Radionukliden als Tracer in der Atmosphäre. Die ersten Untertagemessungen von gasförmigen Proben wurden in Bern durchgeführt [12], wo auch Argonisotope in der Atmosphäre und Hydrosphäre untersucht wurden. Flüssigszintillationsspektrometer wurden in verschiedenen untertägigen Laboratorien installiert (z. B. [53, 113]). Das Untertagelabor in Tucson, Arizona, ist speziell für Datierungen eingerichtet worden [50]. In dem Ogoya Untertagelabor wurde das Verhältnis von $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ in Stalagmiten gemessen, um ihre Wachstumsgeschwindigkeit zu bestimmen [57]. Die Gammaskpektrometrie wurde zur Messung von kosmogenen und radiogenen Nukliden in der Atmosphäre und im Regenwasser eingesetzt [114].

7.2 Untersuchung von Meteoriten und Mondproben

In einigen Laboratorien wurde die Radioaktivität von Meteoriten [8, 101] und Mondproben [97] gemessen, die durch das Bombardement mit galaktischer oder stellarer kosmischer Strahlung gebildet wird. Auch nach der Entwicklung der Beschleunigermassenspektrometrie, die jetzt erfolgreich für die Bestimmung langlebiger Nuklide angewendet wird, müssen kurzlebige Nuklide nach wie vor mit radiometrischen Methoden bestimmt werden. Das ist der Fall, wenn Meteoriten beim Fall beobachtet und gefunden werden, bevor die kurzlebigen Nuklide zerfallen sind. Das war bei den Meteoriten Hohenlangenbeck [115], Trebbin [116] und Kobe [117] der Fall. Für die langlebigen Nuklide wie ^{26}Al werden radiometrische Messungen für große Proben verwendet, um einen Mittelwert zu erhalten [114]. Die Radioaktivität des am 7. Januar 1996 gefallenen Tsukuba - Meteorit wurde am 20. Januar im Ogoya Untertagelabor gemessen. Es konnten ^{52}Mn , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{7}Be , ^{58}Co , ^{56}Co , ^{46}Sc , ^{57}Co , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{44}Ti und ^{26}Al und die natürlichen radioaktiven Elemente (0,079% K, 8,9 ppb Th und 8,5 ppb U) gemessen werden [57].

7.3 Neutronenaktivierungsanalyse

Koinzidenzmethoden wurden, wie schon beschrieben, seit den siebziger Jahren in verschiedenen Labors angewandt, um die Selektivität der Gammaskpektrometrie oder die Nachweisgrenzen für die Bestimmung zu verbessern.

Die ersten untertägigen Messungen von Proben, die im Reaktor für die Neutronenaktivierungsanalyse bestrahlt wurden, erfolgten im Untertagemesslabor „Felsenkeller“ in Dresden [119]. Neben der Analyse von Spurenelementen in Halbleitermaterialien [120] wurden auch die aktivierten und danach chemisch abgetrennten Spurenelemente in ultrabasischen Gesteinen im Untertagelabor „Felsenkeller“ gemessen [121]. Lindstrom et al. [39] haben das Untertagelabor der NASA genutzt, um besonders kleine neutronenaktivierte Proben zu messen. In Materialien, die bei der Herstellung von Bauelementen auf der Basis von Silicium eingesetzt wurden, bestimmten auch Smith et al. [122] aktivierungsanalytisch Verunreinigungen. Die Messungen dazu führten sie in der Low Background Facility des Lawrence Berkeley National Laboratory im Oroville in einem Turbinenhaus am Staudamm in 180 m Tiefe durch.

7.4 Radioaktivität in der Umgebung

Die größte Zahl an Proben mit geringer Radioaktivität stammen aus Untersuchungen und Kontrollen der Umgebungsradioaktivität. Sie waren auch ein Grund für die Entwicklung und Verbesserung von Koinzidenzmethoden [90]. Solche Analysen dienen nicht nur dem Strahlenschutz sondern auch der Untersuchung von Transportprozessen in der Natur. In einer großen Anzahl Proben von Bergwerkswässern, Flusswasser, Sedimenten und Pflanzen aus der Umgebung stillgelegter Uranbergwerke wurden im Untertagemesslabor „Felsenkeller“ Radionuklide der Uranzerfallsreihe bestimmt [55]. Transferfaktoren der natürlichen Radionuklide ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb und ^{227}Ac und ^{40}K vom Boden in die Wurzel, den Stamm und die Frucht von Tomaten wurden von Köhler et al. [123] bestimmt und dabei auf die Trockenmassen bezogene

Werte für die o. g. Nuklide, von Kalium abgesehen, um 7 %, 3 % und 2 % erhalten. Kalium wurde auf dem Wege vom Boden über Wurzel und Stamm zur Frucht nicht abgereichert.

7.5 Inkorporationsmessungen

Im Untertagemesslabor „Felsenkeller“ ist auch ein Messplatz für Ganz- und Teilkörpermessung installiert.

7.6 Radioaktivität in Materialien für die Anwendung in der Technik

Köhler et al. [124, 125] haben in einem internationalen Vergleich des CELLAR–Netzwerks in kommerziellen Stahlprüfkörpern gammaspektrometrisch ^{60}Co bestimmt und dabei Werte in der Größenordnung von 0,01 Bq/kg gefunden.

7.7 Untersuchungen für die Meeresforschung

Die Konzentrationen von Radionukliden im Meerwasser sind so gering, dass man entweder große Probenvolumen aufkonzentrieren oder hochempfindliche Messverfahren anwenden muss. Die Geschwindigkeit des Sedimenttransportes auf den Meeresboden und das Gleichgewicht zwischen Radium im Sediment und Meerwasser bestimmten Reyss et al. [126] mit Hilfe von ^{137}Cs , ^{226}Ra und ^{228}Ra , wobei die Messungen im Untertagelabor im Frejustunnel ausgeführt wurden. Die Bestimmung von ^{137}Cs mit einem im Untertagemesslabor installiertem Gammaskpektrometer erlaubt es, die Probenmenge von Meerwasser um den Faktor 10 zu reduzieren [52, 53, 127, 128].

7.8 Kontrolle von Kernexplosionen, Unfällen und anderen nuklearen Aktivitäten

60 Jahre nachdem die von den USA abgeworfene Atombombe in Hiroshima große Zerstörungen angerichtet hat, wurde in verschiedenen Abständen vom Epizentrum ^{152}Eu bestimmt, um nachträglich die durch die Kernexplosion verursachte Neutronendosis berechnen zu können [57]. Dabei war es sogar noch möglich, das kurzlebiger ^{60}Co in Stahlproben zu bestimmen, obwohl die Aktivität inzwischen um drei Größenordnungen abgeklungen ist [129].

Nach einem Unfall in einer japanischen Brennstofffabrik wurde die Neutronendosis an verschiedenen Orten der Umgebung bestimmt, indem Proben aus Gold und später auch von anderen Metallen gemessen wurden. Im Untertagelabor Ogoya wurden kurz nach dem Ereignis Aerosolmessungen durchgeführt und ^{134}Cs und ^{137}Cs bestimmt [57]. Von Hult et al. [130] wurden in Haushaltgegenständen aus Stahl im Untertagelabor HADES in Mol darin noch ^{51}Cr und ^{60}Co bestimmt.

7.9 Radioaktivität in Abfällen und in Materialien aus dem Betrieb, der Revision und der Stilllegung von Kernkraftwerken.

Wenn auch die Materialien aus dem ersten Kreislauf eines KKWs und den damit verbundenen Einrichtungen meist so radioaktiv sind, dass sie spezielle Schutzvorrichtungen erfordern, nur kleine Materialproben für eine Analyse der Nuklide entnommen werden können und vor der Analyse noch verdünnt werden müssen, so gibt es doch im nächsten Umkreis schon Materialien bei denen man sich nicht nur für die mit einem Strahlenschutzmessgerät bestimmbare Dosis, sondern auch für geringe Aktivitäten einzelner Radionuklide interessiert. Auch wenn das Labor für Arbeiten mit höheren Aktivitäten nicht geeignet ist, und die Proben deshalb vor der Trennung verdünnt werden müssen, ist es sinnvoll, die abgetrennten Nuklide untertage zu messen [131].

7.10 Materialien für Detektoren für Low-level-Messungen

Mit der Verringerung des Untergrundes werden auch die Anforderungen an die für das Messsystem verwendeten Materialien immer höher. Das geht soweit, dass Germanium und Kupfer nicht mehr oberirdisch gereinigt, erschmolzen und verarbeitet werden, weil in ihnen sonst die kosmische Strahlung langlebige Radionuklide erzeugt. Auf diesem Gebiet hat sich die Gruppe um Brodzinski vom Pacific Northwest Laboratory sehr verdient gemacht. Es werden auch umfangreiche Untersuchungen von Materialien für das Messsystem BOREXINO insbesondere zur Szintillatorflüssigkeit durchgeführt [106, 107]. Entsprechende Arbeiten waren vorher für die Zählrohrkomponenten zum GALLEX Experiment durchgeführt, bei dem das durch Neutrinoreaktion mit dem Gallium gebildete Germanium als Germaniumchlorid aus dem Galliumchlorid ausgetrieben und in einem Zählrohr gemessen wurde. Über die entsprechenden Maßnahmen zur Verringerung des Untergrundes hat vor allem Heusser [132] berichtet.

7.11 Der durch das Gerät selbst verursachte Untergrund

Unterirdische Laboratorien sind sehr nützlich, um den von den Messgeräten selbst verursachten Untergrund („intrinsic background“) zu bestimmen. Wenn im unterirdischen Laboratorium der Untergrund des Gerätes nicht in gleicher Weise wie die Intensität der äußeren Strahlung abnimmt, können wir den Beitrag des Gerätes zum Untergrund berechnen. Das unterirdische Laboratorium der PTB im Bergwerk Asse II war insbesondere für die Kalibrierung von Strahlungsdosimetern eingerichtet [133]. Der „intrinsic background“ eines Plutoniummonitors der Fa. Berthold wurde im Untertagemesslabor Felsenkeller bestimmt [83].

Während der Eigenbeitrag von Germaniumdetektoren zum Nulleffekt im Ergebnis der ständig verbesserten Materialauswahl relativ gering ist, zeigen andere kommerzielle Geräte, bei denen der Detektor und die Elektronik nicht weit genug voneinander getrennt sind, oft einen hohen Eigenbeitrag zum Untergrund. So wird der Untergrund des besten kommerziell erhältlichen LSC „Quantulus“ in den unterirdischen Laboratorien „Felsenkeller“ in Dresden, in Tucson (Arizona) und in Gran Sasso nur um den Faktor 2 verringert. Das zeigt, dass schon bei oberirdischer Aufstellung die Hälfte des Untergrundes vom Gerät selbst stammt. Eine ähnliche Situation kann bei kommerziell erhältlichen automatischen Low-Level-Proportionalzählern beobachtet werden.

8 Schlussfolgerungen

Beim Neu- oder Umbau von oberirdischen Messlaboratorien ist besonders auf die Radioaktivität der Baumaterialien zu achten. Die relativ hohe natürliche Radioaktivität der durchschnittlich verwendeten Baumaterialien zwingt dabei zu einer dickeren Bleiabschirmung der Detektoren als sie bei Baumaterial mit geringerer Radioaktivität nötig wäre. Das hat zur Folge, dass durch die kosmische Strahlung in der Abschirmung selbst mehr Neutronen erzeugt werden, die ihrerseits wieder den Untergrund erhöhen. Als Materialien mit geringer Radioaktivität bieten sich unter anderem ultrabasische Gesteine, wie Dunit und Serpentin, Marmor sowie Stahl und Plaste an, die an Stelle von normalen Beton oder Ziegel verwendet werden. Bei der Einrichtung von oberirdischen Labors zur Messung geringer Radioaktivität ist es sinnvoll, mit einem Untertagelabor zusammenzuarbeiten und dort die Radioaktivität der zu verwendenden Materialien und Geräte zu messen. Wenn einerseits die kosmische Strahlung stört, sich andererseits aber die Einrichtung eines Untertagelabors nicht lohnt, ist eine außerhalb der Bleiabschirmung angebrachte aktive Abschirmung mit Plastszintillatoren von Nutzen.

Für die Messung von Proben geringer Radioaktivität ist die Einrichtung eines leicht zugänglichen unterirdischen Labors mittlerer Tiefe sinnvoll. Die Anforderungen sind dabei sowohl von den örtlichen Gegebenheiten als auch von den geplanten Messaufgaben abhängig. Eine zu hohe Radioaktivität des Umgebungsgesteins kann durch Einbauten aus Materialien geringer Radioaktivität abgeschirmt werden. Für eine solche Abschirmung der Umgebungsstrahlung aus dem Gestein ist der Aufbau einer Schichtstruktur sinnvoll, bei der die Anforderung an besonders

geringe Radioaktivität des Materials von außen nach innen zunimmt. Erscheint wegen einer zu geringen Tiefe der Fluss an Myonen noch zu hoch, ist auch untertage der zusätzliche Aufbau einer aktiven Abschirmung aus plastischen Szintillatoren notwendig.

Mit radiochemischen Trennungen lässt sich der störende Untergrund von weiteren Radionukliden in der Probe am wirksamsten beseitigen. Deshalb sollte ein entsprechendes radiochemisches Labor unbedingt verfügbar sein. Für chemisch abgetrennte Nuklidfraktionen bietet sich dann an, wegen der meist geringen Probenmasse, die Vorzüge der β,γ - und der X,γ - Koinzidenz zu nutzen. Oft reicht es aus, wenn der Untergrund der störenden Nuklide um eine Größenordnung verringert wird. Wenn in einem solchen Fall ein Anti-Compton-Spektrometer eingesetzt wird, hat man den Vorteil, dass mehrere Nuklide gleichzeitig bestimmt werden können. Die vielfältigen Möglichkeiten der Koinzidenzmessstechnik sollten besonders in Untertagelaboratorien genutzt werden, da dort ihre Vorzüge wegen der geringeren Zählraten an Zufallskoinzidenzen besser als in oberirdischen Laboratorien genutzt werden können.

Für die Messung sehr geringer Radioaktivitäten kann dabei der Aufbau spezieller Messanordnungen notwendig werden, da die kommerziell erhältlichen unter einem hohen Kostendruck gefertigten Instrumente, sich durch hohe Stabilität und einfache Bedienung auszeichnen müssen und deshalb nicht allzu viele spezielle Möglichkeiten zulassen.

Wenn die Anzahl der Proben, deren Aktivität für die Messung im eigenen Labor zu gering oder deren Nuklidzusammensetzung zu kompliziert ist, kann man auf entsprechend vorhandene Labors zurückgreifen. Um eine entsprechende Kooperation oder Beauftragung gut planen zu können, sind einige Kenntnisse über die Möglichkeiten in Untertagelabors durchaus nützlich. Dafür sollte diese Schrift hilfreich sein.

9 Literatur

- [1] Niese, S., 2008, Underground laboratories for low-level radioactive measurements, in Povinec, P.P. Analysis of Environmental Radionuclides, Elsevier, Amsterdam, 209 - 240
- [2] Elster, J. Geitel, F., 1898. Versuche an Becquerelstrahlen, Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge 66, 735-740.
- [3] Hess, V. M., 1912, Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Ballonflügen, Physik. Zeitschrift, 13, 1084 – 1091
- [4] Smekal, F. G., 1968. Österreichs Nobelpreisträger, Frick, Wien
- [5] Perkins, R.W., 1961, High sensitivity gamma-ray spectrometry, Proc. International Conf. Modern Trends in Activation Analysis, A & M College of Texas, 50 – 58
- [6] Glower, R.N., Watt, D.E., 1957. Phil. Mag. 2, 49
- [7] Tanaka, S., Sakamoto, K., Takagi, J., 1967. An extremely low-level gamma ray spectrometer, Nucl. Instr. Meth., 56, 319 – 324
- [8] Yamakoshi, K., Nagamo, K., 1976, An extremely low-background beta-gamma coincidence spectrometer, Nucl. Instr. Meth., 134, 519 – 524
- [9] Kaye, J.H., Brauer, F.P., Conally, R.E., Rieck, H.G., 1972. Background Reductions obtained with Gamma detectors by use of massive cosmic-ray shielding, Nucl. Instr. Meth., 100. 333-348

- [10] Povinec, P.P., 1994, underground low level counting, in Garcio-Leon, M., Garcia-Tenorio, R. (eds.): Proc. Third Intern. summer school, Low-level measurements of radioactivity in the environment, Huelva, Spain 1993, World Scientific, Singapore
- [11] Oeschger, H., Loosli, H. H., 1977. New developments in sampling and low level counting of natural radioactivity, Proc. of the Intern. Conf. on Low Radioactivity Measurements and Applications, The High Tatras 1975, Bratislava, 13 – 22
- [12] Oeschger, H., Beer, J. Loosli, H.H., Schotterer, U., 1981. Low level counting systems in deep underground laboratories; Methods of Low-Level Counting and Spectrometry, IAEA-SM 252/13, 459 - 474, Vienna
- [13] Helbig, W. Niese, S., Birnstein, D., 1984, Untergrundlaboratorium für die Messung geringer Radioaktivität, Isotopenpraxis, 20, 60 – 64
- [14] Niese, S., Helbig, W., Kleeberg, H. 1989. Multi-sample beta-gamma coincidence spectrometry in an underground laboratory, J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles 129, 387-391
- [15] Povinec, P.P., Vojtyla, P., Comanducci, J. - F., 2008, Monte Carlo simulation of background characteristics of gamma-ray spectrometers – a comparison with experiment, In: Povinec (Ed.) Analysis of Environmental Radionuclides, Elsevier, Amsterdam u.a., 163 – 208
- [16] Gowindarju, K., 1984, Compilation of Working Values and Sample Description for 170 International Reference Samples of Mainly Silicate Rocks and Minerals, Geostandards Newsletter, VIII Special Issue.
- [17] Hubert, Ph., Dassie, D., Larrieu, P., Leccia, F., Menrath, P., Chevallier, A., Henck, R., Gutknecht, D., Morales, R., Nunez-Lagoz, R., Morales, J. Villar, J.A., 1986, α -rays induces background in ultra low level counting with Ge-spectrometers, Nucl. Instr. Meth., A252, 87 – 90
- [18] Brodzinski R.L. et al., 1985, Nucl. Inst. Meth. A239, 207
- [19] Brodzinski, R.L., Miley, M.S., Reeves, J.H., Avignone III T. 1990. Further reduction of radioactive backgrounds in ultra sensitive germanium spectrometers. Nucl. Instr. Meth. A292, 337-342,
- [20] Rindi, A. et al. 1989, Nucl. Instr. Meth. Phys Res. A267, 529.
- [21] Hashemi-Nezhad, S.R., Peak, L.S., 1995., Nucl. Inst. Meth. A, 357, 524-534
- [22] Schopper, E., Lohrmann, E., Mauck, G., 1967, in: Nukleonen in der Atmosphäre in Flüge, S., Handbuch der Physik, Bd. 46/2, K. Sitte, Kosmische Strahlung, S. 372- 550
- [23] Theodorsson, P., 1992. Measurement of Week Radioactivity, Singapore
- [24] Heusser, G. 1995. Low radioactivity background techniques, Anna. Rev. Nucl. Par. Sci. 45, 543 – 590
- [25] Ziegler, J. 1998. Terrestrial cosmic ray intensities, IBM Journal of Research and Development, 42, No. 1

- [26] NCRP, 1987. Report of the National Council of Radiation Protection and Measurement Nr 94, Bethesda, MD
- [27] Sitte, K. (1961), Penetrating Showers, in Flügge, S., Handbuch der Physik; Bd.46/1 Kosmische Strahlung I, Berlin, 147 – 214
- [28] Webber, W. R., The Spectrum and Charge Composition, in Flügge, S., Handbuch der Physik Bd.46/2, Kosmische Strahlung, Berlin 1967, S. 181 –194, Hier: S. 211
- [29] Fowler, G.N., Wolfendale, A.W.,1961a, The Hard Component of μ -Mesons in the Atmosphere, in Flügge, S. (Hsg.) Handbuch der Physik, Berlin, 1961, S. 295
- [30] Fowler, G.N., Wolfendale, A.W.,1961b, dgl. S. 301
- [31] Enqvist, T. et al. (2005) Measurement of muon flux in the Phyhäsalmi underground laboratory, Nucl. Instr. Meth., Phys. Res. A554, 286 – 290
- [32] Verplancke, J., 1992, Low-level gamma spectroscopy:low, lower, lowest. Nucl. Inst. Meth. A 312, 174 - 182
- [33] Müller, G. et al., 1990, Low-background counting using Ge(Li) detectors with anit-muon shields, Nucl. Inst. Meth. A295 133 - 139
- [34] Cocconi, G. and Tongiorgi, V.1951. Nuclear disintegrations induced by m-mesons, Phys Rev. 84, 29-36,
- [35] Yamashita, M., Stephens, L.D, Patterson, H.W., Geophys. Res. 71 (1966) 3817,
- [36] Komura, K., Yousef, A.M., 1999, Abstracts of Papers of the 43rd Symposium on Radiochemistry, J. Nucl. Radiochem. Sciences, Vol. 1
- [37] Martinez, Maria J.; 2000, Measurement of Low Neutron Fluxes using Activation Detectors and Ultra Low-level Gamma-ray Spectrometry, Thesis de Docterado, Universitat de Valencia, Spain,
- [38] Niese, S., 2007, Measurement of fast neutrons above ground and in 47 m depth with a ^3He proportional counter, J. Radioanal. Nucl. Chem. 272, 173 – 176
- [39] Lindstrom R.M., Lindstrom D.J.; Slaback, L.A., Langland, J. K., 1990, A low-background gamma-ray assay laboratory for activation analysis. Nucl. Instr. Meth. A 299, 425 - 429
- [40] Dep, L., Elmore, D., Fabryka-Martin, J., Masaryk, J., Reedy, R.C.,1994, Production rate systematics on in-situ cosmogenic nuclides in terrestrial rocks, Monte Carlo approach of investigating $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B92 ,321-325]
- [41] Da Silva, A., et al., 1995, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 353, 553
- [42] Boehm F., Busenitz, J., Cook, B., Gratta G., Henrikson, H., Kornis, J., Lawrence, D., Lee, K.B., McKinny, K., Miller, L., Novikov, V., Piepke, A., Ritchie, B., Tracy, D., Vogel,
- [43] Arthur, R.J., Reeves, J.H., Miley, H.S.,1988, Use of low-background germanium detectors to pre-select high purity materials intended for construction of advanced ultra low-level detectors, IEEE Trans, Nucl. Sciences, 582-585

- [44] Arthur, R.J., Reeves, J.H., 1992, Methods for achieving ultra-low backgrounds in above-ground germanium detectors systems, J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles, 160, 297 – 304
- [45] Simpson, J.A., Fonger, W., Freimann, S.B., Phys. Rev. 90 (1953) 934 – 950, zit. In Sitte, K., (1967), I.c. Bd. II. S. 458
- [46] Bercovitch, M., Carmichael H., Hanna, G.C., Hincks, E.P., 1960, Phys. Rev. 119, 412 – 431, zit. in K. Sitte 1967 I.c. Bd. II, S. 461
- [47] Mai, D.-M., 2008, Neutron Inelastic Scattering Processes as Background for Double-Beta Decay Experiments, arXiv: nucl-ex, 0704.0306v4, 26 Jan 2008
- [48] Kolb, W. Meßanleitung Umweltradioaktivität, 1.Lfg.1992. Gammasp/Nulleff, Gustav-Fischer-Verlag- Stuttgart-Jena
- [49] Cannizzaro, F., Greco G., Raneli, M., Spitale, M.C., Tomarchio, E. 1997, Study of background characteristics of a low-level HPGe spectrometer with passive shielding in various configurations. Nucl. Instr. Meth. A 390, 167 - 174
- [50] Kalin, R.M., Long, A., 1989, Radiocarbon dating with the Quantulus in an underground counting laboratory: Performance and background sources. In: Long, A., Kra, R.S.(eds) Proc 13th Intern. ¹⁴C - Conf., Radiocarbon 31, 3, 359 – 367
- [51] Vojtyla, P. Povinec, P.P., 2000. A Monte Carlo simulation of background characteristics of low-level HPGe detectors. Appl. Rad. Isotopes, 53: 185-190.
- [52] Povinec, P.P., 2004, Development in analytical technologies for marine radionuclide studies. In Livingston, H.D.(ed.), Marine Radioactivity, Elsevier, Amsterdam, S.237 – 294
Povinec, P.P., Comanducci, J. - F., Levi-Palomo, I., 2004, IAEA-MEL's underground counting laboratory in Monaco – background characteristics of HPGE detectors with anti-coincidence shielding. Appl. Radiat. Isotopes 61, 85-94
- [53] Povinec, P.P., Comanducci, J. - F., Levi-Palomo, I., 2005, IAEA-MEL's underground counting laboratory (CAVE) for the analysis of radionuclides in the environment at very low-levels. J. Radioanal. Nucl. Chem. 263, 441-445
Povinec, P.P., 2005, Ultra sensitive radionuclide spectrometry: Radiometrics and mass spectrometry synergy. J. Radioanal. Nucl. Chem. 263, 413 – 417
- [54] Helbig, W., Görner, W., Niese, S., Background spectroscopy measurements using an underground laboratory, 1982, in Povinec (ed.). Proc. Sec. Int. Conf. Low Radioactivities '80, High Tatras 1980, Bratislava, 277- 284
- [55] Niese, S., 1996. Application of Low-level Counting Techniques for the Investigation of the Impact of Uranium Mining as well as Remediation on the Environment, Appl. Radiat. Isotopes. 47. 109 – 1112
- [56] Niese, S, Köhler, M, Gleisberg, B. 1998, Low-level counting techniques in the underground laboratory „Felsenkeller“ in Dresden. J. Radioanal. Nucl. Chem. 233, 167
- [57] Komura, K. 1997, Challenge to detection limit of environmental radioactivity, In Tsujimoto, T., Ogawa, Y. (Ed.) Proc. 1997 Intern. Symp. on Environmental Radiation, Tsuruga, Japan S. 56 - 75

- [58] McDonald, R.J., Smith, A.R., Hurley, D.L., Norman, E.B., 1998, Low-level measurement of alpha particle emitting nuclei in ceramics and lead, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 233, 185 – 189
- [59] Wordel, R., Mouchel, D., Bonne, A., Meynendonck, P., Vanmarcke, H. 1993. Low level gamma-ray measurements in a 225 m deep underground laboratory, *Proc. 3rd Intern. Summer School on Low-Level Measurements of Radioactivity in the Environment: Techniques and Applications*, Huelva, Spain
- [60] Kovalchuk, E. L., Kuzminov, V. V., Pomansky, A. A., Zatsepin, G. T., 1975, Deep underground laboratory for low-radioactivity measurements, *Proc. Int. Conf., High-Tatras*, 23 – 27
- [61] Pomansky, A.A. 1986. Underground low background laboratories of the Baksan Neutrino Observatory, *Nucl. Instr. Meth. B17*, 406 – 410
- [62] Zdesenko, Yu. G. et al. 1988, *Underground Physics'87: Proc. of the 2 Int. Symp., Baksan Valley, USSR, August 17-19, 1987*. Moscow, Nauka, p. 291.
- [63] Kim, H.J. et al., 2004, Measurement of the neutron flux in the CPL underground laboratory and simulation studies of neutron shielding for WIMP studies, *Astroparticle Physics*, 20, 549 - 557
- [64] Neumaier, S., Arnold, D., Böhm, J., Funck E., 2000, The PTB underground laboratory for dosimetry and spectrometry. *Appl. Rad. Isotopes* 53, 173 – 178
- [65] Brodzinski, R.L. Reeves, J.H., Avignone III T, Miley, M.S. 1988. Achieving Ultra Low Background in a Germanium Spectrometer, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles*, 124, 513 – 521
- [66] Brodzinski, R.L. 2005. Next generation germanium spectrometer background reduction techniques at 2 MeV. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 264, 139-143
- [67] Arnold, J. et al. 2005, Technical description and performance of the NEMO3 detector, *Nucl. Instr. Methods, A* 536, 79 – 122
- [68] Martineau, O. et al., 2004, Calibration of the EDELWEISS cryogenic heat-and-ionisation germanium detector for dark matter search, *Nucl. Instr. Methods A* 530, 426 - 439
- [69] Torres, R., Hubert, Ph., 1996. LSM, *Bull. d. Inform. des Utilisateurs*, No. 40, 1996
- [70] Ahlen, S.P. et al. 1990, *Phys. Lett.* B269/1
- [71] Belli, P. et al., 1989, *Il Nuovo Cimento*, A101, 959
- [72] Neder, H., Heusser, G., Laubenstein, M., 2000, Low-level γ -ray germanium – spectrometer to measure very low primordial radionuclide concentrations. *Appl. Rad. Isotopes*, 53, 191-195
- [73] Arpesella, C. 1996, A low-background counting facility at laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Appl. Radiat. Isotopes* 47, 991 – 996
- [74] Laubenstein, M. et al., 2004, Underground measurement of radioactivity, *Appl. Radiat. Isotopes*, 61, 167 - 172

- [75] Loosli, H.H., Oeschger, H., 1982, Proc. 2nd Int. Conf. on Low-level counting, Bratislava, 117
- [76] Heusser, G., 1994, Background in Ionizing Radiation Detection - Illustrated by Ge - spectrometry, in: Garcia-Leon, M., Garcia-Tenorio, R. (eds.). Proc. 3rd Intern. Summer School on Low-Level Measurements of Radioactivity in the Environment : Techniques and Applications, Huelva, Spain 1993, World Scientific, Singapore,
- [77] Povinec, P.P., 1972. Very low background proportional counter for tritium dating. Nucl. Instr. Meth. 101, 613
- [78] Povinec, P.P., 1979, Nucl. Instr. Meth. 163, 363
- [79] Povinec, P.P., 1980. Proportional chambers for low level counting . Nucl Instr. Meth. 176, 111-115
- [80] Bellotti, E., Cremonesi, O., Fiorini, E., Gervasio, G., Povinec, P., Ragazzi, S., Rossi, L., Sverzelatti, P.P., Szarka, J., Tabarelli de Fatis, T., Canotti, L., 1992, Multielement proportional chamber – A study of background in the Gran Sasso underground laboratory, Nucl. Instr. Meth., A 323, 125-134
- [81] Plastino, W., Kaihola, L., Bartomolei, P., Bella, F., 2001, Cosmic background reduction in the radiocarbon measurements by liquid scintillation spectrometry at the underground laboratory of Gran Sasso, Radiocarbon, 43, 157-161
- [82] Heusser G., Laubenstein, M., Neder, H., 2006, Low-level germanium gamma-ray spectrometry at the $\mu\text{B}/\text{kg}$ level and future developments towards higher sensitivity, In: Povinec, P.P., Sanchez-Cabeza, J.A. (Ed.), Radionuclides in the Environment, Elsevier, Amsterdam. 495 - 510
- [83] Klett, A., 2004,: Plutoniumdetektion über Spaltneutronen Nachweis, TÜV Akademie Seminar, München, 24.6.2004
- [84] Bothe, W., 1930, Zur Vereinfachung von Koinzidenzzählungen, Z. Physik 59, 1 – 5
- [85] Perkins, R.W., Nielsen, J.M., Diebel, R.N., Rev. Sci. Instr. 31, 1344
- [86] Laurec, J., Blanchard, X., Pointurier, F., Adam, A., (1995, A new low-background gamma spectrometer equipped with an anti-cosmic device, Nucl. Instr. Meth. A 369, 566 – 571
- [87] Keisch, B., Koch, R.C., Levine, A.S., 1965, Determination of biospheric levels of ¹²⁹I by neutron activation analysis, Proc. 1965 Int. Conf on Modern Trends in Activation Analysis, Texas A&M University, 284 – 290
- [88] Gijbels, R., Govaerts, A., 1973, Practical aspects of neutron activation determination of the platinum metals, J. Radioanal. Chem., 16, 7 - 19
- [89] Cooper, J.A., Rancitelli, L.A., Perkins R.W., 1970, An anticoincidence-shielded Ge(Li) gamma-ray spectrometer and its application to radioanalytical chemistry problems, J. Radioanal. Chem., 6, 147 -163
- [90] Cooper, J.A., Perkins R.W., 1972, A versatile Ge(Li) – NaJ(Tl) coincidence - anticoincidence gamma-ray spectrometer for environmental and biological problems, Nucl. Instr. Meth. 99, 125 – 146

- [91] Camp, D.C., Gatrousis, Ch., Maynard, L. A., 1974 Low-background Ge(Li) detector systems for radioenvironmental studies, Nucl. Instr. Meth. 117, 189 – 211
- [92] Wahl, W., Degering, D. Lierse, C. Lin, X.,(1996) Enhancement of Compton suppression ratios in anti – Compton techniques: the Garching and Karlsruhe photon spectrometers; Nucl. Instr. Meth., A 369, 627 – 633
- [93] Parus, J., Raab, L., Donohue, W., Jansta, V., Two Low-Level Gamma Spectrometry Systems for the IAEA Safegard Analytical Laboratory, in Fietz (Ed.); Methods and Applications of Low-Level Radioactivity Measurement, Rossendorf, Report FZR-170. S.41
- [94] Petry, H., Design and applications of an anticoincidence shielded low-background gamma-ray spectrometer, in: Fietz (Ed.) Methods and Applications of Low-Level Radioactivity Measurement, Rossendorf, Report FZR-170. S. 46
- [95] Degering, D., 1997, Experiences gained with an Anti-Compton spectrometer when utilized for measurement of natural activities, In: Fietz (Ed.): Methods and Applications of Low-Level Radioactivity measurement, Rossendorf, Report FZR-170. S.49
- [96] Cooper, J.A., 1971, Radioanalytical applications of gamma-gamma coincidence techniques with lithium-drifted germanium detectors, Analyt. Chem.,43, 838 – 845
- [97] Fruchter, J.S., 1972, Development of a high-sensitive liquid scintillation - NaI(Tl)- coincidence detector for X- γ emitters in lunar rocks, Nucl. Inst. Meth, 92, 349 - 354
- [98] Helbig, W., Niese, S., 1978, Zerstörungsfreie Kupferbestimmung in Silizium mittels Koinzidenzmessung. Isotopenpraxis, 14, 107 –108
- [99] Niese, S., Kleeberg, H., 1976, Meßanordnung zur X, γ -Koinzidenzspektrometrie geringer Aktivitäten von Elektroneneinfangstrahlern, Isotopenpraxis 12 (1976) 120-122
- [100] Borg, D.C. et al. 1961, Intern. J. Appl. Rad. Isotopes, 11, 10
- [101] Roedel, W.,1968, Nucl. Instr. Meth., 61, 41
- [102] Niese, S., 1973, Beta – gamma – coincidence spectroscopy of radiochemical separated nuclides in high-sensitivity neutron activation analysis, J. Radioanal. Chem, 15, 567 – 574.
- [103] Niese, S., Görner, W. Kleeberg, H., 1974, A multiple beta–single gamma detector assembly for low-level coincidence spectroscopy, Nucl. Instr. Meth. 118. 217 – 220
- [104] Niese, S., 1980, Der Nulleffekt bei der β,γ –Koinzidenzspektrometrie, Isotopenpraxis, 16, 133 – 135,
- [105] Niese, S. Helbig, W. Kleeberg, H.,1989, Multi-sample beta-gamma coincidence spectrometry in an underground laboratory, J. Radioanal. Nucl. Chem, Articles, 129, 387 – 391
- [106] Goldbrunner, T., v. Feilitzsch, F., v. Hentig, R., Jochum, N., 1997, Neutron activation analysis of detector components for the solar neutrino experiment BOREXINO, J. Radioanal. Nucl. Chem., 219, 293 – 297,
- [107] Goldbrunner, T., v. Hentig, R, Angeloher, G., v. Feilitzsch, F.1998, Ultra-sensitive determination of K, Th, U and other trace impurities in liquid organic scintillators by NAA, J. Radioanal. Nucl. Chem., 234, 43 – 49

- [108] Dewaraja, Y. K., He, Z., Fleming, R. F., Wehe, D. K., Guru, S. V., Ferreira, J. C., Fleming, R. H. 1994, A position sensitive β,γ -coincidence technique for multiplexed gamma spectrometry of many small samples, Nucl. Instr. Meth. A 353, 588-592.
- [109] McIntyre, J.I., Schrom, B.; Aalseth, C.E.; Cooper, M.; Hayes, J.C.; Heimbigner, T.R., Hossbach, T., Hubbard, C., Litke, K.E., Ripplinger, M., Seifert, C.E., Suarez, R., 2005, Beta-gamma coincidence counting using an yttrium aluminum perovskite and bismuth germanate phosphor scintillator, Nuclear Science Symposium Conference 23-29 Oct. 2005, IEEE Volume 3, 1301 – 1304
- [110] Buheitel, F., 1993, The determination of low levels of Radium isotopes and Radon by delayed-coincidence liquid scintillation spectrometry. In Noakes, J.E., Schönhofer, F., Polach, H.A. (Ed.), Liquid scintillation spectrometry, Radiocarbon 1993, 83 – 88
- [111] Brodzinski, R.L. 2005, persönl. Mitteilung v. 1. September, Er schrieb:
"1) A commercial style germanium spectrometer shielded with 10 cm of lead here in our laboratories in Richland at an altitude of ~100 m and a latitude of ~46 degrees north. The integral count rate in the energy region from 40 - 2700 keV for a 700 g detector was 22,100 counts per day per kg of germanium.
2) That same detector, reconfigured into a low-background cryostat and combined with an anticoincidence shield, dropped to 861 counts per day per kg of germanium."
- [112] Aalseth, C.E., Avignone, F.T.III., Brodzinski, R. L., Miley, H.S., Reeves, J.H., 1998, Using pulse shape discrimination to sort individual energy deposition events in a germanium crystal, J. Radioanal. Nucl. Chem., 233, 119 – 123
- [113] Plastino et al., 2001, Cosmic background reduction in the radiocarbon measurements by liquid scintillation spectrometry at the underground laboratory of Gran Sasso, Radiocarbon 43, 157 – 161
- [114] Komura, K., Moguntha Manikandan, N., Yamaguchi, Y., Inoue, M., Abe, T., Murata, Y., 2006, Levels of airborne radionuclides at Hegura Island, Japan. In Povinec, P.P., Sanchez-Cabeza, J. A. (Ed.) Radionuclides in the Environment, Elsevier, Amsterdam, S. 554-561
- [115] Niese, S., Loos, G., Gleisberg, B., Helbig, W., 1990, Determination of trace elements and cosmogenic radionuclides in meteorites by NAA and gamma spectrometry, Isotopenpraxis, 26, 138-141
- [116] Niese, S., Helbig, W., 1990, Cosmic induced radioactivity in the meteorite Trebbin, Freiburger Forschungshefte C 441, 90-93
- [117] Komura, K., Inoue, M., Nakamura, N., 2002, Cosmogenic radionuclides in the recently fallen Kobe (CK4) meteorite, Geochem. J. 36, 333-340
- [118] Arnold, D. Neumaier, S., Sima, O. 2002, Deep underground gamma spectrometric measurement of ^{26}Al in meteorite samples, Appl. Rad. Isotopes, 56, 405 – 408
- [119] Niese, S. Helbig, W., 1986, Detection limits in activation analysis using Ge(Li)-detectors installed in an underground laboratory, J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles 100, 155 – 163
- [120] Helbig, W., Niese, S., 1986, High Sensitivity Activation Analysis Using an Underground Laboratory for Gamma Spectrometry, Nucl. Instr. Meth. B 17, 431 – 434

- [121] Niese, S., Krogner, K., Werner, C.- D. Gleisberg, B., 1993, Radiochemical Neutron Activation Analysis of Ultramafic Rocks from the Saxonian Granulite Massif, J. Radioanal. Nucl. Chem. 169, 81 – 92
- [122] Smith, A.R., McDonald, R.J., Manini, H., Hurley, D.L., Norman, E.B., Vella, M.C., 1996, Low-background instrumental neutron activation analysis of silicon semiconductor material, J. Electrochemical Soc. 143, 339 – 346
- [123] Köhler, M., Gleisberg, B. Niese, S., 2000, Investigation of the soil-plant transfer of primordial radionuclides in tomatoes by low-level γ -ray spectrometry, Appl. Rad. Isotopes 53, 203 - 208
- [124] Köhler, M., Hult, M., Arnold, D., Laubenstein M., Reyes, J.-L., 2004, Reference measurements of ^{60}Co in steel, Appl. Rad. Isotopes 61, 207-211
- [125] Köhler, M., Saupe, M., 2005. Screening of primordial and artificial radionuclides in German steel by low-level γ -ray spectrometry in an underground laboratory, J. Radioanal. Nucl. Chem. 263, 381 – 385
- [126] Reyss, J.-L., Schmidt, S., Legeleux, F., Bonte P., Large, 1995, Low Background Well-type Detectors for Measurements of Environmental Radioactivity, Nucl. Instr. Meth., A 357, 391 – 397
- [127] Povinec, P.P., La Rosa, J.J., Lee, S.H., Osvath, I., Wyse, E. (2001), Recent developments in radiometric and mass spectrometry methods for marine radioactivity measurements, J. Radioanal. Nucl. Chem. 248, 713 -718
- [128] Hirose, K., Aoyama, M., Igarashi, Y., Komura, K., 2005, Extremely low background measurement of ^{137}Cs in seawater using an underground facility (Ogoya). J. Radioanal. Nucl. Chem. 263, 349-353
- [129] Hult, M., Gasparro, J., Vasselli, R., Shizuma, K., Hoshi, M., Arnold, D., Neumaier, S., 2004. Deep underground measurements of ^{60}Co in steel exposed to the Hiroshima atomic bomb explosion, Appl. Rad. Isotopes, 61, 173-177
- [130] Hult, M. , Martínez – Canet, M. J., Johnston, P. N., Komura, Kazuhisa., 2002, Thermal neutron fluence from ultra low-level γ -ray spectrometry of spoons activated during the JCO criticality accident at Tokai-mura in 1999, J. Environm. Radioactivity 60, 307-318
- [131] Niese, S., Gleisberg B.,1995, Determination of Radioisotopes of Ce, Eu, Pu, Am and Cm in low-level-wastes from power reactors, J. Radioanal. Nucl. Chem., Letters, 200, 31-41
- [132] Heusser, G.,1995, Low-radioactivity background techniques, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 45, 543 – 590. s. a. Heusser, G.,1993, Nucl. Instr. Meth. B83, 223 – 228
- [133] Neumaier, S., Zwiener, R., Böhm, J. (Hsg.) 2003, Experimente im Untergrundlaboratorium UDO der PTB im Bergwerk Asse II, Rückblick und Perspektiven, PTB-Bericht, PTB-Dos-43.

Danksagung

Ich hatte beim Auf- und Ausbau und beim Betrieb des unterirdischen Laboratoriums Felsenkeller in Dresden Gelegenheit, reichlich Erfahrungen zu sammeln, Bei den Arbeiten waren mir in der ersten Ausbaustufe von 1980 bis 1995 von meinen Mitarbeitern besonders die Herren Dr. Wolfgang Helbig und Dieter Birnstein und in der anschließenden zweiten Ausbaustufe Dr. Matthias Köhler und Michael Saupe als Partner für die wissenschaftlichen Arbeiten eine große Hilfe. Dem Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V. bin ich zu besonderem Dank verpflichtet, weil er sich für eine großzügige Gestaltung der zweiten Ausbaustufe entschieden hatte und ich auch nach Eintritt in den Ruhestand die Möglichkeit erhielt, im „Felsenkeller“ Messungen durchzuführen. Prof. Pavel Povinec danke ich dafür, dass er als Herausgeber des 11. Bandes einer Serie Environmental Radioactivity mein Kapitel über Untertagelabors redaktionell betreut hat. Herrn Dr. Köhler danke ich für die sorgfältige Lesung des Manuskriptes und Frau Mandy Franke für die Gestaltung, Formatierung und Kontrolle der Literaturstellen.

Lebenslauf



Prof. Dr. habil. Siegfried Niese war von 1956 bis 1991 im Zentralinstitut für Kernforschung der DDR auf den Gebieten Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen, der Radiochemischen Analytik und der Kernstrahlungsmesstechnik tätig.

Von 1992 bis zum Eintritt in den Ruhestand 1997 arbeitete er im Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V. auf den Arbeitsfeldern Sanierung von Hinterlassenschaften des Uranbergbaus und der Stilllegung kerntechnischer Anlagen.

Anschrift:
Am Silberblick 9
01723 Wilsdruff Stt Grund
E-Mail: siegfried@niese-mohorn.de