



DIPLOMARBEIT

Entwicklung einer neutronenaktivierungsanalytischen Methode zur jahresringspezifischen Bestimmung von Spurenelementen in Zirbenholz

ausgeführt am

Atominstitut der Österreichischen Universitäten

Technische Universität Wien

unter der Anleitung von

Ao.Univ.Prof. Dr.phil. Max BICHLER

durch

Jakob LIEBL

Rebhalde 35, A-6832 Rötthis

September 2007

Danksagungen

Ich spreche Herrn Prof. Max Bichler ein herzliches Dankeschön für die ausgezeichnete Betreuung und äußerst interessante Einführung in die spannende vielseitige Welt der Radiochemie aus. Ich habe den freundlichen und angenehmen persönlichen Umgang in der unter seiner Leitung stehenden Arbeitsgruppe zu jeder Zeit hoch geschätzt.

Immer, so denke ich, werde ich mich in schönen Gedanken an das Arbeiten in diesem, sich unterstützenden Team, mit Herrn Dr. Johannes Sterba, Hamod Alshammari, Klaus Wartmann und Stefan Schrittwieser, erinnern.

Dank gebührt der Forstdirektion der Fürstlich Schwarzenberg'schen Familienstiftung, Murau, insbesondere Herrn OFM Dipl. Ing. Dr. Erwin Lick, für die Einladung und Unterstützung bei der Probennahme im Forstgelände in Stadl an der Mur.

Meinen Eltern spreche ich Dank für die Unterstützung in meinen Studienvorhaben aus. Ihr Interesse an meinem Studium und auch an dieser Arbeit war für mich immer Motivation, meine gesteckten Ziele zu erreichen.

Kurzfassung

Bei archäologischen Datierungen spielt die Dendrochronologie eine wesentliche Rolle. Das mittelfristige Ziel dieser Arbeit ist es, Holz durch Spurenelementanalytik verschiedenen Wachstumsstandorten zuordnen zu können und Naturereignisse in Jahresringen von Bäumen an Variationen von Elementkonzentrationen zu erkennen. Eine derartige Standortbestimmung soll die Einordnung archäologischer Fundstücke aus Holz, z.B. Sarkophage, in bestehende Dendrochronologien ermöglichen. Die nicht eindeutige Herkunft des Zedernholzes ägyptischer Sarkophage (Libanon, Zypern oder Taurus) hat diese bisher verhindert. Das Identifizieren von klimatisch weltweit wirksamen Naturereignissen in Jahresringen kann ebenso zur Lösung verschiedener Fragestellungen der modernen Archäologie beitragen. Diese Diplomarbeit wurde mit der Motivation, eine Methode der Instrumentellen Neutronenaktivierungsanalyse (INAA) zur Spurenelementanalytik in Holz zu entwickeln, ausgeführt. INAA erlaubt bei einer einfachen Probenaufbereitung den Nachweis vieler Elemente auch bei geringsten Konzentrationen. Für die Arbeiten wurde Zirbenholz (*Pinus Cembra* L.) aus der Weststeiermark, Österreich, herangezogen. Dieses weist dendrochronologische Ähnlichkeiten mit Zedernholz auf. Unter verschiedenen Bestrahlungs-, Abkling- und Messbedingungen wurden gefriergetrocknete Jahresringsegmente untersucht. Plasmaveraschen der Holzproben erwies sich, aufgrund der relativ geringen Probenmassen, welche mit dem am Atominstitut der Österreichischen Universitäten (ATI) verfügbaren Plasmaverascher verarbeitet werden können, als nicht zielführend. Aktivierungen erfolgten im Langsamen Rohrpostsystem, einem Trockenbestrahlungsrohr, oberhalb des Reaktorkerns und im Zentralen Bestrahlungsrohr des TRIGA Mark-II Forschungsreaktors des ATI in Wien. Die folgenden Elemente konnten in Zirbenholz nachgewiesen werden: Ag, Al, As, Au, Ba, Br, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cs, Fe, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, W und Zn. Die sehr niedrigen Konzentrationen dieser Spurenelemente in Holz erfordern eine Aktivierung bei höchstmöglichem Neutronenfluss (Zentrales Bestrahlungsrohr) und machen ein sehr sauberes Arbeiten notwendig. In einer ersten Anwendung wurden die Variationen der Spurenelementkonzentrationen innerhalb eines einzelnen Jahresringes untersucht. Der Vergleich mit den Konzentrationsunterschieden in Jahresringen verschiedenen Alters, welche in Stichproben ermittelt wurden, erlaubt eine Probe aus einem Jahresring als repräsentativ für den gesamten Jahresring zu betrachten. Die geringen verfügbaren Probenmassen aus archäologischen Hölzern machen dieses Resultat zu einer wichtigen Aussage.

Abstract

Tree rings play an important role in archaeological dating. The ability to attribute wood to its growth site and to identify past natural phenomena by means of trace element analysis of tree rings is a middle-term objective. A growth site determination shall allow the placement of wooden archaeological findings, e.g. sarcophagi, within a dendrochronology. Up to now the unclear origin of the cedar wood used in Egyptian sarcophagi (Lebanon, Cyprus or Taurus) has inhibited this. The identification of climatic globally effective natural phenomena in tree rings can also contribute to solve problems of modern archaeology. This work was carried out with the aim of developing a method of instrumental neutron activation analysis (INAA) to determine trace element concentrations in wood. INAA facilitates very low detection limits for many elements combined with simple sample preparation. Swiss stone pine wood (*Pinus Cembra* L.) from Styria, Austria, was used in this work. This wood provides dendrochronological similarities with cedar wood. Under different irradiation-, decay- and measuring conditions freeze-dried samples were processed by means of INAA. Plasma ashing of the wood samples was not useful since the sample size which can be processed by the cool plasma asher at the Atomic Institute of the Austrian Universities (ATI) turned out to be too small. Sample activation was carried out in the pneumatic delivery system, in a dry irradiation tube, above the core and in the central irradiation tube of the TRIGA Mark-II research reactor at the ATI in Vienna. The following elements could be identified in Swiss stone pine wood: Ag, Al, As, Au, Ba, Br, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cs, Fe, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, W and Zn. The very low concentrations of these trace elements necessitate highest possible neutron flux at activation (central irradiation tube) and very clean working conditions. In a first application the variations in trace element concentrations within a single tree ring were measured. The comparison with concentration differences that were found between selected tree rings of different age permit to consider the concentration values obtained from one sample of a tree ring to be representative for the tree ring as a whole. The small available sample masses from archaeological wood turn this result into a conclusion of high significance.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | xiii |
| Tabellenverzeichnis | xv |
| I. Grundlagen | 1 |
| 1. Einführung | 3 |
| 1.1. Motivation | 3 |
| 1.2. Methode | 5 |
| 1.3. Dendrochronologie | 6 |
| 1.4. Chemische Analysen von Jahresringen | 9 |
| 1.5. Aufnahme und Mobilität chemischer Elemente in Bäumen | 11 |
| 2. Analysenmethoden | 13 |
| 2.1. Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy | 13 |
| 2.2. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry | 13 |
| 2.3. X-Ray Fluorescence | 14 |
| 2.4. Proton/Particle Induced X-Ray Emission | 15 |
| 2.5. Neutronenaktivierungsanalyse | 16 |
| 3. Neutronenaktivierungsanalyse | 17 |
| 3.1. Grundlagen | 17 |
| 3.1.1. Radioaktivität und Zerfallsarten | 17 |
| 3.1.2. Neutronen | 21 |
| 3.1.3. Wirkungsquerschnitte | 23 |
| 3.2. Physikalisches Prinzip | 25 |
| 3.2.1. Aktivierung | 27 |
| 3.2.2. Abklingphase | 29 |
| 3.2.3. Messung | 30 |
| 3.2.4. Konzentrationsbestimmung | 30 |
| 3.2.5. Vergleichende Konzentrationsbestimmung unter Verwen- dung eines Standards | 31 |
| 3.3. Messtechnik | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Spurenelemente | 35 |
| 4.1. Spurenelemente in der Atmosphäre | 35 |
| 4.2. Spurenelemente in Gestein | 36 |
| 4.3. Spurenelemente in Böden | 36 |
| 4.4. Spurenelementkonzentrationen in Bäumen | 38 |
| | |
| II. Experiment | 43 |
| | |
| 5. Probennahme und Probenaufbereitung | 45 |
| 5.1. Probennahme <i>Pinus cembra</i> | 45 |
| 5.1.1. Die Zirbe | 45 |
| 5.1.2. Probennahme in Stadl an der Mur | 45 |
| 5.2. Probenaufbereitung | 48 |
| 5.2.1. Mechanische Verarbeitung | 48 |
| 5.2.2. Veraschung | 50 |
| 5.2.3. Gefriertrocknung | 51 |
| | |
| 6. Aktivierung | 53 |
| 6.1. Aktivierung im <i>Trockenbestrahlungsrohr</i> | 53 |
| 6.1.1. <i>Pinus Cembra</i> Kern- und Splintholz | 53 |
| 6.2. Rotierende Aktivierung <i>oberhalb des Reaktorkerns</i> | 54 |
| 6.2.1. <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 54 |
| 6.2.2. Vergleich der Bestrahlungsbedingungen der Standards | 54 |
| 6.3. Aktivierung in der <i>Langsamen Rohrpost</i> | 58 |
| 6.3.1. Probe Nr. 20 <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 58 |
| 6.4. Aktivierung im <i>Zentralen Bestrahlungsrohr</i> | 59 |
| 6.4.1. Probe Nr. 2 <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 59 |
| 6.4.2. 3 Jahresringsegmente 1892 - 1896 <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) | 59 |
| | |
| 7. Messergebnisse | 63 |
| 7.1. <i>Pinus Cembra</i> Kern- und Splintholz | 63 |
| 7.2. <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 65 |
| 7.2.1. Probe Nr. 19 und Nr. 20 <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 65 |
| 7.2.2. Probe Nr. 2 <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 66 |
| 7.3. Konzentrationsverteilung innerhalb eines 5-Jahresringsegmentes | 67 |
| 7.4. Spurenelemente in Quarzglaskapseln | 70 |

| | |
|---|------------|
| 8. Diskussion und Ausblick | 73 |
| 8.1. Probenaufbereitung | 73 |
| 8.2. Bestrahlungsbedingungen | 73 |
| 8.3. Probenkapseln | 74 |
| 8.4. Nachweisbare Spurenelemente in Holz | 74 |
| 8.5. Variation der Spurenelementkonzentrationen in Holz | 74 |
| 8.5.1. Kern- und Splintholz | 74 |
| 8.5.2. Variation innerhalb eines Jahresringsegments | 75 |
| 8.6. NAA Spurenelementanalytik in dendrochronologischen Fragestellungen | 75 |
| Literaturverzeichnis | 77 |
| III. Anhang | 87 |
| A. Bindungsenergie von Kernen | 89 |
| B. Neutronenflussmessung oberhalb des Reaktorkerns | 93 |
| C. Betrachtete Radionuklide und Standard Konzentrationsangaben | 99 |
| C.1. Radionuklide zu Konzentrationsbestimmungen | 99 |
| C.2. Standard Konzentrationsangaben | 100 |
| D. Gammaspektren | 103 |
| D.1. <i>Pinus Cembra</i> Kern- und Splintholz | 103 |
| D.2. <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 116 |
| D.3. Leerwertmessungen | 141 |

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1. | Rekonstruiertes Minoisches Fresko aus Avaris, Ägypten | 4 |
| 1.2. | Thera/Santorini, Griechenland, im östlichen Mittelmeerraum . . | 5 |
| 1.3. | Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche) | 7 |
| 1.4. | Tangential- und Radialschnitt <i>Pinus Cembra</i> | 8 |
| 2.1. | Einsatz von PIXE und XRF zur Untersuchung Leonardo da Vincis Madonnenbild <i>Madonna dei fusi</i> | 15 |
| 3.1. | Feynmandiagramm des Zerfalls eines Neutrons n in ein Proton p unter Emission eines Elektrons e^- und eines Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ | 22 |
| 3.2. | Reaktorneutronenspektrum | 24 |
| 3.3. | Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang von ^{41}K | 26 |
| 3.4. | Kernschema des TRIGA Mark-II Forschungsreaktors am ATI . . | 28 |
| 3.5. | Halbwertsbreite bzw. <i>Full Width at Half Maximum (FWHM)</i> . . | 34 |
| 4.1. | Schwermetallflüsse in einem Fichtenökosystem des Sollings . . . | 38 |
| 5.1. | <i>Pinus cembra</i> (Zirbe) im Schwarzenbergschen Forst in Stadl an der Mur, Steiermark, Österreich | 46 |
| 5.2. | <i>Pinus cembra</i> Proben (Zirbe) mit GPS-Gerät zur Positionsbe- stimmung im Schwarzenbergschen Forst in Stadl an der Mur, Steiermark, Österreich | 47 |
| 5.3. | Geologische Karte des Probenstandorts in Stadl an der Mur . . | 49 |
| 5.4. | Bestrahlungskapsel aus hochreinem Quarzglas | 50 |
| 5.5. | Veraschungsprozess im <i>Cool Plasma Asher</i> Probengefäß mit Kühl- finger | 51 |
| 5.6. | Zustandsdiagramm Wasser | 52 |
| 6.1. | rotierender Probenbehälter | 55 |
| 6.2. | Bestrahlungskapsel aus hochreinem Quarzglas nach Bestrahlung | 57 |
| 6.3. | Probenpositionen in Baumscheibe <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C 1892 - 1896 | 60 |
| 6.4. | Querschnitt durch Probenmaterial <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C 1892 - 1896 | 61 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 7.1. <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C Spurenelementkonzentrationen im Jahresringsegment 1892 - 1896; Absolutangaben | 68 |
| 7.2. <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C Spurenelementkonzentrationen im Jahresringsegment 1892 - 1896; Konzentrationsangaben der Proben S, NO und NW relativ zum Mittelwert dargestellt; | 69 |
| A.1. Bindungsenergie pro Nukleon nach dem Tröpfchenmodell | 92 |
| B.1. Detektorausbeute HPGe-Halbleiterdetektor | 97 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| 1.1. Mobilität chemischer Elemente in Xylem | 12 |
| 3.1. Klassifizierung von Neutronen nach ihrer kinetischen Energie . . | 23 |
| 4.1. Spurenelementkonzentrationen in Xylem in Bäumen | 40 |
| 4.2. Baumbezeichnungen nach dem <i>Linnéschen System</i> und im deut- schen Sprachraum | 41 |
| 5.1. Standorte der Probennahme am 16. April 2007 in Stadl an der Mur | 48 |
| 6.1. Einwägetabelle Bestrahlung 7.1 | 53 |
| 6.2. Reaktorkritikalität Bestrahlung 7.1 | 54 |
| 6.3. Probenbezeichnung und Einwägetabelle Bestrahlung 6.2.1 | 56 |
| 6.4. Reaktorkritikalität Bestrahlung 6.2.1 | 57 |
| 6.5. Zählratenvergleich Standards | 58 |
| 6.6. Einwägetabelle Bestrahlung 6.4.1 | 59 |
| 6.7. Reaktorkritikalität Bestrahlung 6.4.1 | 60 |
| 6.8. Einwägetabelle Bestrahlung 6.4.2 | 61 |
| 6.9. Reaktorkritikalität Bestrahlung 6.4.2 | 61 |
| 7.1. Messergebnisse <i>Pinus Cembra</i> Kern- und Splintholz | 63 |
| 7.2. Abschätzung Spurenelementkonzentrationen in <i>Pinus Cembra</i> Splint- und Kernholz, Probe Zeder C | 64 |
| 7.3. Messergebnisse Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | 65 |
| 7.4. Messergebnisse Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe Nr. 2 . | 66 |
| 7.5. <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C Spurenelementkonzentrationen im Jahres- ringsegment 1892 - 1896 | 67 |
| 7.6. Spurenelementkonzentrationen in Quarzglas der Probenkapseln . | 71 |
| B.1. Einwägetabelle Neutronenflussmessung | 93 |
| C.1. Zu Konzentrationsbestimmungen betrachtete Radionuklide . . . | 99 |
| C.2. Reference Soil SO-1 | 100 |
| C.3. NIST - SRM 1515 - Apple Leaves | 100 |
| C.4. NIST - SRM 1566b - Oyster Tissue | 100 |
| C.5. NIST - SRM 1573a - Tomato Leaves | 101 |

Teil I.

Grundlagen

“Physics is experience, arranged in economical order.”

Ernst Mach (1838–1916), Austrian physicist, philosopher of science.
The Economical Nature of Physical Inquiry (1882).

1. Einführung

1.1. Motivation

Eine kleine, jedoch sehr heftige Eruption 1866 im Zentrum der Caldera von Santorini¹ (siehe Abbildung 1.2) führte zu modernen archäologischen und geologischen Untersuchungen der Insel im Mittelmeer. Bald wurde entdeckt, dass unter der meterdicken Bimssteinschicht einer vorgeschichtlichen Eruption, der *minoischen Eruption*, eine Zivilisation der Bronzezeit begraben wurde. Ausgrabungen bei Akrotiri² brachten Teile einer sehr gut erhaltenen Stadt zum Vorschein. Die aus außergewöhnlichen Fresken (siehe Abbildung 1.1) und anderen Überresten dieser Kultur gewonnenen Erkenntnisse haben die ägäische Archäologie tiefgehend verändert. Die Datierung dieser prähistorischen Eruption, welche zur Verschüttung von Akrotiri führte, bleibt bis heute umstritten. Dies bezieht sich sowohl auf ein absolutes Kalenderdatum v. Chr., als auch auf die relative Chronologie in Bezug auf andere Zivilisationen in Ägypten, der Levante³, und auf Zypern. Die korrekte Einbindung dieser gigantischen Eruption in die Geschichte erfordert eine Datierung [Manning, 1999].

Die in der Archäologie gebräuchliche Datierung, beruhend auf archäologisch-historiografischen Methoden, bestimmt das Datum der Eruption mit 1500 v. Chr. und wird auch *niedrige Chronologie* genannt [Warren und Hankey, 1989].

Im Gegensatz dazu legen verschiedene naturwissenschaftliche Datierungsmethoden eine so genannte *hohe Chronologie*, ein Datum circa ein Jahrhundert früher, vor 1600 v. Chr., nahe. Diese Studien stützen sich auf Proben aus Eisbohrkernen, dendrochronologische Untersuchungen und ¹⁴C-Datierungen [McCarroll und Loader, 2004]. In Eisbohrkernen aus Grönland konnte eine überdurchschnittlich saure Schicht, dem Jahr 1645 v. Chr. (± 20 Jahre) entsprechend, identifiziert werden [Hammer u. a., 1987]. Dendrochronologen stellten eine Klima-anomalie, einen ungewöhnlich schmalen Jahresring, im Jahr 1627 v. Chr. fest, [LaMarche und Hirschboeck, 1984] und [Kuniholm u. a., 1996]. ¹⁴C-Datierungen legen ein höchstwahrscheinliches Datum im 17. Jahrhundert v. Chr. nahe [Manning, 1988; Manning u. a., 2006].

¹Santorini (Griechenland): Archipel im östlichen Mittelmeer nördlich von Kreta mit der Hauptinsel Thera

²Akrotiri: archäologische Ausgrabungsstätte auf Thera; benannt nach dem heutigen Ort Akrotiri auf Santorini; 1967 vom Archäologen Spyridon Marinatos entdeckt

³Levante ital. = (Sonnen-)Aufgang, auch Morgenland; im weiteren Sinne die Länder des östlichen Mittelmeeres

1. Einführung

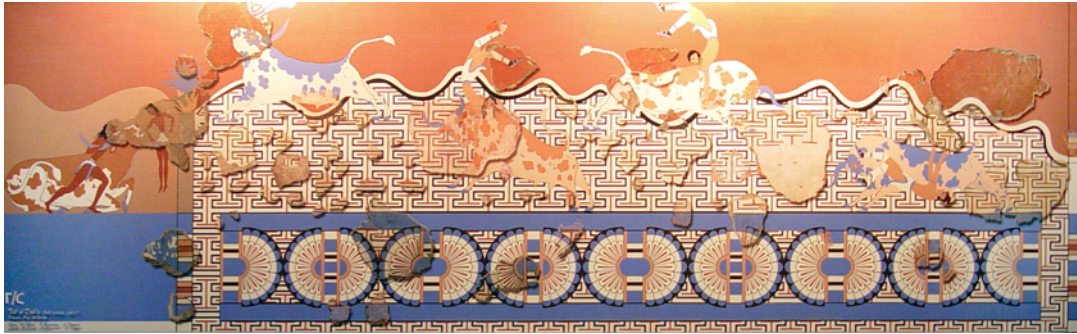


Abbildung 1.1.: *Rekonstruiertes Minoisches Fresko aus Avaris, Ägypten*
(Creative Commons lizenziert, CC-BY-SA-2.5, Martin Dürrschnabel)

Diese bisherigen Untersuchungen an Eisbohrkernen und an Jahresringen von Bäumen liefern keinen direkten gesicherten Zusammenhang zu einer minoischen Eruption. Auch andere Eruptionen können Auslöser einer Klimaveränderung mit den untersuchten Folgen gewesen sein. Für eine angestrebte Identifizierung vulkanischer Eruptionen wird die Möglichkeiten eindeutiger Marker in Form von charakteristischen Spurenelementkonzentrationen in Jahresringen in Betracht gezogen. Sich unterscheidende Konzentrationsverhältnisse unterschiedlicher Baumstandorte können zur Standortbestimmung dienen und somit indirekt zur Datierung von Naturereignissen beitragen.

Die an einem, sehr wahrscheinlich durch die Eruption verkohlten, und verschütteten Olivenbaum durchgeführte ^{14}C -Datierung stellt kein eindeutiges Datum zur Verfügung. Dies liegt zum einen an Messfehlern, andererseits an den lang- und kurzfristigen Schwankungen der ^{14}C -Produktionsraten⁴, welche eine Kalibrierungskurve zur Datierung notwendig machen [Manning u. a., 2006; Friedrich u. a., 2006]. Auch ist nicht sichergestellt, dass der untersuchte Baum nicht bereits vor der Eruption abgestorben ist. Die angesprochene Kalibrierungskurve, welche aus der Dendrochronologie erstellt wird, verhält sich so, dass in dem umstrittenen Zeitraum keine einfache eindeutige Zuordnung möglich ist. Anerkannt wird lediglich ein spätest möglicher Zeitpunkt, welcher jedoch keine zur exakten Datierung weiterführenden Schlüsse zulässt.

Der Datierung der minoischen Eruption kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie einen Fixpunkt in den verschiedenen relativen Chronologien dieser Region darstellt. Die gesamte absolute Chronologie der späten Bronzezeit hängt von der Datierung dieser Eruption ab. Daher gehört diese Frage zu den am heftigsten

⁴Das Kohlenstoffisotop ^{14}C wird in der äußeren Atmosphäre aus ^{14}N über die Reaktion $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ (Nomenklatur siehe Seite 25) erzeugt. Die dazu erforderlichen freien schnellen Neutronen haben ihren Ursprung in der kosmischen Strahlung. Die ^{14}C -Produktionsrate ist insbesondere aufgrund der Variabilität des Erdmagnetfeldes (Abschirmung kosmischer Strahlung) und der Sonnenfleckenzyklen Schwankungen unterworfen.

umstrittenen der modernen archäologischen Forschung⁵.

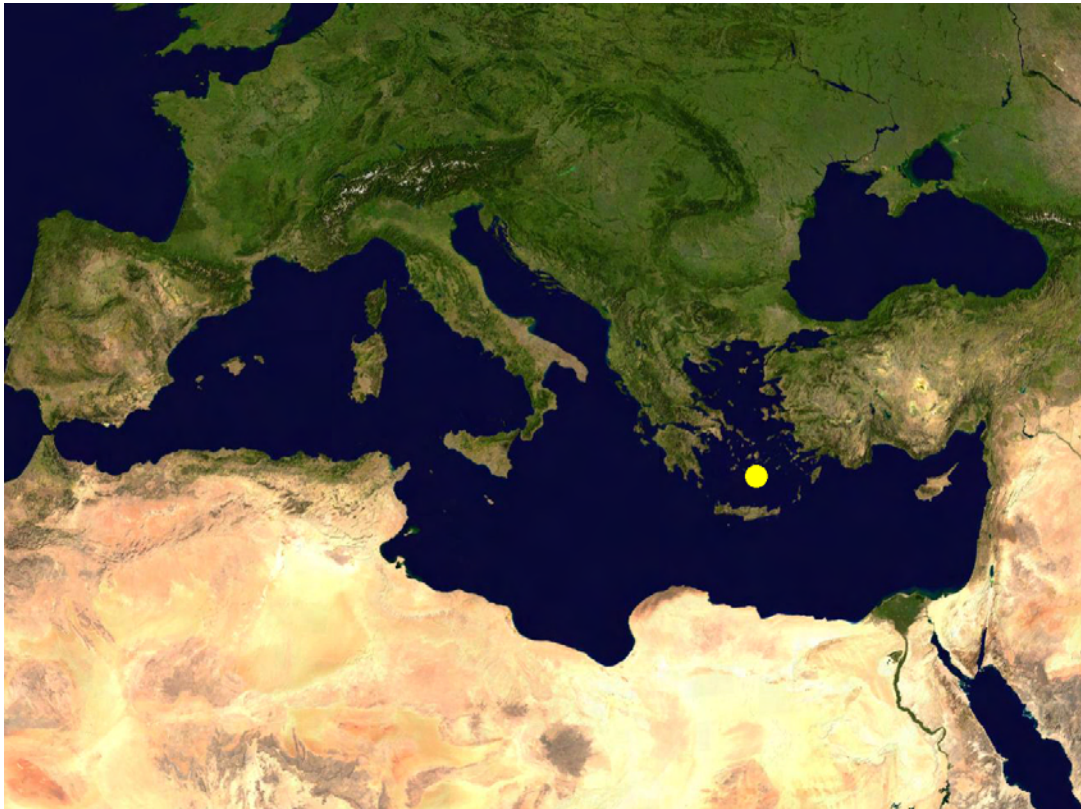


Abbildung 1.2.: *Thera/Santorini, Griechenland, im östlichen Mittelmeerraum (NASA, World Wind)*

1.2. Methode

In dieser Arbeit wird Zirbenholz aus der Weststeiermark herangezogen, um die Spurenelementbestimmung in Holz mittels Neutronenaktivierungsanalyse zu erproben. Zirbenholz wurde aufgrund seiner dendrochronologischen Ähnlichkeit zu Zedernholz ausgewählt. Zedern (*Cedrus* L.), gehören ebenfalls wie Zirben zur Familie der Kieferngewächse (*Pinaceae*) und sind entlang der nordöstlichen Mittelmeerküste in Höhenlagen ab ca. 1000 m Seehöhe heimisch. Bereits die alten Ägypter und später die Phönizier nutzen Zedernholz zum Bau. Da nachweislich Importe aus dem Libanon, Zypern und dem Taurus nach Ägypten zur Verarbei-

⁵Spezialforschungsbereich SCIEM2000: *The Synchronisation Of Civilisations Of The Eastern Mediterranean In The Second Millenium B.C.* gefördert von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) und dem Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF)

1. Einführung

tung herangezogen wurden, ist eine erweiterte Kenntnis speziell dieser Holzart für dendrochronologische Anwendungen von Interesse.

Unterschiedliche Bestrahlungspositionen (Langsame Rohrpost, Trockenbestrahlungsrohr, oberhalb des Reaktorkerns und im Zentralen Bestrahlungsrohr) am TRIGA Mark-II Forschungsreaktor des Atominstituts der Österreichischen Universitäten (ATI) in Wien werden auf ihre Eignung zur Untersuchung von Holz betrachtet. Neben qualitativen Nachweisen werden die Spurenelementkonzentrationen unter Zuhilfenahme von Standards quantifiziert.

1.3. Dendrochronologie

Die Datierungsmethode Dendrochronologie⁶ wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts von dem Astronomen Andrew E. Douglass eingeführt. Douglass vermutete Einflüsse der Sonnenfleckenzyklen auf das Wachstum von Pflanzen. Diese Vermutung wurden nicht bestätigt. Seine Untersuchungen führten jedoch zu einem starken Zusammenhang von Wachstum und regionalen Klimaschwankungen. Aus diesen Erkenntnissen wurde es ihm möglich, Holzüberreste von amerikanischen Indianerdörfern, *pueblos*, zu datieren [Douglass, 1914; Cichocki, 2000].

Chemische Zusammensetzung von Holz

Die chemischen Hauptbestandteile von Holz sind Zellulose⁷, Lignin⁸ und Hemizellulose⁹. In europäischen Hölzern liegt der Anteil an Zellulose bei 41 – 43%, während der Ligninanteil in Nadelhölzern bei 27 – 28% und in Laubhölzern bei 22 – 24% liegt. Der Anteil an Hemizellulose ergibt sich somit in Nadelhölzern mit 25 – 30% und in Laubhölzern mit 30 – 35%. Bei biologischen Unregelmäßigkeiten weichen die Zusammensetzungen ab. Beispielsweise liegt in Druckholz¹⁰ ein höherer Ligninanteil vor (circa 40%). Die meisten europäischen Hölzer beinhalten auch einen Anteil an Extraktstoffen von 1 – 3% (beispielsweise Terpene, Fette, Wachs oder Phenol, extrahierbar mittels organischer Lösungsmittel), sowie mineralische Komponenten im Konzentrationsbereich von 0.1 – 0.5%. Abhängig von der Art der Extraktstoffe, welche spezifisch für Baumarten und Gattungen

⁶*dendron* griech. = Baum, *chronos* griech. = Zeit;

⁷ $[C_6H_{10}O_5]_n$, auch Cellulose genannt. Als Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände die häufigste organische Verbindung, damit auch das häufigste Polysaccharid. Zellulose besteht aus mehreren hundert bis zehntausend β -Glucosemolekülen.

⁸Lignin ist ein phenolisches Makromolekül. Als fester, farbloser Stoff wird Lignin in die pflanzliche Zellwand eingelagert und bewirkt damit die Verholzung der Zelle (Lignifizierung).

⁹Hemizellulose gehört mit Cellulose und Pektin zu den Strukturkohlehydraten. Hemicellulosen sind aus Hexosen, Pentosen, Desoxyhexosen und Hexuronsäuren aufgebaut.

¹⁰Fehlerhaftes Holz, das hart und spröde ist. Druckholz tritt oft bei Nadelhölzern auf, und kann an seiner rötlichen Färbung erkannt werden. Unter anderem können Erdbewegungen bzw. starke Windeinflüsse zur Bildung von Druckholz führen [Schweingruber, 1983].

sind, werden chemische, biologische, physikalische und optische Eigenschaften des Holzes in unterschiedlichem Maße beeinflusst [Nimz u. a., 2005].

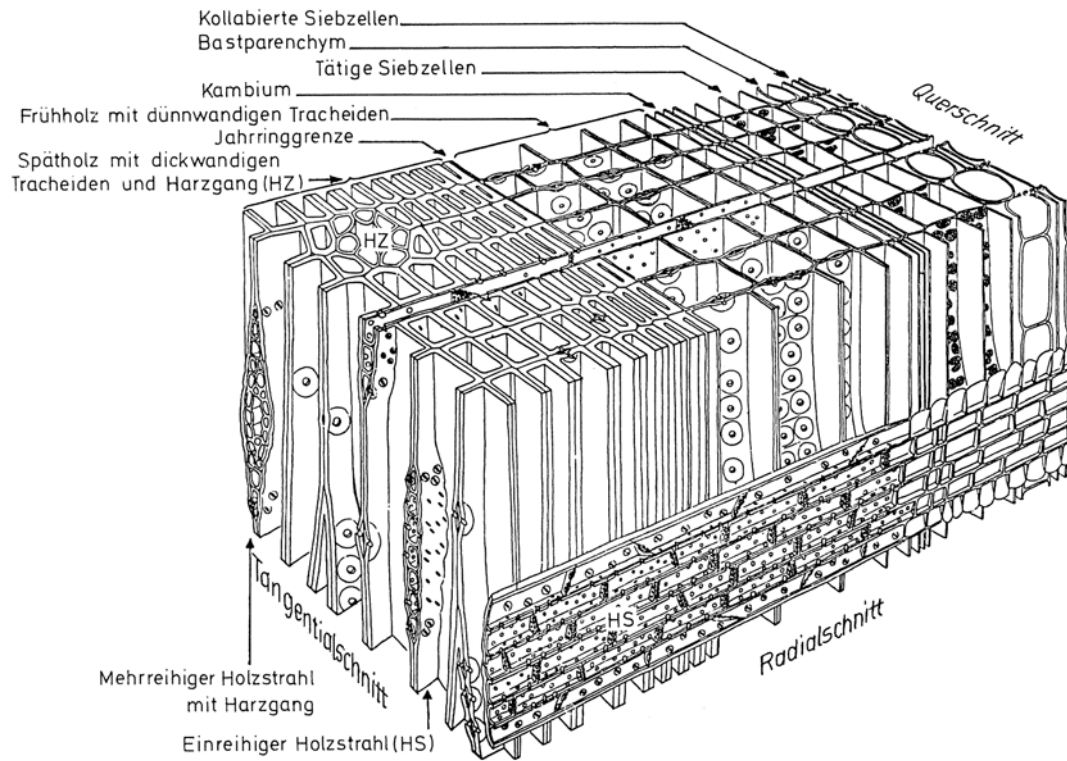


Abbildung 1.3.: Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche); (nach [Mägdefrau, 1951])

Bildung von Jahresringen

Die Stärkezunahme von Bäumen, verursacht durch Wachstum, ist ein Prozess, der von vielen klimatischen Faktoren abhängt. Besonders außerhalb der tropischen und subtropischen Gebiete kommt es im Winter zu einem vorübergehenden Einfrieren des Wachstumsprozesses. Dies führt zu deutlichen Abgrenzungen der jährlichen Wachstumsinkremente. Die ringförmige Bildungsschicht zwischen Splintholz und Rinde wird als Kambium bezeichnet. Unter stetiger Vergrößerung seines Umfanges scheidet das Kambium nach innen Xylem¹¹ und nach aussen Phloem¹² ab (siehe Abbildung 1.3) [Grosser, 1977].

¹¹Xylem (*xylos* griech. = Holz), Holzzellen (in Nadelholz Längs- und Quertracheiden, Längs- und Strahlparenchym und Epithelzellen der vertikalen und horizontalen Harzkanäle), welche im Gegensatz zum Phloem im Reifezustand abgestorben sind.

¹²Phloem (Bast, Innenrinde) ist verantwortlich für Nährstofftransporte und besteht aus lebenden Zellen. Umgeben wird es von der Aussenrinde, Borke, dessen Zellen abgestorben sind.

1. Einführung

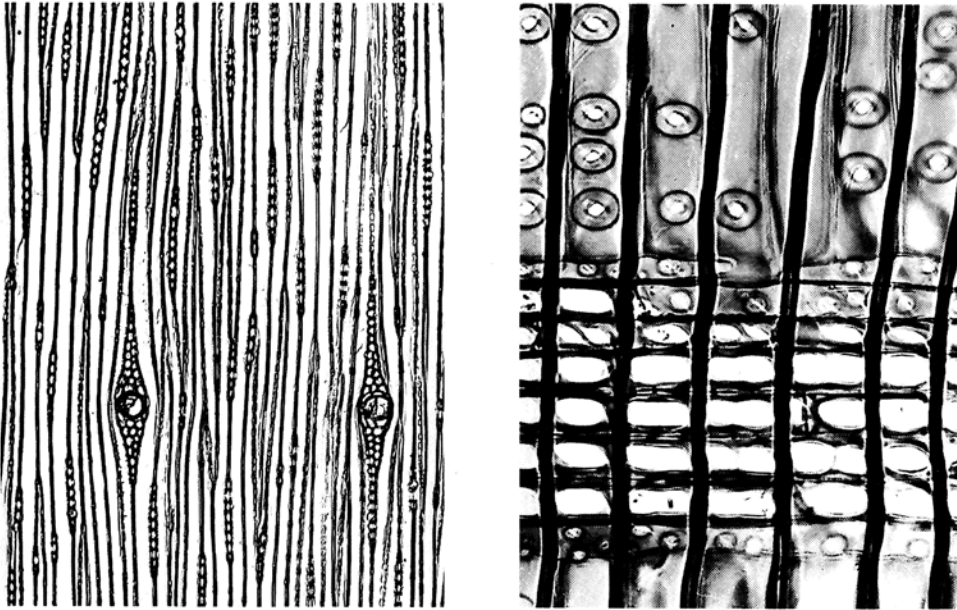


Abbildung 1.4.: *Tangential- (links, Vergrößerung 60-fach) und Radial-schnitt (rechts, Vergrößerung 260-fach) Pinus Cembra (aus [Grosser, 1977])*

Neben Abhängigkeiten von Spezies und anderem bestimmt der Niederschlag, wenn dieser der bestimmende Klimafaktor ist, die Breite der Jahresringe. Deren Dichte wird durch die durchschnittliche Temperatur während der Wachstumsphase bestimmt. Da unter anderem auch Schädlingsbefall, Verletzungen des Baumes, Klima der vorangegangenen Jahre, etc. Einfluss auf das Wachstum nehmen, stellen die verschiedenen Ringparameter nur eine Zusammenfassung eines sehr komplexen Systems von verschiedenen Einflüssen dar [Cutter und Guyette, 1993]. Beispielsweise kann ein Zusammenhang zwischen starken Cu- und Zn-Verschmutzungen in Föhren (*Pinus sylvestris* L.¹³) und gehemmten Wachstum gefunden werden [Symeonides, 1979].

Das jährliche Wachstum von Bäumen schließt Reaktionen auf Umwelteinflüsse ein. Daher weisen verschiedene Bäume in einem Gebiet mit vergleichbaren Bodenbedingungen ein ähnliches Wachstumsverhalten auf [Cichocki, 2000].

Jahresringchronologie

Durch Herstellung eines geeigneten Querschnitts durch Abschneiden einer Scheibe bzw. Ziehen eines radialen Bohrkernes können die Breiten der Jahresringe eines Baumes bestimmt werden. Zur Bestimmung der Breite eines Jahresringes werden zumindest zwei Radii gemessen. Der Durchschnitt dieser Radii erlaubt

¹³Carl von Linné (1707 - 1778), schwedischer Naturwissenschaftler, entwickelte die Grundlagen der modernen Taxonomie, das *Linnésche System*.

biologische Ungleichheiten zu kompensieren.

Zwei Proben, welche zur selben Zeit unter denselben klimatischen Bedingungen gewachsen sind, werden eine statistisch signifikante Korrelation der Verteilungen der Jahresringbreiten aufweisen. Diese Muster sind für jeden Zeitraum, jede Klimaregion, und in manchen Fällen auch ausschließlich für eine bestimmte Gattung von Bäumen, anzuwenden. Durch Überlagerung verschiedener Ringmuster, *Crossdating*, wird es möglich, relative Zeitabstände zwischen einzelnen Proben zu bestimmen. Durch Überlappung vieler Proben verschiedener Zeitperioden kann eine Jahresringchronologie erstellt werden. Gibt es innerhalb der dazu betrachteten Proben keine absolut datierte Probe, so spricht man von einer gleitenden Chronologie [Cichocki, 2000].

Datierung

Um eine Probe zu datieren, werden die Jahresringbreiten mit Standard Jahresringchronologien verglichen. Daraus wird die bestpassende zeitliche Einordnung bestimmt. Ein charakteristisches Maß der Übereinstimmung ist die Gleichläufigkeit, die synchrone Zu- oder Abnahme von Jahresringbreiten, zweier Proben. In Jahresringstandards werden solche Jahre, ab einer Übereinstimmung des Wachstumstrends von über 75% in allen Proben, hervorgehoben. Diese Jahre mit einem außergewöhnlich hohen Einfluss auf das Wachstum der Bäume werden auch *pointer years* genannt und speziell markiert. In zweifelhaften Fällen werden nur solche *pointer years* zur Datierung herangezogen.

In Jahren schwachen Wachstums kann das vollständige Fehlen eines oder gar mehrerer Jahresringe auftreten. Werden solche fehlenden Ringe nicht erkannt, ist diese Probe nicht in Übereinstimmung zu dem dazugehörigen Standard. Besonders irreführend ist dies beim Bilden eines neuen Standards. Durch Vergleich vieler Proben können fehlende Jahresringe erkannt werden, da diese gewöhnlich nicht in allen Proben vollständig fehlen.

In Zeiträumen niedriger Temperatur kommt es ebenfalls zur Bildung eines Ringes. Diese Ringe innerhalb von Jahresringen weisen jedoch glattere Übergänge auf, woran sie mit Hilfe eines Mikroskops identifiziert werden können.

Um Unklarheiten bezüglich der Datierung einer Probe zu vermeiden, wird für gewöhnlich der äußerste, somit auch der jüngste, Jahresring zur absoluten Datierung der Probe herangezogen [Cichocki, 2000].

1.4. Chemische Analysen von Jahresringen

In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten wurden Zusammenhänge von Umwelteinflüssen auf die chemische Zusammensetzung und Spurenelementkonzentrationen in Jahresringen untersucht und bewertet, [Padilla und Anderson, 2002] und [Watmough, 1997]. Dabei wurden folgende Einflüsse gesondert betrachtet und untersucht.

Vulkanische Aktivitäten

In der Fragestellung der absoluten Datierung von vulkanischen Eruptionen mittels chemischen Analysen von Jahresringen zeichnet die vorhandene Literatur ein optimistisches Bild [Pearson u. a., 2005]. 1990 findet G. S. Hall in zu den Jahren 1478 und 1490 korrespondierenden Jahresringen erhöhte Konzentrationen der Seltenen Erden Ce, Nd, La und Sm. Diese erhöhten Konzentrationen in Bäumen 15km nordöstlich des Vulkans Mount St. Helens (Washington, USA) korrelieren mit vergangenen Eruptionen dieses Vulkans [Hall u. a., 1990]. In schwedischen Bäumen wurden Spuren von Bi und Mn, korrelierend zu einer Askja (Island) Eruption 1875 gefunden. Jedoch können diese Indikatoren nicht bei anderen bekannten Eruptionen beobachtet werden [Pearson u. a., 2006]. Eine weitere Studie zeigt im Zusammenhang zu einem Ausbruch des Popocatepetl (Mexiko) im Jahr 2000, erhöhte Zn- und Fe-Konzentrationen. Diese Elemente wurden auch in den vulkanischen Emissionen erhöht festgestellt [Calva-Vázquez u. a., 2006]. [Ünlü u. a., 2005] stellen einen Zusammenhang zwischen vulkanischen Aktivitäten und Schwankungen in Au-Konzentrationen fest. Aus diesem breiten Spektrum verschiedener Beobachtungen ging bisher kein eindeutig geeigneter Marker für Vulkanismus hervor. Die verschiedenen Resultate zeigen vielmehr die Komplexität und Vielfalt der Einflüsse, die in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen.

Industrielle Beeinflussung der Umwelt

Die industriellen Belastungen der Umwelt nahmen im 20. Jahrhundert signifikant zu. Dies spiegelt sich auch in einer Zunahme der zugehörigen Elementkonzentrationen in den entsprechenden Jahresringen wieder. Untersucht wurden Variationen von Spurenelementkonzentrationen aufgrund fossiler Verbrennung [Nagj u. a., 1987], dem Einfluss vergangener Schwefelverschmutzungen in der Atmosphäre [Kawamura u. a., 2006], Bleiverschmutzungen, [Bindler u. a., 2004] und [Watmough u. a., 1999a], und Einflüsse der Metallindustrie auf die unmittelbare Umgebung, [Watmough und Hutchinson, 1996] und [Brackhage u. a., 1996]. Am Beispiel der Studie [Watmough und Hutchinson, 2003] zeigt sich abermals die Komplexität, in welcher sich Umgebungseinflüsse auf Elementkonzentrationen in Jahresringen auswirken. Untersucht wurde die Umgebung einer Cu-Cd Raffinerie, wobei Jahresringe vier verschiedener Spezies (*Acer pseudoplatanus*, Bergahorn; *Tilia europaea*, Linden; *Fraxinus excelsior*, Esche und *Fagus sylvatica*, Buche) betrachtet wurden. Die ermittelten Elementkonzentrationen ergaben Abhängigkeiten sowohl vom betrachteten chemischen Element, als auch von der Art des betrachteten Baumes.

In der Amerikanischen Rotfichte, *Picea rubens*, kann in industrialisierten Gebieten eine erhöhte Konzentration von Mn, Fe und Al beobachtet werden [Zayed u. a., 1992].

Mit der Zunahme von Al-verarbeitender Industrie können in Jahresringen

von Schwarz-Fichten, *Picea mariana*, zunehmende Al-Konzentrationen festgestellt werden. Die Al-Aufnahme der untersuchten Bäume korreliert mit dem Säuregehalt im Boden. Es gelang anhand der Untersuchungen an verschiedenen Standorten eine räumliche Auflösung der Verschmutzung zu ermitteln, eine zeitliche Auflösung durch Betrachtung der Jahresringe war jedoch nicht möglich [Dion u. a., 1993].

Auch indirekte Nachweise der Ablagerung von Spurenelementen in Bäumen, beispielsweise in den Abwässern der Zellstoffindustrie in Norwegen [Skipperud u. a., 1998], konnten geführt werden.

1.5. Aufnahme und Mobilität chemischer Elemente in Bäumen

Die Aufnahme chemischer Elemente in Bäumen kann über die Wurzeln, Laub- bzw. Nadelwerk und die Baumrinde erfolgen, [Lepp, 1975] und [Tendel und Wolf, 1988]. Hierzu ist nur punktuell Wissen über spezifische Paarungen zwischen Elementen und Gattungen vorhanden. Eine Studie zeigt beispielsweise, dass die Aufnahme von ^{67}Zn und ^{207}Pb über Blätter bzw. Nadeln in Setzlingen der Weiß-Fichte (*Picea glauca*) nicht wesentlich ist [Watmough u. a., 1999b]. Derselbe Autor untersucht die Zusammenhänge von Spurenelementkonzentrationen in Atmosphäre, Boden und Jahresringen, sowie die Mobilität derselben [Watmough, 1999]. Unterschiedliche Resultate für verschiedene Elemente werden hierbei erzielt. [Hayashi u. a., 2003] finden eine gleichmäßige, abnehmende Tendenz der Verteilung von Mg in Jahresringen der Sichelanne/Japanische Zeder (*Cryptomeria japonica*) und im Stamm eines indonesischen Regenwaldbaumes (*Alstonia*), welcher keine Jahresringe aufweist.

Die Verteilung von Arsen hingegen ist in Obstbäumen begrenzt auf das so genannte Kernholz, nahe dem Mark. Damit eignet es sich nicht zur Erstellung einer Chronologie der As-Belastung der Umwelt [Martin u. a., 2000].

Bei Zuckerahorn (*Acer saccharum*) kann die Aufnahme von Spurenelementen durch säurehaltigen Dünger ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) gesteigert werden [Hutchinson u. a., 1998].

Auch Abhängigkeiten der Spurenelementkonzentrationen vom Zeitpunkt der Probenahme sind bekannt. Bei ausgewachsenen Buchen (*Fagus sylvatica* L.) wird ein mit den Jahreszeiten schwankendes Ni-Konzentrationslevel festgestellt. Die radiale Konzentrationsverteilung hingegen bleibt unverändert [Hagemeyer u. a., 1994]. Die Verwendung von Ni zur Datierung von erhöhten Ni-Belastungen der Umwelt ist durch dieses Verhalten in *Fagus sylvatica* nicht möglich.

Die Mobilität chemischer Elemente im Kernholz von Bäumen wurde in Abhängigkeit von Löslichkeit und anderen Elementeigenschaften kategorisiert (siehe Tabelle 1.1).

1. Einführung

| geringe Mobilität | mäßige Mobilität | hohe Mobilität |
|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Fe, Mo, Ni, Sn, Sb, Ba, Al, Pb, Cd | Ca, Sr, Mn, Zn, Rb, Cu, Mo | As, K, Na, Mg, P, N, S, Cl, B |

Tabelle 1.1.: *Mobilität chemischer Elemente in Xylem. Die Kategorisierung der Elemente erfolgte aufgrund von Löslichkeit, dem Verhältnis von Ionenladung zu Ionenradius und dem grundlegenden Charakter der Elemente (nach [Cutter und Guyette, 1993]).*

2. Analysenmethoden

In der Spurenelementanalytik von Jahresringen in Bäumen werden vorwiegend die im Folgenden dargestellten Analysenmethoden eingesetzt.

2.1. Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy

Physikalisches Prinzip

Bei der Verwendung von Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (ICP-MS) werden die Atome der zu analysierenden Probe unter Verwendung eines Trägergases (meist Argon wegen seiner leichten Ionisierbarkeit) in einem Plasma bei einer Temperatur von circa 5000 – 10000 K ionisiert. Dies geschieht mittels einer hochfrequenten Anregung über eine elektromagnetische Spule (inductively coupled). Die Ionen werden dann durch zwei Blenden, Sampler und Skimmer, ins Massenspektrometer geführt. In einer Ionenoptik wird der Ionenstrahl fokussiert und anschließend die Ionen nach unterschiedlicher Masse getrennt [Krause, 1993].

Anwendung

ICP-MS wird sowohl in der qualitativen als auch in der quantitativen Elementanalytik verwendet. Dies umfasst verschiedenste umweltanalytische Aufgaben, wie Lebensmittelauthentifizierungen und -analytik, Altersbestimmung geologischer Proben, und weitere. Elemente können ab einer Ordnungszahl $Z = 7$ (Li) erfasst werden.

2.2. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry

Physikalisches Prinzip

Auch Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometry (ICP-AES) verwendet ein induktiv gekoppeltes Plasma mit Temperaturen von 5000 – 10000 K. Die Probe wird als Aerosol in das Plasma (meist Argon) eingebracht.

2. Analysenmethoden

Dort werden die Atome und Ionen zur Emission von Photonen einer elementspezifischen Wellenlänge λ angeregt. Im Spektrometer wird durch Bragg-Reflexion (Bragg-Gleichung 2.1 erfüllt) an einem Monochromator (d Abstand zweier paralleler Gitterebenen) die gewünschte Wellenlänge betrachtet.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (2.1)$$

Die Geräte zur ICP-AES unterscheiden sich grundsätzlich in simultan und sequentiell arbeitende Systeme. Bei letzterer Methode werden alle Emissionslinien im gesamten Spektralbereich (beispielsweise 170 – 900 nm) erfasst. Die Einrichtung und Durchführung der Messungen in den dazu notwendigen Winkelstellungen des Monochromators ist zeitlich aufwendig. Wird hingegen simultan gearbeitet, werden fest eingestellte Winkelstellungen gemessen. Die Messwertfassung für die verschiedenen Wellenlängen erfolgt simultan. Einen Nachteil dieser Methode stellt die eingeschränkte Erfassung des Spektrums dar [Ullmann und Ringer, 1986].

Anwendung

ICP-AES findet Anwendung in der Bestimmung von Nährelementen und Schwermetallen in Feststoffen (Pflanzen, Boden, etc.) nach Elution, sowie in der Wasser- und Abwasseranalytik.

2.3. X-Ray Fluorescence

Physikalisches Prinzip

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) geht auf Versuche von Richard Glocker und Hans-Wilhelm Schreiber (1929) zurück. Die Probe wird durch polychromatische Röntgen- oder niederenergetische Gammastrahlung angeregt. Elektronen der Probenatome werden dabei von inneren Elektronenhüllen auf höhere Energieniveaus gebracht. Gehen Elektronen wieder in den freigewordenen Grundzustand über, werden, in Konkurrenz zur Emission von Augerelektronen, Photonen elementspezifischer Wellenlänge erzeugt (Fluoreszenz). Diese Röntgenstrahlung wird detektiert und ermöglicht die Element- und Konzentrationsbestimmung der chemischen Elemente der Probe. Unterschieden wird dabei in energie- und wellenlängendispersive Detektorsysteme. Nachgewiesen werden können alle Elemente ab der Ordnungszahl $Z = 9$ (Fluor). Besonders bei Elementen hoher Ordnungszahlen kann eine hohe Empfindlichkeit erreicht werden [Müller, 1967].

Anwendung

Heute am häufigsten eingesetzte Methode zur qualitativen und quantitativen Bestimmung atomarer Zusammensetzungen, da die Probe durch die Messung

nicht zerstört wird. Weite Verbreitung findet XRF in der metallverarbeitenden Industrie, bei der Untersuchung von Glas, Keramik, Baustoffen, der Analyse von Schmierstoffen und Mineralölprodukten, etc. (siehe Abbildung 2.1) [Agarwal, 1991].

2.4. Proton/Particle Induced X-Ray Emission

Physikalisches Prinzip

Bei der Proton/Partikel-induzierten Röntgenemission (PIXE) wird die Oberfläche der Proben mit Protonen/Ionen beschossen. Dieser Beschuss führt zum Herausschlagen von Elektronen der inneren Schalen der Probenatome. Durch Besetzen der freiwerdenden Plätze in den niederenergetischen Elektronenhüllen durch Elektronen höherenergetischer Niveaus wird charakteristische Röntgenstrahlung emittiert [Lapatto, 1990].

Anwendung

Bei der Anwendung von PIXE sind nur geringe Protonenflüsse notwendig. Daher können Proben auch an Luft gemessen werden. Das Verfahren eignet sich damit auch für große und empfindliche Objekte. Ein Beispiel ist die Anwendung zur Untersuchung Leonardo da Vincis Madonnenbild *Madonna dei fusi* (siehe Abbildung 2.1). Eingesetzt wird PIXE vielseitig zur Spurenelementbestimmung in biologischen, archäologischen, geologischen und medizinischen Anwendungen [Govil, 2001].

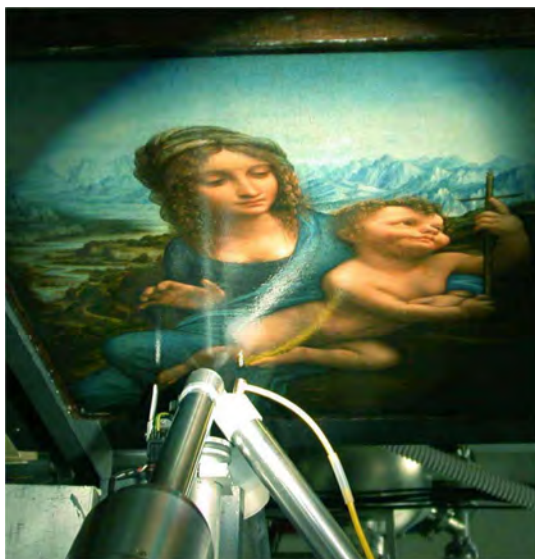


Abbildung 2.1.: Einsatz von PIXE und XRF zur Untersuchung Leonardo da Vincis Madonnenbild *Madonna dei fusi* [Grassi u. a., 2005]

2.5. Neutronenaktivierungsanalyse

Physikalisches Prinzip

Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) erlaubt das Untersuchen einzelner Elementkonzentrationen unabhängig von der chemischen Form bzw. der chemischen Bindungen einer Probe, da sich dieses Analyseverfahren direkt auf die Atomkerne der Probe richtet. In einem Kernreaktor oder mittels einer Neutronenquelle wird die Probe mit Neutronen bestrahlt. Dabei werden die Atomkerne der Probe in angeregte Zustände versetzt. Nach der Bestrahlung (wenige Sekunden bis zu mehreren Tagen) und einer eventuellen Abklingphase, werden in einem Detektor die beim Übergang der Kerne in den energetischen Grundzustand auftretenden Gammaemissionen gemessen. Die elementspezifischen Gammaspektren ermöglichen eine Identifizierung der Atomkerne.

Anwendung

NAA kann für eine Vielzahl verschiedener Elemente eingesetzt werden. Ob eine Anwendung möglich ist, hängt insbesondere vom verfügbaren Neutronenfluss bei der Bestrahlung der Probe, dem Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfangprozesse (siehe Abbildung 3.3) der betrachteten Atomkerne im Grundzustand und der Halbwertsdauer der angeregten Atomkerne ab.

3. Neutronenaktivierungsanalyse

Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) ist eine radiochemische Analysemethode zur qualitativen und quantitativen Bestimmung chemischer Elemente. NAA beruht auf der Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen einer Probe. Die daraus resultierende Aktivität der erzeugten Isotope wird in Zusammenhang mit der Konzentration der Atomkerne in der Probe gesetzt.

3.1. Grundlagen

3.1.1. Radioaktivität und Zerfallsarten

Antoine Henri Becquerel¹ entdeckte 1896 die Schwärzung fotografischer Platten durch Uransalze. Er fand damit eine unsichtbare und durchdringende Strahlenart und gilt seither als Entdecker der Radioaktivität.

Radioaktivität (lat. *radius*, Strahl) bzw. radioaktiver Zerfall charakterisiert das Verhalten von Nukliden in instabilen Zuständen, Radionukliden (siehe Karlsruher Nuklidkarte [Magill u. a., 2006]). Die Art der dabei auftretenden spontanen Energieabgabe (siehe Anhang A, Bindungsenergie von Kernen) führt zur Klassifizierung des Zerfalls.

Ein radioaktiver Zerfall erfolgt nicht deterministisch. Folglich kann nur eine Zerfallswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit, die Zerfallskonstante λ , angegeben werden. Dies wird in folgender Differentialgleichung beschrieben.

$$dN(t) = -\lambda N(t) dt \quad (3.1)$$

N steht für die Anzahl der betrachteten Radionuklide. Die reziproke Zerfallskonstante bestimmt die mittlere Lebensdauer $\tau = 1/\lambda$ eines Radionuklids. Üblicherweise wird die Zerfallswahrscheinlichkeit über die Halbwertszeit $T_{1/2}$ angegeben.

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (3.2)$$

Diese anschauliche Größe gibt die Zeit an, während welcher eine ursprüngliche Stoffmenge N_0 durch radioaktiven Zerfall um die Hälfte reduziert wird. Das radioaktive Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

¹Antoine Henri Becquerel (1852 - 1908), französischer Physiker, 1903 Nobelpreis für Physik

3. Neutronenaktivierungsanalyse

lässt sich unter Verwendung von Gleichung 3.2 vereinfacht darstellen.

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (3.4)$$

α -Strahlung

Unter einem α -Zerfall wird der Zerfall eines Radionuklids unter Emission eines α -Teilchens (eines Heliumkerns, ${}^4_2\text{He}^{2+}$) verstanden. Die dabei auftretende Teilchenstrahlung wird auch als α -Strahlung bezeichnet. α -Strahler weisen diskrete Emissionsenergien, ein Linienspektrum, auf. Da α -Teilchen eine elektrische Ladung und relativ hohe Masse, $m_\alpha = 4 \text{ u}$, aufweisen, sind die Eindringtiefen in Materie sehr gering. Zu ihrer Abschirmung genügt ein Blatt Papier. Die α -Strahlung wird für den Menschen erst bei Inkorporation aufgrund ihrer hohen Ionisationsdichte gefährlich. Bei Auftreten eines α -Zerfalls wird die Massenzahl eines Radionuklids um 4, die Ordnungszahl um 2 verringert.



Da α -Strahlung in Materie eine sehr geringe Reichweite besitzt, können sich α -Strahler hoher Dichte und relativ kurzer Halbwertszeit $T_{1/2}$ ohne externe Energiezufuhr, durch Absorption der eigenen α -Strahlung, bis zur Rotglut erhitzen (beispielsweise ${}^{238}\text{Pu}$). Diese Eigenschaft wird in Batteriesystemen der Raumfahrt eingesetzt [Rosenberg und Johnson, 2006].

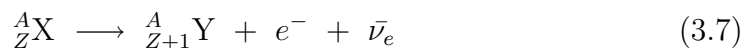
β -Strahlung

β -Zerfall beschreibt die Umwandlung eines instabilen Kerns durch Umwandlung eines seiner Nukleonen. Es gilt drei Arten des Zerfalls zu unterscheiden.

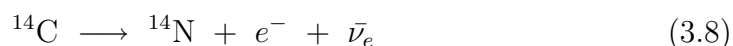
Beim β^- -Zerfall wandelt sich im Kern eines instabilen Isotops ein Neutron n in ein Proton p um. Dieser Prozess beruht auf der schwachen Wechselwirkung und erfordert neben der Emission eines Elektrons e^- die gleichzeitige Emission eines Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$ (Leptonenzahlerhaltung der Schwachen Wechselwirkung). Dies wird im Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschrieben (siehe Abbildung 3.1).



bzw.



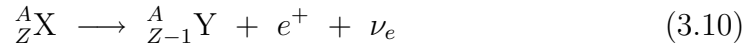
Ein Beispiel eines β^- -Zerfalls ist der Zerfall von ${}^{14}\text{C}$.



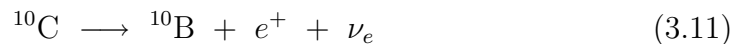
Beim β^+ -Zerfall wandelt sich, unter Emission eines Positrons e^+ und eines Elektron-Neutrinos ν_e , ein Proton p in ein Neutron n um.



bzw.



Diese Reaktion erfolgt beispielsweise beim Zerfall von ${}^{10}\text{C}$.



Die emittierten Leptonen (e^- bzw. e^+) können aufgrund ihrer geringen Masse sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen. Durch ihre Wechselwirkung mit Materie kann β^+ -Strahlung mit einigen mm dicken Absorbern abgeschirmt werden. Dabei werden im Absorbermaterial möglichst leichte Atome eingesetzt, um Bremsstrahlung zu vermeiden. In der Luft liegt die Reichweite, abhängig von der Energie der Strahlung, bei einigen Metern. Strahlenschäden treten bei Inkorporation von β -Strahlern auf (Schilddrüsenkrebs bei Aufnahme von ${}^{131}\text{I}$). An der menschlichen Haut kann es zu intensiven Verbrennungen und weiteren Spätfolgen (Hautkrebs) kommen.

In protonenreichen Atomen kommt es zum *Elektroneneinfang*, welcher auch dem β -Zerfall zugeordnet wird. Ein Proton tritt mit einem Hüllenelektron in Wechselwirkung. Es bildet sich ein Neutron unter Emission eines Elektron-Neutrinos ν_e .



bzw.



γ -Emissionen

γ -Strahlung ist Teil des elektromagnetischen Strahlungsspektrums. Elektromagnetische Strahlung wird in Form von Photonen emittiert. Entdeckt wurde dieser Anteil radioaktiver Strahlung, welcher sich in magnetischen Feldern nicht ablenken lässt und ein hohes Durchdringungsvermögen in Materie aufzeigt, 1900 von Paul Ulrich Villard². Das hohe Durchdringungsvermögen in Materie ist auf das Fehlen einer Ladung des Photons zurückzuführen, daher wird dieses auch in Magnetfeldern nicht abgelenkt. Bei der Durchdringung von Materie treten in Konkurrenz Photoeffekt, Paarbildung und Comptoneffekt auf.

²Paul Ulrich Villard (1860 - 1934), französischer Chemiker

3. Neutronenaktivierungsanalyse

Die Wellenlängen von γ -Strahlung sind mit der von Röntgenstrahlung vergleichbar (kurzwellig). Unterschieden wird γ - und Röntgenstrahlung nach ihrem Ursprung. γ -Strahlung hat ihren Ursprung in Kernprozessen. Der Kern ändert bei Emission eines γ -Quants weder seine Massen- noch seine Ordnungszahl. Die abgegebene Energie rührt von einem angeregten instabilen Zustand des Kerns, welcher durch einen vorangegangenen α -, β -, oder ebenfalls eines γ -Zerfalls oder durch Kernreaktionen (inelastische Stöße eines Kerns mit anderen Teilchen bzw. anderen Kernen) herbeigeführt wurde. Bei Übergang der Energie des Kerns von der Anregungsenergie E_a in den Energiezustand des Grundzustandes E_G , wird ein Photon der Energie E_γ und Frequenz ν_γ emittiert.

$$E_\gamma = E_a - E_G = h \nu_\gamma \quad (3.14)$$

Da die Energiezustände eines Kerns quantisiert sind, erfolgt die Emission von Photonen diskreter Wellenlängen λ_γ .

$$\lambda_\gamma = c / \nu_\gamma \quad (3.15)$$

Diese Wellenlängen sind charakteristisch für die emittierenden radioaktiven Nuklide und werden bei der NAA zur Identifizierung derselben herangezogen. Praktische Anwendung finden γ -Strahler beispielsweise bei Bestrahlungen in technischen und medizinischen Einsatzgebieten. Oft wird hierbei das Co-Isotop ^{60}Co eingesetzt.

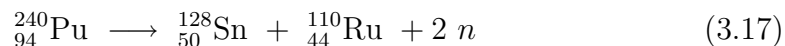
Innere Konversion Die Abregung angeregter Energiezustände von Kernisomeren³ kann auch durch direkte Anregung eines Hüllenelektrons erfolgen. Dieses wird dann aus einer inneren Schale emittiert. Die Energie des emittierten Elektrons E_{e^-} ergibt sich nach Abzug der Bindungsenergie E_B der entsprechenden Elektronenhülle.

$$E_{e^-} = E_a - E_G - E_B \quad (3.16)$$

Durch innere Konversion emittierte Elektronen werden als *Konversionselektronen* bezeichnet. Das Verhältnis der Emissionswahrscheinlichkeiten von Konversionselektronen und γ -Photonen wird als *Konversionskoeffizient* bezeichnet.

Spontanspaltung von Kernen

Spontane Spaltung wird bei schweren Atomkernen (ab ^{232}Th) beobachtet. Die Kerne spalten sich spontan, ohne äußere Einwirkung, in zwei oder mehrere ähnlich große Teile auf. Die Spaltung erfolgt meist unter Emission von γ -Photonen bzw. Neutronen. Bei $^{240}_{94}\text{Pu}$ kann eine spontane Kernspaltung in folgender Form beobachtet werden.



³*isos* (griech.) = gleich und *meros* (griech.) = Teil; Kernisomere sind Atome deren Kerne gleiche Kernladungs- und Massenzahl besitzen, sich jedoch in unterschiedlichen Energiezuständen befinden.

Emission leichter und mittelschwerer Kerne

Die Emission leichter und mittelschwerer Kerne wird auch als *Cluster-Emission* bezeichnet. Ein Beispiel stellt der Zerfall von ^{223}Ra dar.



Protonenzerfall

Kerne mit sehr hohem Protonenüberschuss (^{112}Cs , ^{113}Cs , ^{109}I , ^{103}Sb , ^{131}Eu , ^{141}Ho , ^{145}Tm) können über die Emission eines Protons zerfallen [Magill u. a., 2006].

3.1.2. Neutronen

Das Neutron n ist neben dem Proton p ein Nukleon und gehört zur Gruppe der Hadronen. Hadronen werden nach ihrer Zusammensetzung aus Quarks in Mesonen (Zusammensetzung aus Quark und Antiquark) und Baryonen (Zusammensetzung aus drei Quarks bzw. drei Antiquarks) unterschieden. Das Neutron ist ein Baryon und setzt sich aus zwei d -Quarks und einem u -Quark zusammen. Das elektrisch neutrale Neutron besitzt den Spin $1/2$, und gehört daher zur Gruppe der Fermionen. Die Entdeckung des Neutrons geht auf Sir James Chadwick⁴ 1932 zurück.

Die Masse des Neutrons m_n ist bekannt [Yao, 2006].

$$m_n = 939.565360 \pm 0.000081 \text{ MeV} \quad (3.19)$$

bzw.

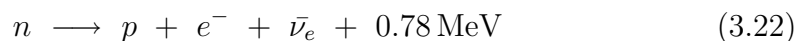
$$m_n = 1.00866491560 \pm 0.00000000055 \text{ u} \quad (3.20)$$

Während Neutronen gebunden in Kernen stabil sind, zerfallen freie Neutronen über β^- -Zerfall mit einer mittleren Lebensdauer τ_n [Yao, 2006].

$$\tau_n = 885.7 \pm 0.8 \text{ s} \quad (3.21)$$

Neutronenzerfall

Freie Neutronen sind instabil und zerfallen über β^- -Zerfall in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Elektronneutrino. Das emittierte Elektron trägt dabei in Form von kinetischer Energie die auftretende Energiedifferenz von 0.78 MeV (siehe Abbildung 3.1).



⁴Sir James Chadwick (1891 - 1974), englischer Physiker; 1935 Nobelpreis für Physik für die Entdeckung des Neutrons

3. Neutronenaktivierungsanalyse

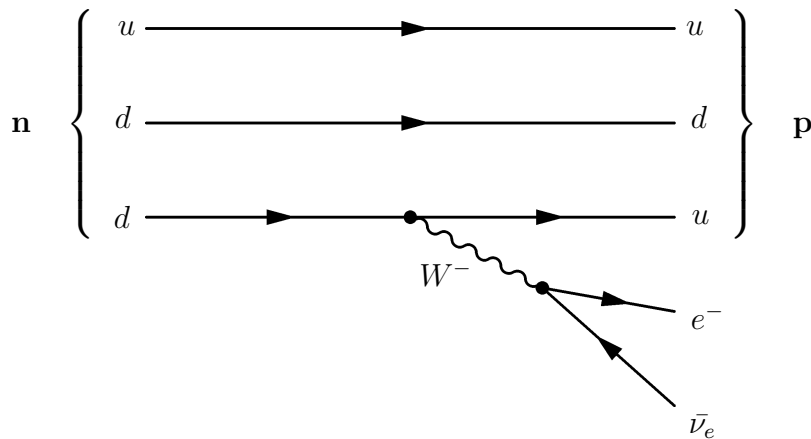


Abbildung 3.1.: Feynmandiagramm⁵ des Zerfalls eines Neutrons n in ein Proton p unter Emission eines Elektrons e^- und eines Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$. Vermittelt wird die Wechselwirkung durch ein W^- -Boson, einem Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung.

Klassifizierung

Da der Wirkungsquerschnitt (siehe 3.1.3) von Reaktionen von Neutronen mit anderen Teilchen stark mit der kinetischen Energie der Neutronen variiert, etablierte sich eine entsprechende Einteilung (siehe Tabelle 3.1). Viele Atomkerne besitzen einen hohen Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfangprozesse mit *Thermische Neutronen* (“langsame Neutronen”). Die dabei entstehenden Isotope sind oft radioaktiv. In Kernreaktoren wird dieser Prozess gezielt durch *Moderation*⁶ von schnellen Neutronen gefördert. Durch auf Neutroneneinfang folgende Kernspaltungen kommt es zu einer Kettenreaktion.

Reaktorneutronen

Bei der Spaltung von ^{235}U werden Neutronen im Energiebereich zwischen 0 und 25 MeV emittiert. Durch elastische Streuung der Neutronen an Moderatoratomen (beispielsweise H) wird eine Energieverteilung $\Phi_{epi}(E)$, welche sich

⁵Richard Phillips Feynman (1918 - 1988), US-amerikanischer Physiker; 1965 Nobelpreis für Physik; Seine Darstellungsform quantenfeldtheoretischer elementarer Wechselwirkungen, Feynmandiagramme, findet heute weite Verbreitung.

⁶*moderare* lat. = mäßigen, steuern, lenken; Moderatoren nehmen schnellen Neutronen durch mehrfache elastische Stöße mit Atomkernen Energie. Geeignete Moderatormaterialien sind Materialien leichter Atomkerne. In Reaktoren zur Moderation eingesetzt wird Wasserstoff, Deuterium bzw. Kohlenstoff.

| Bezeichnung | mittlere kinetische Energie |
|---------------------------|-----------------------------|
| subthermische Neutronen | <0.02 eV |
| thermische Neutronen | 25.2 meV |
| epithermische Neutronen | <0.05 eV |
| mittelschnelle Neutronen | 0.05 eV .. 10 keV |
| schnelle Neutronen | 10 keV .. 5 MeV |
| relativistische Neutronen | >5 MeV |

Tabelle 3.1.: *Klassifizierung von Neutronen nach ihrer kinetischen Energie [Maringer, 2005]. Die angegebenen Energiegrenzen werden unterschiedlich definiert.*

annähernd proportional zu E^{-1} verhält, erreicht.

$$\Phi_{epi}(E) \sim E^{-1} \quad (3.23)$$

Diese Parametrisierung des epithermischen Neutronenspektrums kann für Moderatoren mit unbedeutender Neutronenabsorption angewandt werden. Die Normierung ergibt sich in Abhängigkeit von Reaktortyp, Brennelementzusammensetzung und Position der Bestrahlung im Reaktorkern.

Erreichen die Neutronen das thermische Gleichgewicht, so wird das Spektrum $\Phi_{th}(E)$ durch eine Maxwell-Boltzmann Verteilung beschrieben. Bei einer Temperatur des Moderators T_M gilt mit der Boltzmannkonstante k_B folgende Darstellung.

$$\Phi_{th}(E) = \frac{E}{(k_B T_M)^2} e^{-\frac{E}{k_B T_M}} \quad (3.24)$$

Die übliche Parametrisierung für ein Reaktorneutronenspektrum besitzt folgende Form [De Soete u. a., 1972].

$$\Phi(E) = \begin{cases} \Phi_{th}(E) + \frac{1}{f} \Phi_{epi}(E) & k_B T_M > 5 \text{ eV} \\ \Phi_{th}(E) & k_B T_M \leq 5 \text{ eV} \end{cases} \quad (3.25)$$

In einem Forschungsreaktor liegt die Moderatortemperatur beispielsweise bei $T_M = 340 \text{ K}$. Die Verwendung dieses Zahlenwertes und der in Gleichung 3.25 angegebenen Parametrisierung ergibt ein Reaktorneutronenspektrum wie in Abbildung 3.2 dargestellt [Piepke, 2001]. Der Parameter f beschreibt das Verhältnis des über das gesamte Energiespektrum integrierten thermischen Neutronenflusses zu dem integrierten epithermischen Neutronenfluss.

3.1.3. Wirkungsquerschnitte

Ein Wirkungsquerschnitt σ stellt allgemein ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Reaktion dar.

$$[\sigma] = 1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2 \quad (3.26)$$

3. Neutronenaktivierungsanalyse

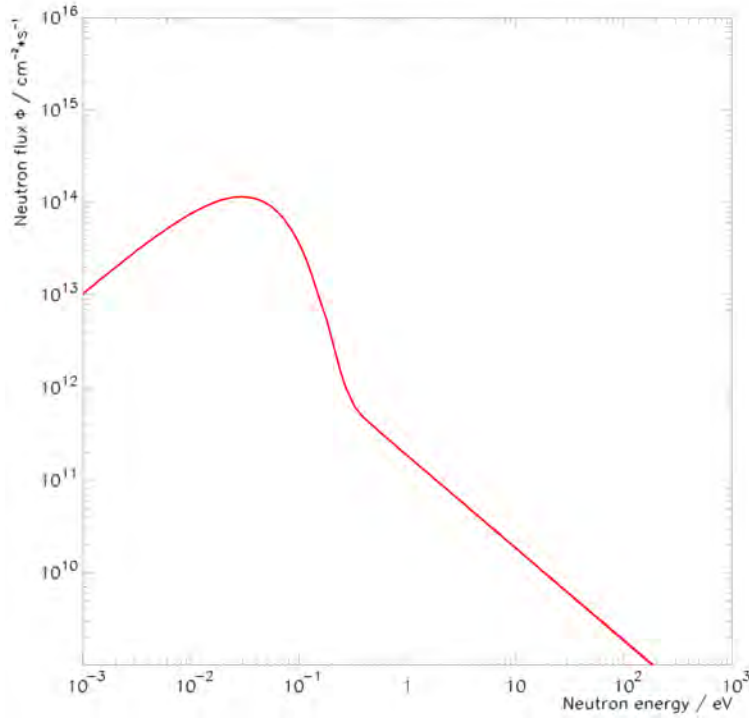


Abbildung 3.2.: Reaktorneutronenspektrum nach Gleichung 3.25 aus [Piepke, 2001]; (Andreas Piepke, University of Alabama, 2001)

Wirkungsquerschnitte sind für die betrachtete Art der Wechselwirkung, die beteiligten Teilchen, und die betrachteten Energien spezifisch. Bei Beschuss eines Targets mit Teilchen, gilt zwischen Wirkungsquerschnitt σ , mittlerer freier Weglänge λ und Target-Teilchendichte ρ_T folgender Zusammenhang.

$$\sigma = \frac{1}{\lambda \rho_T} \quad (3.27)$$

Für die NAA interessant sind die Wirkungsquerschnitte thermischer, epithermischer und schneller Neutronen bei *Neutroneneinfangprozessen* (siehe Abbildung 3.3). Der totale Wirkungsquerschnitt setzt sich dabei aus einem Streu- und einem Absorptionsanteil zusammen. Der Streuanteil kann in einen elastischen und einen inelastischen Anteil unterschieden werden. Beim Absorptionswirkungsquerschnitt erfolgt eine weitere Unterscheidung in Neutroneneinfangreaktionen und Kernspaltungen.

Ein gemittelter Wirkungsquerschnitt $\langle \sigma \rangle$ ergibt sich durch Integration.

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int \sigma(E) \Phi(E) dE}{\int \Phi(E) dE} \quad (3.28)$$

Es wird in einen thermischen $\langle \sigma_{th} \rangle$ und einen epithermischen Wirkungsquerschnitt $\langle \sigma_{epi} \rangle$ mit entsprechenden Integrationsgrenzen unterschieden. Werte für

Wirkungsquerschnitte können für die Integrationsgrenzen $E_l = 10^{-3}$ eV, $E_m = 5$ eV und $E_h = 10^6$ eV in Datenbanken gefunden werden.

$$\langle \sigma_{th} \rangle = \frac{\int_{E_l}^{E_m} \sigma(E) \Phi(E) dE}{\int_{E_l}^{E_m} \Phi(E) dE} \quad (3.29)$$

$$\langle \sigma_{epi} \rangle = \frac{\int_{E_m}^{E_h} \sigma(E) \Phi(E) dE}{\int_{E_m}^{E_h} \Phi(E) dE} \quad (3.30)$$

Aus den ermittelten Wirkungsquerschnitten ergibt sich das Bestreben, möglichst thermische Neutronen anwenden zu können, da diese einen gegenüber schnellen Neutronen signifikant höheren Wirkungsquerschnitt besitzen. Eine angestrebte Anregung bzw. Aktivierung wird somit deutlich wahrscheinlicher. Im höheren Energiebereich kommt es zu Resonanzphänomenen beim Neutroneneinfang. Dies führt zu verstärktem Neutroneneinfang bei diskreten Energien (siehe Peaks in Abbildung 3.3).

3.2. Physikalisches Prinzip

Bei Anwendung der NAA zur Konzentrationsbestimmung von chemischen Elementen einer Probe wird diese zunächst mittels Bestrahlung mit Neutronen aktiviert. Dabei werden Atomkerne der Probe in Radionuklide umgewandelt. Beim Zerfall der erzeugten Radionuklide wird die Intensität der charakteristischen Strahlung der zu betrachtenden Elemente gemessen. Daraus folgt die Berechnung der jeweiligen Konzentrationen wie in Abschnitt 3.2.4 angegeben. Die folgenden mathematischen Beschreibungen beziehen sich auf einen einstufigen Aktivierungsprozess⁷ ${}^A X(n, \gamma) {}^{A+1} X$, wie er beispielsweise in der Form von ${}^{23}\text{Na}(n, \gamma) {}^{24}\text{Na}$ beobachtbar ist.

⁷Nomenklatur von Kernreaktionen: ${}^x A(a, b) {}^y B$; ${}^x A$ Ausgangsnuklid, a Projektil, b Ejektil, ${}^y B$ erzeugtes Nuklid

3. Neutronenaktivierungsanalyse

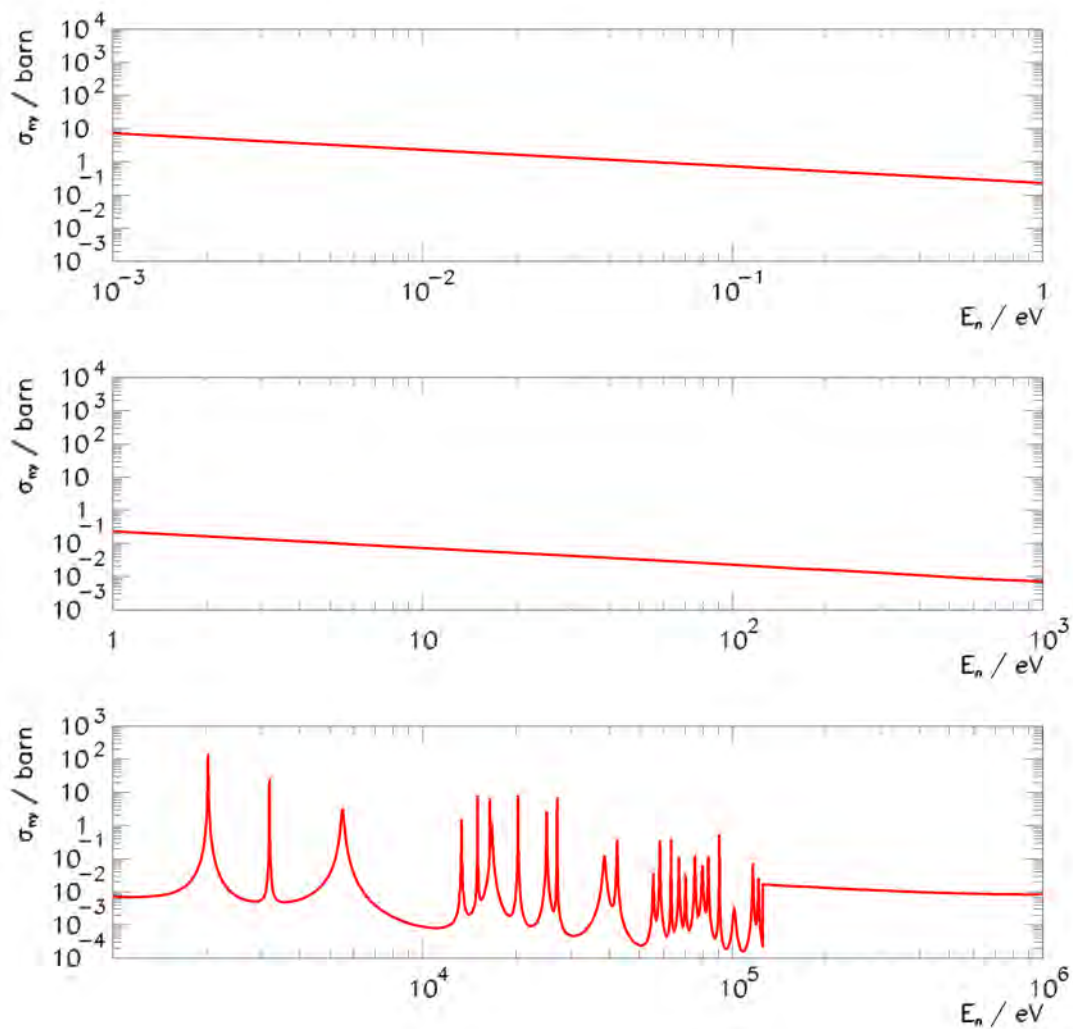


Abbildung 3.3.: Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang bei der Aktivierungsreaktion $^{41}\text{K}(n, \gamma)^{42}\text{K}$. Bei höheren Neutronenenergien treten Resonanzphänomene auf, welche an Peaks im Wirkungsquerschnitt erkennbar sind [De Soete u. a., 1972]; (Andreas Piepke, University of Alabama, 2001)

3.2.1. Aktivierung

Die Aktivierung der Probe erfolgt in einem Kernreaktor oder mit Hilfe einer Neutronenquelle. In dieser Arbeit steht ein TRIGA Mark-II Forschungsreaktor⁸ zur Verfügung. Die Probe wird zur Bestrahlung mit Neutronen zwischen bzw. neben die Brennstäbe des Kernreaktors gebracht. Dies geschieht am Atominstytut der Österreichischen Universitäten (ATI) mit Hilfe einer elektronisch gesteuerten Rohrpost bzw. unter Verwendung von weiteren vorhandenen Bestrahlungsrohren (siehe Abbildung 3.4). Abhängig von der gewünschten Bestrahlungsdauer, welche wiederum von der Art der betrachteten Nuklide abhängt, steht ein schnelles (Transportwege beanspruchen eine Zeit von 200 ms)- und ein langsames Rohrpostsystem zur Verfügung.

Mathematische Beschreibung

Eine quantitative mathematische Beschreibung des Aktivierungsprozesses ist durch die Aktivierungsgleichung (Gleichung 3.36) gegeben.

Die zeitliche Variation der Anzahl der produzierten Radionuklide ^{A+1}X , $dN(t)/dt$, kann in folgendem Ansatz geschrieben werden.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \text{Aktivierung } A - \text{Zerfall } D(t) \quad (3.31)$$

Die *Aktivierung* A schreibt sich mit der anfänglichen Anzahl N_0 des betrachteten Ausgangsnuklids ^AX und dem Neutronenfluß Φ im betrachteten Volumen und dem Wirkungsquerschnitt σ für die Reaktion $^A\text{X}(n, \gamma)^{A+1}\text{X}$ in folgender Form. Die Aktivierung durch Neutronen wird als ausreichend gering betrachtet, sodass $N_0 = \textit{konst.}$ gesetzt werden kann.

$$A = N_0 \Phi \sigma \quad (3.32)$$

Es wird dabei in die Aktivierung durch thermische und epithermische Neutronen unterschieden [Parry, 1991].

$$A = N_0 \Phi_{\textit{thermisch}} \sigma_{\textit{thermisch}} + N_0 \Phi_{\textit{epithermisch}} I_{\gamma} \quad (3.33)$$

⁸Der TRIGA Mark-II Forschungsreaktor (Swimmingpool-Typ) des Atominstütüts der Österreichischen Universitäten wurde im Jahr 1962 fertig gestellt. Die maximale thermische Leistung liegt bei 250 kW. Ein Impulsbetrieb ermöglicht einen 40 ms andauernden Leistungsimpuls mit einer Leistung von 250 MW. Die erzeugte thermische Energie wird an den Wiener Donaukanal abgegeben. Der Kern des Reaktors besteht aus 82 zylinderförmig angeordneten Brennstäben (siehe Abbildung 3.4). Absorberstäbe aus Borkarbid und einer Antimon-Beryllium Photoneutronenquelle. Der verwendete Brennstoff setzt sich zu 8% aus Uran (Anreicherungsgrad von 20% ^{235}U), zu 1% aus Wasserstoff und zu 91% aus Zirkon, welches eine Moderatorfunktion übernimmt, zusammen. Da Zirkonhydrid seine Moderatorfähigkeit bei höheren Temperaturen verliert, bricht eine Kettenreaktion bei Erreichen höherer Temperaturen zusammen. Temperaturen, die zu einer Kernschmelze führen, können nicht erreicht werden.

3. Neutronenaktivierungsanalyse

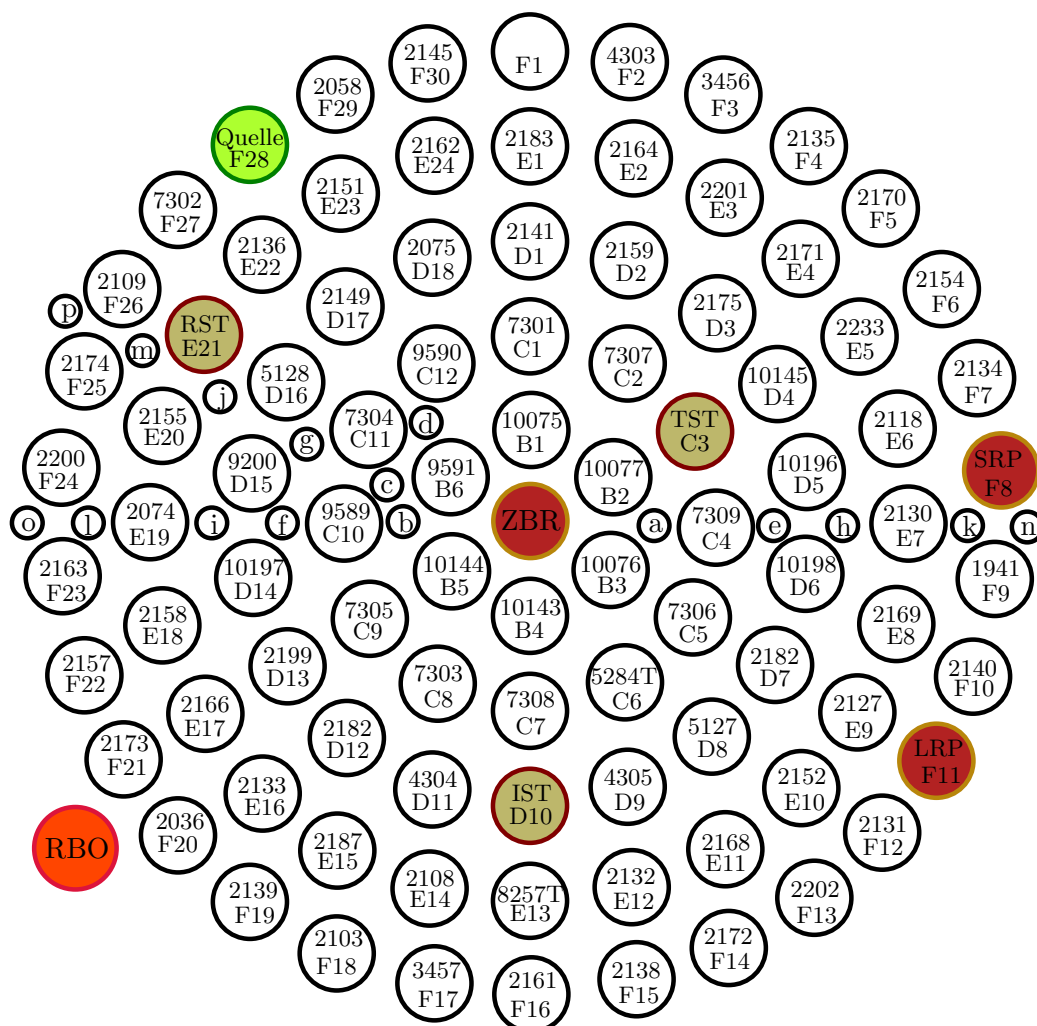


Abbildung 3.4.: Kernschema des TRIGA Mark-II Forschungsreaktors am ATI, RBO = Position zur Bestrahlung großvolumiger rotierender Proben oberhalb des Kerns, ZBR = Zentrales Bestrahlungsrohr, SRP = Schnelle Rohrpost, LRP = Langsame Rohrpost, RST = Regelstab, TST = Trimmstab, IST = Impulsstab, Quelle = Antimon-Beryllium Photoneutronenquelle; Stand am 18.01.2006; (Stefan Schrittwieser nach H. Böck, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Wien)

Für den Wirkungsquerschnitt der Wechselwirkung mit epithermischen Neutronen wird dabei das Resonanzintegral I_γ herangezogen, für jenen der thermischen Neutronen $\sigma_{thermisch}$.

Die *Zerfallsrate* D ergibt sich nach dem Zerfallsgesetz der Radioaktivität (Gleichung 3.3). λ stellt die Zerfallskonstante des produzierten Radionuklids $A+1X$ dar.

$$D(t) = \lambda N(t) \quad (3.34)$$

Einsetzen von Gleichung 3.33 und 3.34 in Gleichung 3.31 ergibt folgende Differentialgleichung.

$$\frac{dN(t)}{dt} = (N_0 \Phi_{thermisch} \sigma_{thermisch} + N_0 \Phi_{epithermisch} I_\gamma) - \lambda N(t) \quad (3.35)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung unter Einbeziehung der Randbedingungen $N(t = 0) = 0$ und $N(t) \geq 0$ ist eindeutig und schreibt sich wie folgt.

$$N(t) = \frac{\overbrace{(N_0 \Phi_{thermisch} \sigma_{thermisch} + N_0 \Phi_{epithermisch} I_\gamma)}^{\text{im Weiteren geschrieben als } N_0 \Phi \sigma}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.36)$$

Mit Gleichung 3.36 lässt sich bei bekanntem Neutronenfluss die Anzahl produzierter Radionuklide N_{A+1X} nach der Zeit $t_{Aktivierung}$ bestimmen.

$$N_{A+1X} = N(t_{Aktivierung}) = \frac{N_0 \Phi \sigma (1 - e^{-\lambda t_{Aktivierung}})}{\lambda} \quad (3.37)$$

Die maximal produzierbare Anzahl von Radionukliden, N_{A+1X} , der Sättigungswert, ergibt sich mit $t_{Aktivierung} \rightarrow \infty$ [Alfassi u. a., 1998, S.111].

$$N_{A+1X}^{max} = \frac{N_0 \Phi \sigma}{\lambda} \quad (3.38)$$

3.2.2. Abklingphase

Im Anschluss an die Aktivierung der Probe in einem Reaktor oder einer Neutronenquelle klingt die Radioaktivität wieder ab. Diese Abklingphase kann gezielt zur Separation der Radionuklide verwendet werden. Kurzlebige Radionuklide zerfallen, bevor die eigentliche Messung der betrachteten langlebigeren Nuklide beginnt. Auch beim Nachweis kurzlebiger Nuklide erfolgt ein Abklingen, welches durch den Transport vom Ort der Bestrahlung zur verwendeten Messeinrichtung bedingt ist.

Im Beispiel der Aktivierungsreaktion $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$, erfolgt ein β^- -Zerfall.



Dieser weist eine Halbwertszeit $T_{1/2} = 14.9590$ h, sowie eine Zerfallsenergie von $E_\gamma = 5.516$ MeV auf [Kinsey, 1996].

3. Neutronenaktivierungsanalyse

Mathematische Beschreibung

Die produzierten Radionuklide N_{A+1X} zerfallen nach dem Zerfallsgesetz der Radioaktivität (Gleichung 3.3). Nach einer Abklingzeit $t_{\text{Abklingvorgang}}$ zwischen Aktivierung und Messung ist die Anzahl der betrachteten Radionuklide auf N_{A+1X}^* reduziert.

$$N_{A+1X}^* = N_{A+1X} e^{-\lambda t_{\text{Abklingvorgang}}} \quad (3.40)$$

3.2.3. Messung

Die Energie der beim Zerfall der Radionuklide entstehenden γ -Photonen wird gemessen. Da diese Energien charakteristisch für jedes Radionuklid sind, ermöglicht dies eine Identifizierung des zerfallenen Nuklids. Um quantitative Rückschlüsse auf die Nuklidkonzentration ziehen zu können, wird die Anzahl der registrierten charakteristischen γ -Photonen herangezogen (siehe Unterkapitel 3.3, Messtechnik).

Mathematische Beschreibung

Zerfallen in der Messzeit t_{mess} die Anzahl $\Delta N = N_{A+1X}^* - N_{A+1X}^* e^{-\lambda t_{\text{mess}}}$ Nuklide, so werden $N_{\gamma_{\text{emittiert}}} = \Delta N$ charakteristische γ -Photonen emittiert.

$$N_{\gamma_{\text{emittiert}}} = N_{A+1X}^* - N_{A+1X}^* e^{-\lambda t_{\text{mess}}} \quad (3.41)$$

In Abhängigkeit des verwendeten Detektorsystems variiert die tatsächlich registrierte Anzahl der Photonen $N_{\gamma_{\text{detektiert}}}$. Detektorgeometrie, Detektoreffizienz und Absorption bzw. Streuung nach dem Zerfall werden hier vereinfacht in einen energieabhängigen effektiven Wirkungsgrad $\eta_{\text{Detektor}}(E_\gamma)$ zusammengefasst.

$$N_{\gamma_{\text{detektiert}}} = N_{\gamma_{\text{emittiert}}} \eta_{\text{Detektor}}(E_\gamma) \quad (3.42)$$

3.2.4. Konzentrationsbestimmung

Aus der Anzahl der detektierten, für das betrachtete Radionuklid charakteristischen, γ -Photonen $N_{\gamma_{\text{detektiert}}}$ berechnet sich bei bekannten Bestrahlungsbedingungen, Aktivierungsreaktion, Abklingzeit und effektiver Detektoreffizienz die Konzentration c_{AX} des Ausgangsnuklids $^A X$.

Mathematische Beschreibung

Die Anzahl der Ausgangsnuklide N_0 ergibt sich mit Gleichung 3.43.

$$N_0 = \frac{N_{\gamma_{\text{detektiert}}}}{\eta_{\text{Detektor}}(E_\gamma)} \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_{\text{mess}}}} \frac{1}{e^{-\lambda t_{\text{Abklingvorgang}}}} \frac{\lambda}{\Phi \sigma (1 - e^{-\lambda t_{\text{Aktivierung}}})} \quad (3.43)$$

Damit lässt sich die Konzentration des betrachteten Ausgangsnuklids einfach berechnen. Die Probenmasse m_{Probe} und das Atomgewicht $m_{AX} = a_{AX} u$ sind bekannt.

$$[a_{AX}] = 1 u = 1.660\,538\,782(83) \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (3.44)$$

Anmerkung: atomare Masseneinheit u nach [Mohr u. a., 2007].

Dies führt zur Massenkonzentration des betrachteten Nuklids.

$$c_{AX} = \frac{N_0 m_{AX}}{m_{Probe}} \% \quad (3.45)$$

$$[c_{AX}] = \text{Gew.} - \% \quad (3.46)$$

Bei der Konzentrationsbestimmung chemischer Elemente, ist es notwendig, die Isotopenhäufigkeiten des jeweiligen Elements zu berücksichtigen.

In der Praxis wird zur Konzentrationsbestimmung oft eine mit einem definierten Standard vergleichende Messung durchgeführt.

Die Bestrahlungen dieser Arbeit werden jeweils zeitlich und räumlich synchron mit der zu bestimmenden Probe und einem wohldefinierten Standard durchgeführt. Probe und Standard weisen dieselbe Geometrie auf. Dadurch ist gewährleistet, dass etwaige Schwankungen, Unregelmäßigkeiten, bzw. quantitative Unsicherheiten im Neutronenfluss berücksichtigt werden, da für Probe und Standard dieselben Bestrahlungsbedingungen gültig sind. Diese Art der Konzentrationsbestimmung macht weiters eine Berücksichtigung der Betriebszeiten der Bestrahlungseinrichtung, etc. in der Berechnung hinfällig. Dies wird bei längeren Bestrahlungsdauern notwendig, da der Reaktor des ATI täglich heruntergefahren wird. Auch Detektorgeometrie, Detektoreffizienz, Streu- und Absorptionsprozesse bei der Messung werden durch diese vergleichende Messung erfasst.

3.2.5. Vergleichende Konzentrationsbestimmung unter Verwendung eines Standards

Konzentrationsberechnung Die Nettofläche eines Peaks N_{Netto} ergibt sich durch Integration der Zählrate $Z(t)$ der zugehörigen Energielinie über den Messzeitraum 0 bis t_{mess} .

$$N_{netto} = \int_0^{t_{mess}} Z(t) dt \quad (3.47)$$

Die Zählrate ist proportional der Aktivität der betrachteten Energielinie der Probe. Damit ergibt sich für die Nettofläche eines Peaks folgender Zusammenhang.

$$N_{netto} = \int_0^{t_{mess}} Z_{t=0} e^{-\lambda t} dt = Z_{t=0} \frac{e^{-\lambda t_{mess}} - 1}{-\lambda} \quad (3.48)$$

3. Neutronenaktivierungsanalyse

Wird in einem wohldefinierten Standard, welcher derselben Bestrahlung ausgesetzt wurde, ebenso die Nettopeakfläche derselben Energielinie bestimmt, ergibt sich unter Berücksichtigung des Abklingens der Probe bzw. des Standards bei unterschiedlichen Messzeitpunkten (hier Messung des Standards zum Zeitpunkt Δt später) folgender Ausdruck für die Elementkonzentration in der Probe.

$$c_{Probe} = c_{Standard} \frac{m_{Standard}}{m_{Probe}} \frac{Z_{Probe_{t^*}}}{Z_{Standard_{t^*}}} \quad (3.49)$$

$$c_{Probe} = c_{Standard} \frac{m_{Standard}}{m_{Probe}} \frac{N_{Probe_{netto}}}{N_{Standard_{netto}}} \frac{e^{-\lambda t_{messStandard}} - 1}{e^{-\lambda t_{messProbe}} - 1} e^{-\lambda \Delta t} \quad (3.50)$$

Fehlerrechnung In der Fehlerrechnung genügt es üblicherweise bei Verwendung mehrerer Standards die Fehler der gemessenen Peakflächen (aus den Gammaskpektren, siehe Anhang D, der Messungen der Proben) sowie in weiterer Folge die Abweichungen der Standard Referenzwerte voneinander zu berücksichtigen. Bei diesem Zugang werden Flussinhomogenitäten am Ort der Bestrahlung und Inhomogenitäten der Standard Referenzproben erfasst. Bei Bezugnehmen auf einen einzelnen Standard verschwindet definitionsgemäß die Abweichung der Standard Referenzwerte voneinander. In diesem Fall macht es Sinn, die Fehler der Standard Konzentrationsangaben zu berücksichtigen. Die Fehlerrechnung in dieser Arbeit erfolgt analog zu [Sterba, 2007, Kap. 2]. Fehler der Mess- und Abklingzeiten, sowie Massenfehler können vernachlässigt werden.

3.3. Messtechnik

In dieser Arbeit werden die am ATI verfügbaren γ -Halbleiterdetektoren zur Messung verwendet. Es handelt sich dabei um High Purity Germanium (HPGe) Detektoren.

Halbleiterdetektoren Prinzip

Halbleiterdetektoren sind Dioden, welche durch p- und n-Dotieren eines Halbleitermaterials⁹ hergestellt werden. Halbleiter zeichnen sich durch ein bei $T = 0$ K in der Elektronenkonfiguration unbesetztes Leitungsband aus. Die nach der Fermi-Dirac Statistik (siehe Verteilungsfunktion, Gleichung 3.51) verteilten Elektronen befinden sich bei höheren Temperaturen auch im Leitungsband. Dies führt zu einer intrinsischen Leitfähigkeit.

$$f_D(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/k_B T}} \quad (3.51)$$

⁹im Bereich der γ -Detektoren findet als Halbleitermaterial oft Silizium bzw. Germanium Verwendung, da diese günstige Voraussetzungen mitbringen und in einer ausreichend reinen Form (Störstellenkonzentration unter $10^{10}/\text{cm}^3$) hergestellt werden können.

In dieser Gleichung stellt E_F die Fermi-Energie dar ($f_D(E_F) = 1/2$). Bei Dotieren von Halbleitern (Implantation von Akzeptoren bzw. Donatoren), werden die elektrischen und optischen Eigenschaften von Halbleitern gezielt verändert. Diese p- bzw. n-Kontakte werden an Halbleiterkristallen so hergestellt, dass, durch Anlegen einer Hochspannung in Sperrrichtung an dieser Diode, ein ladungsträgerfreier Raum im intrinsischen (nicht dotierten) Bereich des Halbleiters erzeugt wird.

Tritt ein Photon in den intrinsischen Bereich des Halbleiterkristalls ein, so werden Elektronen, die um die Bindungsenergie der Elektronen reduzierten Photonenenergie proportionalen Anzahl, ins Leitungsband gehoben. Aufgrund der angelegten Hochspannung wandern Elektronen und Elektronenlöcher an die p- bzw. n-Kontakte. Die entstehenden Signale werden mittels eines Vorverstärkers verarbeitet.

Energieauflösung

Die Energieauflösung von Halbleiterdetektoren ergibt sich nach [Wegener, 2003] mit dem Fano-Faktor F^{10} , dem Verhältnis der experimentell beobachteten Varianz einer Energielinie zu der bei einer idealen Poissonverteilung zu erwartenden Varianz derselben.

Die beobachteten absoluten Fehler werden üblicherweise durch die Breite des durch eine diskrete Energie erzeugten Peaks bewertet. Ein solcher Peak entsteht durch Zählen registrierter Messwerte bestimmter Energien. Die Breite wird bei dem halben Maximum des Peaks angegeben und als *Full Width at Half Maximum (FWHM)* bezeichnet (siehe Abbildung 3.5). In gemessenen Gammaskpektren wird zur Beurteilung eines erfassten Peaks üblicherweise neben der Anzahl an Zählereignissen auch die Halbwertsbreite angegeben (siehe Anhang D).

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2.35 \sqrt{\epsilon_i F E_0} \quad (3.52)$$

$$\epsilon_i(\text{Ge}) = 2.9 \text{ eV} \quad \text{bzw.} \quad \epsilon_i(\text{Si}) = 3.6 \text{ eV} \quad (3.53)$$

Ein typischer Zahlenwert für einen Si-Detektor: $\Delta E_{\text{FWHM}} = 100 \text{ eV}$ bei $E_\gamma = 5 \text{ keV}$.

Verwendeter Detektor

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Detektor handelt es sich um einen *High Purity Germanium* (HPGe-) Detektor. Der Germaniumkristall besitzt einen kooaxialen Aufbau. Die Form entspricht der eines Zylinders mit einer zentrischen Bohrung. Der dickere n-Kontakt (circa 0.5 mm gegenüber einem p-Kontakt von typischerweise 0.3 mm) wird außen angeordnet, sodass auch von höherenergetische Photonen möglichst die gesamte Energie innerhalb des Detektorvolumens

¹⁰Fano-Faktor $F = \sqrt{\frac{E_x}{E_i} \left(\frac{\epsilon_i}{E_i} - 1 \right)}$; $F \approx 0.1$ für Si und Ge

3. Neutronenaktivierungsanalyse

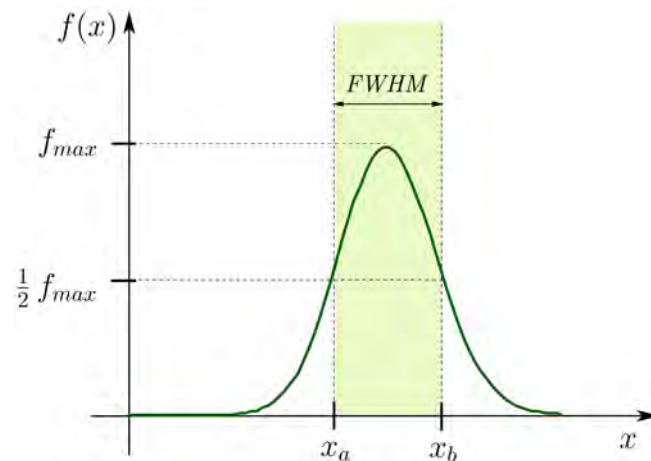


Abbildung 3.5.: *Halbwertsbreite bzw. Full Width at Half Maximum (FWHM)*

erfasst werden kann. Die Kühlung des Detektorkristalls erfolgt über eine Kältebrücke, welche innerhalb des Bechers verbunden ist.

Da bei Raumtemperatur aufgrund der bei Ge geringen Bandlücke ($\Delta E_{Ge} = 0.66 \text{ eV}$) zwischen Valenz- und Leitungsband ständig Elektronen angeregt werden, fließt ein ständiger Leckstrom, welcher ein unerwünschtes Rauschen erzeugt. Daher werden HPGe-Detektoren zur Messung gekühlt (77 K, flüssiger Stickstoff).

Die weitere Messwerterfassung und -verarbeitung erfolgt elektronisch an einem Arbeitsplatzrechner¹¹.

¹¹verwendete Software: *Genie 2000, Gamma Acquisition & Analysis, V2.1, Jul 22, 2002, Canberra Industries*

4. Spurenelemente

Die chemischen Elemente werden, basierend auf der Konzentration, mit welcher diese auftreten, in *Mengenelemente* und *Spurenelemente* klassifiziert. Während *Mengenelemente* in Konzentrationen > 1 Gew.-% auftreten, treten *Spurenelemente* in Konzentrationen von $\mu\text{g/g}$ auf. Die Zuordnung eines Elements zu Spurenelementen oder Mengenelementen eines spezifischen Elements entscheidet sich somit erst bei Angabe des betrachteten Systems.

Die *essentiellen Spurenelemente* sind für Pflanzen und Tiere lebensnotwendig. Diese sind häufig Bestandteile von Metalloproteinen. Im menschlichen Körper beinhalten Hormone (z.B. Insulin), viele Enzyme und andere spezifische Verbindungen (z.B. Hämoglobin) Spurenelemente. Die Spurenelementkonzentration wird hierbei vom menschlichen Körper homöostatisch reguliert. Absorption und Exkretion werden angepasst [Fiedler und Rösler, 1993].

4.1. Spurenelemente in der Atmosphäre

Durch Ablauf verschiedener natürlicher biologischer und geochemischer Kreislaufprozesse geraten Spurenelemente in die Atmosphäre. Natürliche Quellen dieser Spurenelemente sind der Erdboden, Meerwasser, und vulkanische Eruptionen. Auch anthropogene Quellen, beispielsweise Energieerzeugung, Industrie und Gewerbe, führen zu beachtlichen Emissionen spezifischer Elemente. Während manche Spurenelemente essentiell für Fauna und Flora sind, weisen andere toxische Wirkungen auf. Daher sind in vielen Staaten durch die Gesetzgebung strikte Grenzwerte für die Emission bestimmter Elemente festgelegt.

Die jährlichen globalen Spurenelementemissionen bewegen sich im Bereich von 6 kt (Hg) bis zu 355 kt (Mn, besonders aus Eisen- und Stahlindustrie), wobei die Anteile anthropogenen und natürlichen Ursprungs von Element zu Element stark variieren [Nriagu, 1990]. Ein Vergleich der Anteile zeigt heutzutage generell einen dominanten Einfluss anthropogener Quellen.

Der Hauptanteil der Spurenelementemissionen in die Atmosphäre ist korpuskularer Natur, obwohl einige Spurenelemente (in besonderem Maße B, Hg und Se) auch in der Gasphase in die Atmosphäre eintreten können.

Quecksilber ist das bisher einzig bekannte Spurenelement, welches einen Trend in der Konzentrationsverteilung in der Atmosphäre aufweist. Der Anteil von Quecksilber in der Gasphase nimmt in der Atmosphäre der Nordhalbkugel (mit einem Maximum zwischen 40° und 60° nördlicher Breite, dem Gebiet, welches den Großteil industrialisierter Staaten wie Kanada, die USA und Europa be-

4. Spurenelemente

heimatet) signifikant gegenüber den Konzentrationen in der Atmosphäre der Südhalbkugel der Erde zu. Diese Inhomogenität ist auf anthropogene Quellen wie Kohle- und Müllverbrennung in diesen Erdteilen zurückzuführen [Clarke und Sloss, 1992].

Spurenelemente anthropogenen Ursprungs Die bedeutendsten Quellen für Spurenelemente anthropogenen Ursprungs stellen Energieerzeugung, Müllverbrennung, der Transportsektor (Pb), Verhüttung und Veredelung, und verschiedene industrielle Herstellungsprozesse dar. Diese Quellen sind der wesentliche Ursprung für die Emissionen von As, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni, Sb, V und Zn [Clarke und Sloss, 1992].

Spurenelemente natürlichen Ursprungs Die Quellen natürlichen Ursprungs schließen im wesentlichen Verwitterung von Erden und Gesteinen der Erdkruste, Vulkane, Thermalquellen, Erosion von metallreichen Oberflächenablagerungen, Reaktionen an Wasseroberflächen, Waldbrände und Pflanzenwachstum ein. Diese Quellen sind hauptverantwortlich für die globalen Emissionen von Cr, Co, Mn, und Mo [Swaine u. a., 1988].

4.2. Spurenelemente in Gestein

In magmatischen Gesteinen, entstanden aus Silikatschmelzen, sind im Wesentlichen meist nicht mehr als 5 Hauptminerale beteiligt. In geringen Mengen treten Oxide und Sulfide auf, die zusammen mit bestimmten Silikaten als Akzessorien bezeichnet werden. Die Elemente können somit silikatisch, oxidisch und sulfidisch gebunden werden. Die überwiegend oxidisch und sulfidisch eingebundenen Elemente sind von besonderer Bedeutung, da sie in den Oxiden bzw. Sulfiden als Mengenelemente vorliegen, bei Betrachtung des Gesamtgesteins jedoch Spurenelemente sind. Vorwiegend silikatisch gebunden sind in den wichtigsten gesteinsbildenden Mineralen Olivin, Pyroxene, Amphibole, Glimmer und in Feldspäten die Elemente Li, Rb, Cs, Be, Ba, Sc, Y, Seltene Erden, Zr, Hf, B, Ga, Ge und F. Oxidisch gebunden in den Akzessorien Ilmenit, Rutil, Magnetit, Chromit, Spinelle, Wolframit und Kassiterit sind Ti, Nb, Ta, Cr, V, W und Sn. In den Akzessorien Pyrrhotin, Pentlandit, Chalkopyrit, Pyrit, Arsenopyrit, Molybdänit, Löllingit, Galenit und Sphalerit sind Mo, Co, Ni, Cu, As, Bi, Hg, Pb und Zn sulfidisch gebunden [Fiedler und Rösler, 1993, S. 74].

4.3. Spurenelemente in Böden

Spurenelemente sind, für die Vegetation notwendigerweise, in allen Böden enthalten. Unter- bzw. Überversorgungen wirken sich auf die Vegetationszusammensetzung aus. In nicht bewirtschafteten unkontaminierten Böden sind Ge-

steinsverwitterung und Bodenbildungsprozesse Ursprung der enthaltenen Spurenelemente. In Abhängigkeit der Ausgangsbedingungen und anderer beeinflussender Faktoren unterscheiden sich die Spurenelementkonzentrationen quantitativ, in ihrer Bindungsform, und der räumlichen Verteilung der Elemente. Durch landwirtschaftliche Nutzung, Düngung einschließlich, wird der Spurenelementhaushalt beeinflusst. In Mineralböden sind typischerweise Sb, As, Ba, Be, Bi, Pb, B, Cd, Cl, Cr, Co, F, Ga, Ge, I, Cu, La, Li, Mn, Mo, Ni, Hg, Rb, Se, Ag, Sr, Tl, U, V, Y, Zn, Sn, Zr in bedeutenden Spurenelementkonzentrationen enthalten.

Mobilität von Spurenelementen in Böden Die Mobilität von Spurenelementen in Böden hängt meist stark von der Form ihrer Bindung ab. Spurenelementkationen werden in meist unschädlicher Form gebunden. Anionen weisen Bindungen an Eisenoxide des Bodens auf. Sind Spurenelemente, wie deren größter Anteil, an anorganische und organische Bodenbestandteile gebunden, sind diese für Pflanzen schwer verfügbar (siehe Abbildung 4.1). Kenntnis über die Anteile verschiedener Bindungsformen ermöglicht dabei in Schadensfällen gezieltes Gegensteuern.

Der Einfluss eines steigenden pH-Wertes erhöht im Allgemeinen die Stabilität organischer Komplexe. Dies trifft beispielsweise für Cu, welches am stärksten an organische Substanz gebunden ist, zu.

Unter reduzierenden Bedingungen nimmt die Schwermetalllöslichkeit durch Sulfidbildung beträchtlich ab (Cd, Zn, Ni, Co, Cu, Pb und Sn) [Fiedler und Rösler, 1993, S. 83].

Pflanzenverfügbare Gehalte von Spurenelementen in Böden Die Pflanzenverfügbarkeit zahlreicher Spurenelemente variiert stark mit dem pH-Wert des Bodens. Der Versorgungszustand des Bodens mit Molybdän wird unter Verwendung der Molybdänbodenzahl¹ beschrieben, und weist bei pH 4 eine maximale Verfügbarkeit auf. B hingegen wird bei pH 9 maximal adsorbiert. Ist der Gesamtgehalt an Spurenelementen eines Bodens nicht beeinflussbar, so kann über aziditätsbeeinflussende Maßnahmen deren Wirkung reguliert werden [Fiedler und Rösler, 1993, S. 83].

¹Molybdänbodenzahl Mo-Bz = pH-Wert des Bodens + 10 · c(Mo) in mg / kg Boden; Diese besitzt im Allgemeinen einen Wert im Bereich von 6 bis 8.

4. Spurenelemente

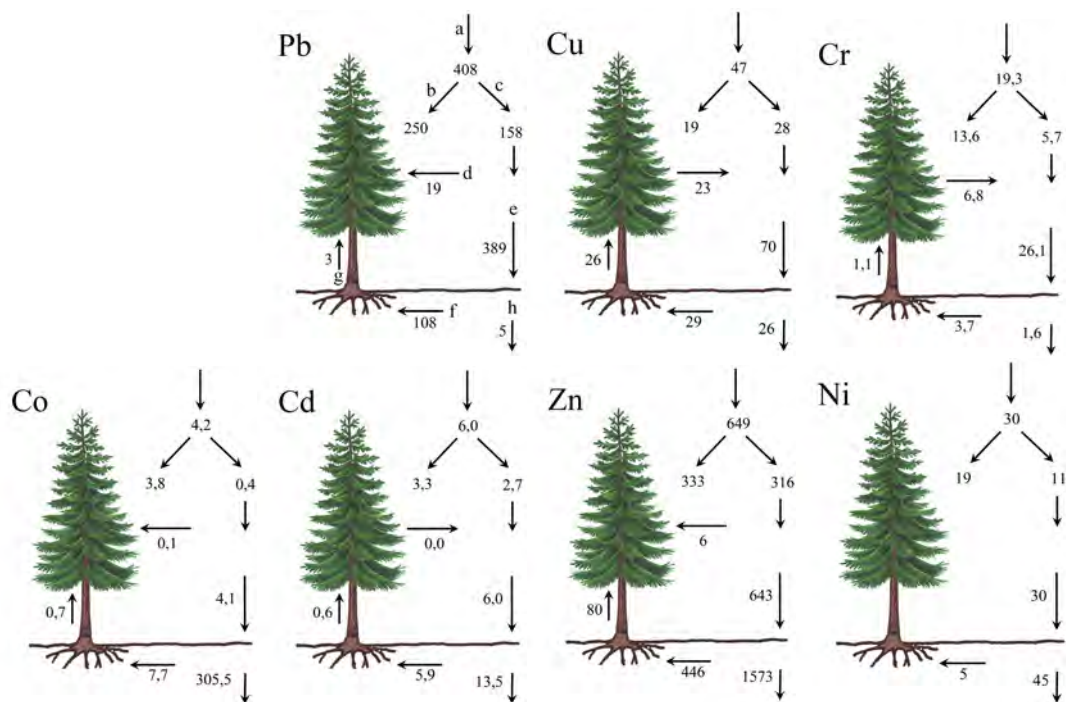


Abbildung 4.1.: Schwermetallflüsse in einem Fichtenökosystem des Sollings (Mittelgebirge des Weserberglands in Niedersachsen, Deutschland) Angaben in $\frac{\text{g}}{\text{ha a}}$; a) Gesamtdeposition; b) Interceptionsdeposition; c) Niederschlagsdeposition; d) Kronenauswaschung(\rightarrow); Adsorption in der Krone (\leftarrow); e) Eintrag in den Boden; f) Wurzelaufnahme; g) Verlagerung im Baum; h) Austrag mit dem Sickerwasser (nach [Schultz, 1987])

4.4. Spurenelementkonzentrationen in Bäumen

Die Spurenelementkonzentrationen in Bäumen bewegen sich beeinflusst durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen in den in Tabelle 4.1 angegebenen Konzentrationsbereichen. In Tabelle 4.2 sind die deutschsprachigen Bezeichnungen der Bäume angeführt.

| Spuren- element | Art | Konzentrations- bereich in $\mu\text{g/g}$ Trockengewicht | | Analysen- methode | Studie |
|--------------------|-------------------------|---|------|----------------------|--------------------------|
| | | von | bis | | |
| Al | <i>Pinus silvestris</i> | 4 | 7.5 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Al | <i>Acer saccharum</i> | 5 | 15 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Al | <i>Picea rubens</i> | 1.8 | 53.2 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Al | <i>Picea abies</i> | 14 | 23 | NAA | [Wallner, 1998] |
| Al | <i>Picea mariana</i> | 5 | 56 | NAA | [Dion u. a., 1993] |
| As | <i>Acer saccharum</i> | 0.1 | 0.3 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| ^{198}Au | verschiedene | 0.004 | 0.88 | NAA | [Ünlü u. a., 2005] |
| Ba | <i>Pinus silvestris</i> | 3 | 10 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |

4.4. Spurenelementkonzentrationen in Bäumen

F O R T S E T Z U N G - T A B E L L E 4.1

| Spuren- element | Art | Konzentrations- bereich in $\mu\text{g/g}$ Trockengewicht | | Analysen- methode | Studie |
|--------------------|------------------------------|---|-------|----------------------|---------------------------------|
| | | von | bis | | |
| Ba | <i>Pinus ponderosa</i> | 0.9 | 1.3 | ICP-MS | [Padilla und Anderson, 2002] |
| Bi | <i>Pinus silvestris</i> | 0 | 80 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |
| ⁸² Br | <i>verschiedene</i> | 0.07 | 0.36 | NAA | [Ünlü u. a., 2005] |
| Ca | <i>Pinus silvestris</i> | 260 | 670 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Ca | <i>Acer saccharum</i> | 800 | 1500 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Ca | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 600 | 2600 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Ca | <i>Picea rubens</i> | 967 | 4330 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Ca | <i>Pinus</i> | 150 | 1550 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Ca | <i>Diospros kaki</i> | 1000 | 3200 | PIXE | [Aoki u. a., 1998] |
| Ca | <i>Picea abies</i> | 590 | 910 | NAA | [Wallner, 1998] |
| Cd | <i>Pinus silvestris</i> | 0.2 | 1.5 | AAS | [Brackhage u. a., 1996] |
| Cd | <i>Pinus silvestris</i> | 1 | 5 | AAS | [Symeonides, 1979] |
| Cd | <i>Pinus silvestris</i> | 0.05 | 2.0 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Cd | <i>Acer saccharum</i> | 0.2 | 0.6 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Cd | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 0.1 | 1.7 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 2003] |
| Cd | <i>Pinus ponderosa</i> | 0.03 | 0.076 | ICP-MS | [Padilla und Anderson, 2002] |
| Ce | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | 0.0 | 0.6 | ICP-MS | [Hall u. a., 1990] |
| Co | <i>Acer saccharum</i> | 0.1 | 0.3 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Cr | <i>Acer saccharum</i> | 1 | 13 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Cr | <i>Pinus</i> | 0.5 | 1 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Cr | <i>Pinus ponderosa</i> | 0.3 | 0.5 | ICP-MS | [Padilla und Anderson, 2002] |
| Cu | <i>Picea rubens</i> | 1.3 | 2.7 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Cu | <i>Pinus silvestris</i> | 2 | 26 | AAS | [Symeonides, 1979] |
| Cu | <i>Pinus silvestris</i> | 0.4 | 1.05 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Cu | <i>Acer saccharum</i> | 2 | 210 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Cu | <i>Pinus</i> | 1 | 2.7 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Cu | <i>Diospros kaki</i> | 2 | 16 | PIXE | [Aoki u. a., 1998] |
| Cu | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 5 | 40 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 2003] |
| Cu | <i>Pinus montezumae</i> | 5 | 45 | PIXE | [Calva-Vázquez u. a., 2006] |
| ⁶⁴ Cu | <i>verschiedene</i> | 3.7 | 12 | NAA | [Ünlü u. a., 2005] |
| Fe | <i>Pinus</i> | 6 | 20 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Fe | <i>Pinus silvestris</i> | 1.05 | 2.1 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Fe | <i>Picea rubens</i> | 11 | 249 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Fe | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 50 | 250 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Fe | <i>Pinus montezumae</i> | 50 | 700 | PIXE | [Calva-Vázquez u. a., 2006] |
| K | <i>Pinus silvestris</i> | 200 | 630 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| K | <i>Acer saccharum</i> | 600 | 1300 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| K | <i>Pinus</i> | 100 | 400 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| K | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 1000 | 1700 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| ⁴² K | <i>verschiedene</i> | 50 | 156 | NAA | [Ünlü u. a., 2005] |
| La | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | 0.0 | 0.3 | ICP-MS | [Hall u. a., 1990] |
| Mg | <i>Pinus silvestris</i> | 70 | 110 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Mg | <i>Acer saccharum</i> | 100 | 230 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Mg | <i>Picea rubens</i> | 90 | 312 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Mg | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 170 | 550 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Mn | <i>Pinus silvestris</i> | 65 | 145 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Mn | <i>Acer saccharum</i> | 50 | 110 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Mn | <i>Picea rubens</i> | 2.0 | 49.9 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Mn | <i>Pinus</i> | 0.5 | 2.8 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |

4. Spurenelemente

FORTSETZUNG - TABELLE 4.1

| Spuren- element | Art | Konzentrations- bereich in $\mu\text{g/g}$ Trockengewicht | | Analysen- methode | Studie |
|--------------------|------------------------------|---|-------|----------------------|---------------------------------|
| | | von | bis | | |
| Mn | <i>Diospros kaki</i> | 18 | 85 | PIXE | [Aoki u. a., 1998] |
| Mn | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 5 | 40 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Mn | <i>Pinus montezumae</i> | 25 | 250 | PIXE | [Calva-Vázquez u. a., 2006] |
| Mn | <i>Pinus silvestris</i> | 15 | 80 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |
| Mn | <i>Picea abies</i> | 52 | 203 | NAA | [Wallner, 1998] |
| ^{24}Na | <i>verschiedene</i> | 60 | 194 | NAA | [Ünlü u. a., 2005] |
| Nd | <i>Pinus silvestris</i> | 0.002 | 0.022 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |
| Nd | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | 0.0 | 0.35 | ICP-MS | [Hall u. a., 1990] |
| Ni | <i>Fagus sylvatica</i> | 10 | 70 | AAS | [Hagemeyer u. a., 1994] |
| Ni | <i>Acer saccharum</i> | 1 | 4 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Ni | <i>Pinus silvestris</i> | 0.165 | 0.23 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Ni | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 1 | 21 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| P | <i>Pinus silvestris</i> | 30 | 115 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| P | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 45 | 250 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Pb | <i>Pinus silvestris</i> | 0.2 | 2 | AAS | [Symeonides, 1979] |
| Pb | <i>Pinus silvestris</i> | 0.08 | 0.48 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Pb | <i>Pinus</i> | 0.3 | 3.5 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Pb | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 1 | 8.5 | ICP-MS | [Watmough u. a., 1999a] |
| Pb | <i>Pinus silvestris</i> | 0.05 | 1.4 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |
| Pb | <i>Pinus silvestris</i> | 0.05 | 0.4 | ICP-MS | [Bindler u. a., 2004] |
| Pr | <i>Pinus silvestris</i> | 0.001 | 0.005 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |
| Rb | <i>Pinus</i> | 0.1 | 0.35 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Rb | <i>Diospros kaki</i> | 0.5 | 5.5 | PIXE | [Aoki u. a., 1998] |
| S | <i>Pinus silvestris</i> | 21 | 71 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| S | <i>Pinus</i> | 400 | 1200 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Sm | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | 0.0 | 0.05 | ICP-MS | [Hall u. a., 1990] |
| Sr | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 5.5 | 11 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Sr | <i>Diospros kaki</i> | 3 | 6 | PIXE | [Aoki u. a., 1998] |
| Sr | <i>Pinus ponderosa</i> | 3 | 5.5 | ICP-MS | [Padilla und Anderson, 2002] |
| Sr | <i>Pinus silvestris</i> | 2 | 4 | ICP-MS | [Pearson u. a., 2006] |
| Ti | <i>Pinus</i> | 1 | 3 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| V | <i>Pinus</i> | 0.5 | 1 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Zn | <i>Pinus silvestris</i> | 5 | 55 | AAS | [Brackhage u. a., 1996] |
| Zn | <i>Pinus silvestris</i> | 2 | 8 | AAS | [Symeonides, 1979] |
| Zn | <i>Pinus</i> | 4 | 11.5 | PIXE&XRF | [Nagj u. a., 1987] |
| Zn | <i>Picea rubens</i> | 13.7 | 35.1 | NAA | [Zayed u. a., 1992] |
| Zn | <i>Acer saccharum</i> | 6 | 18 | ICP-MS | [Hutchinson u. a., 1998] |
| Zn | <i>Pinus silvestris</i> | 3.4 | 11 | AAS&ICP-MS | [Tendel und Wolf, 1988] |
| Zn | <i>Acer pseudoplatanus</i> | 5 | 45 | ICP-MS | [Watmough und Hutchinson, 1996] |
| Zn | <i>Diospros kaki</i> | 1 | 11 | PIXE | [Aoki u. a., 1998] |
| Zn | <i>Pinus montezumae</i> | 50 | 1800 | PIXE | [Calva-Vázquez u. a., 2006] |
| Zn | <i>Pinus ponderosa</i> | 6 | 20.5 | ICP-MS | [Padilla und Anderson, 2002] |

Tabelle 4.1.: Spurenelementkonzentrationen von Al, As, ^{198}Au , Ba, Bi, ^{82}Br , Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, ^{64}Cu , Fe, K, La, Mg, Mn, ^{24}Na , Nd, Ni, P, Pb, Pr, Rb, S, Sr, Ti, V und Zn in Xylem in Bäumen. In den genannten Studien werden auch Verschmutzungsszenarien betrachtet. Daher treten auch innerhalb einer Art Schwankungen bei den Angaben auf.

4.4. Spurenelementkonzentrationen in Bäumen

| Bezeichnung | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| nach dem <i>Linnéschen System</i> | im deutschen Sprachraum |
| <i>Acer pseudoplatanus</i> | Bergahorn |
| <i>Acer saccharum</i> | Zuckerahorn |
| <i>Diospros kaki</i> | Kakipflaume |
| <i>Fagus sylvatica</i> | Buche |
| <i>Picea abies</i> | Rot-Fichte |
| <i>Picea mariana</i> | Schwarzfichte |
| <i>Picea rubens</i> | Amerikanische Rot-Fichte |
| <i>Pinus</i> | Föhre / Kiefer |
| <i>Pinus montezumae</i> | - |
| <i>Pinus ponderosa</i> | Gelb-Kiefer |
| <i>Pinus silvestris</i> | Waldkiefer |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> | Douglasie |

Tabelle 4.2.: Baumbezeichnungen nach dem *Linnéschen System* und im deutschen Sprachraum

4. Spurenelemente

Teil II.

Experiment

*“Theory can leave questions unanswered,
but practice has to come up with something.”*

Mason Cooley (b. 1927), U.S. aphorist.
City Aphorisms, Seventh Selection, New York (1990).

5. Probennahme und Probenaufbereitung

5.1. Probennahme *Pinus cembra*

5.1.1. Die Zirbe

Die Zirbe, auch Arve genannt, (*Pinus cembra*) gehört zur Familie der Kiefergewächse (*Pinaceae*). Verbreitung findet sie in den Alpen und Karpaten in Höhenlagen ab 1300 m über dem Meeresspiegel [Salvii, 1753, Monoecia Monadelphica, Pinus, S. 1000]. Aufgrund der geringen Bestände steht die Zirbe auf der Liste der bedrohten Arten der IUCN¹ [IUCN, 2006]. Zirben (siehe Abbildung 5.1) weisen ein langsames Wachstum auf und können bis zu 1000 Jahre alt werden. Es handelt sich um widerstandsfähige Bäume, welche auch sehr harte Winter überstehen können. Zirbenholz ist harzreich und verströmt einen angenehmen Duft.

5.1.2. Probennahme in Stadl an der Mur

Die Probennahme der untersuchten Zirben erfolgte in der Weststeiermark, Österreich, in Stadl an der Mur. In einem Forstgebiet der Schwarzenbergschen Forstdirektion Murau (Luftlinie von Stadl an der Mur circa 5.5 km, 11 Straßenkilometer) wurden von 3 Baumstümpfen (Zirbe A, B und C) frisch gefällter Bäume, mittels im Forstbetrieb üblichen Motorsägen, Baumscheiben abgeschnitten. Alle Bäume befanden sich etwa 20 m unterhalb einer befestigten Forststraße. Zirbe A und B standen in einer Entfernung von circa 15 m. Zirbe C wuchs in sehr ähnlicher Umgebung in circa 160 m Entfernung entlang der genannten Forststraße. Die Positionen und Orientierungen derselben wurden aufgenommen und sind in Tabelle 5.1 wiedergegeben. Die Probennahme erfolgte am 16. April 2007 nach einer für das Frühjahr überdurchschnittlich warmen 2-wöchigen Schönwetterlage mit extrem trockenen und sonnigen Bedingungen [ZAMG, 2007]. Neben Baumscheiben wurde weiters eine Bodenprobe und eine aus Niederschlägen des vergangenen Winters zurückgebliebene Schneeprobe entnommen.

¹IUCN, The World Conservation Union, bestehend aus 83 Mitgliedsstaaten mit Sitz in Gland, Schweiz

5. Probennahme und Probenaufbereitung



Abbildung 5.1.: *Pinus cembra* (Zirbe) im Schwarzenbergschen Forst in Stadl an der Mur, Steiermark, Österreich (aufgenommen im Rahmen der Probennahme am 16. April 2007)



Abbildung 5.2.: *Pinus cembra* Proben (Zirbe) mit GPS-Gerät zur Positionsbestimmung, v. l. Zirbe A, Zirbe B und Zirbe C., im Schwarzenbergschen Forst in Stadl an der Mur, Steiermark, Österreich (aufgenommen im Rahmen der Probennahme am 16. April 2007)

Zirbe A Von dem freistehenden Baumstumpf wurde eine circa 10 cm dicke, den vollen Stammquerschnitt, $\varnothing_{max} \approx 65$ cm, erfassende Scheibe in einer Stammhöhe von ca. 0.7 m abgeschnitten. Unter Zuhilfenahme eines GPS Geräts² wurde die Position des Baumes zu N 47°02.001' und E 014°01.879', mit einer Genauigkeit von $f = 3.1$ m, bestimmt. Der Baum befand sich auf $h_{Zirbe_A} = 1716 \pm 9.3$ m über Meereshöhe (siehe Abbildung 5.2). Wie auch bei allen weiteren Holzproben, wurden die Baumscheiben abgeklopft, um den Staubanteil, und damit eine Kontaminierung der anderen Holzproben, zu reduzieren. Die Scheiben wurden dann, eingeschlagen in Kunststoffolie, in einem PKW nach Wien ins Atominstitut transportiert.

Zirbe B Eine circa 9 cm dicke Scheibe des halben Stammquerschnittes, $\varnothing_{max} \approx 56$ cm, des freistehenden Baumstumpfes wurde in einer Höhe von ca. 0.3 m überhalb des Bodens abgeschnitten. Mit Hilfe des verwendeten GPS Gerätes wurde die Position des Baumes zu N 47°01.994' und E 014°01.871', mit einer Genauigkeit von $f = 2.8$ m, bestimmt. Der Baum wuchs $h_{Zirbe_B} = 1717 \pm 8.4$ m über Meereshöhe (siehe Abbildung 5.2).

Zirbe C Sowohl eine Scheibe des vollständigen Querschnittes, als auch eine Scheibe des halben Querschnittes (um ganz frisch geschnittene Oberflächen zu erhalten), wurde von dem freistehenden Baumstumpf in einer Höhe von ca. 0.7 m abgeschnitten. Die Scheiben besitzen eine Dicke von circa 10 cm (vollständiger Querschnitt, $\varnothing_{max} \approx 62$ cm) und circa 8 cm (halber Querschnitt, $\varnothing_{max} \approx 58$ cm). Die GPS-Position des Baumes wurde zu N 47°01.915' und E 014°01.902', mit einer Genauigkeit von $f = 7.8$ m, auf einer Seehöhe von $h_{Zirbe_C} = 1719 \pm 23.4$ m bestimmt (siehe Abbildung 5.2).

²GPS Gerät *GARMIN GPS 60*

5. Probennahme und Probenaufbereitung

| Proben- bezeichnung | GPS-Koordinaten | | | Meereshöhe in m | Genauigkeit in m | |
|------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------|
| | N | E _{Greenwich} | E _{Ferro} | | Position | Meereshöhe |
| Zirbe A | 47°02.001' | 14°01.879' | 31°41.879' | 1716 | 3.1 | 9.3 |
| Zirbe B | 47°01.994' | 14°01.871' | 31°41.871' | 1717 | 2.8 | 8.4 |
| Zirbe C | 47°01.906' | 14°01.903' | 31°41.903' | 1719 | 7.8 | 23.4 |
| Bodenprobe | 47°02.013' | 14°01.893' | 31°41.893' | 1726 | 8.9 | 26.7 |

Tabelle 5.1.: Standorte der Probennahme am 16. April 2007 in Stadl an der Mur, Schwarzenbergische Forstdirektion; verwendetes Kartenbezugssystem: WGS 84;

Bodenprobe Stadl an der Mur Am bergseitigen Rande der genannten Forststraße wurde, nach Entfernen der oberen 10 cm des Bodens, eine Bodenprobe an der Position N 47°02.013' und E 014°01.893', circa 27 m entfernt von Zirbe A, mit einer Positionsgenauigkeit von $f = 8.9$ m, entnommen. Es wurde dabei darauf geachtet, dass unmittelbar überhalb der Probenstelle Zirbenbewuchs vorhanden war (siehe geologische Karte Abbildung 5.3).

Schneeprobe Stadl an der Mur Aus Schneeüberresten des vergangenen Winters wurde in einer Entfernung von einigen hundert Metern abseits der Forststraße eine Schneeprobe genommen. Im flüssigen Zustand weist diese ein Volumen von $V_{Schneeprobe} \approx 0.51$ l auf.

5.2. Probenaufbereitung

5.2.1. Mechanische Verarbeitung

Die weitere mechanische Verarbeitung der Holzproben erfolgte im Labor mit Hilfe von Stemmeisen³. Diese wurden unter Verwendung eines Schleifsteins⁴ geschärft. Vor Arbeiten an Proben wurden die Stemmeisen mit Aceton gereinigt. Die Proben wurde so bearbeitet, dass Probenoberflächen entweder saubere Schnittflächen oder frische Bruch-/Spaltflächen darstellten. Im Anschluss daran wurden die Proben zur Aktivierung in gereinigtem⁵ Quarzglas⁶ eingeschweißt

³Stemmeisen: Nr. 3540 STUBAI - Stemmeisen verschiedener Breite mit Kunststoffheft

⁴Schleifstein: TYROLIT 5230942 Superglanz

⁵Zum Reinigen wurde Königswasser (lat. *aqua regia*, ein Gemisch aus Salzsäure, HCl, und Salpetersäure, HNO₃, im Verhältnis 3 : 1) verwendet. Königswasser vermag Edelmetalle zu lösen. Diese Reinigung der Quarzkapseln ist für eine unverfälschte Bestimmung von Gold- und Silberkonzentrationen Voraussetzung. Bei den Reinigungsarbeiten wurde das Mischungsverhältnis 3 : 1 umgekehrt, man spricht von *verkehrten* oder auch *umgekehrten Königswasser*.

⁶Quarzglas Suprasil: die Messung, 11, einer bestrahlten Quarzkapsel, Gammasktrum siehe Tabelle D.9, zeigt geringe Konzentrationen von Ba, Cr, Fe, Eu, Sc, Sm und Yb, weitere Ergebnisse siehe Abschnitt 7.4;



LEGENDE:

| | | | |
|-------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | HANGSCHUTT, mono- / polymikt | | |
| | Faltenachse | | |
| | MORÄNEN, SCHOTTER | - Pleistozän | |
| | SEMMERINGQUARZIT | - Skyth ? | |
| | ±sandig-siltige TONSCHIEFER | } - Oberkarbon | |
| | PAALER KONGLOMERAT | | |
| Murauer "Decke" { | | DOLOMIT | - Obersilur - Unterdevon |
| | | phyllit. GLIMMERSCHIEFER | - Silur ? |
| | | GLIMMERSCHIEFER i. a. | |
| | | MYLONIT (PHYLLONIT) | |
| | Probenstandort | | |

Abbildung 5.3.: Geologische Karte des Probenstandorts im Schwarzenbergischen Forst in Stadl an der Mur, Steiermark, Österreich; Anfahrt über die Flattnitzer Landesstraße L 551; (Kartenausschnitt aus [Frimmel, 1987])

5. Probennahme und Probenaufbereitung

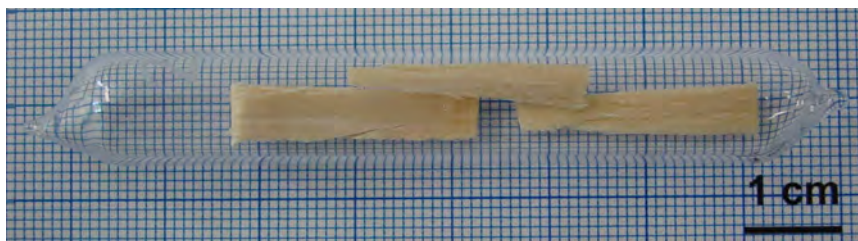


Abbildung 5.4.: *Bestrahlungskapsel aus hochreinem Quarzglas mit eingeschweißten Xylem Pinus Cembra vor der Bestrahlung;*

(siehe Abbildung 6.2). Unmittelbar vor der Bestrahlung wurden die Probenkapseln nochmals gereinigt⁷.

5.2.2. Veraschung

Erste Übersichtsmessungen (siehe Abschnitt 7.1) unter Verwendung relativ großer Probenvolumina (Abbildung 6.2) zeigten sehr geringe Elementkonzentrationen. Da die nachweisbaren Elemente (siehe Tabelle 7.1) im Allgemeinen nicht flüchtig sind, kann zur Volumenreduktion Veraschung herangezogen werden [Thy u. a., 2006]. Eine solche Volumenreduktion ist erstrebenswert, da die Bestrahlungseinrichtungen des Forschungsreaktors des ATI beschränkte Bestrahlungsvolumen zur Verfügung stellen. Innerhalb dieser möglichen Bestrahlungsvolumen wird, um möglichst gleiche Bestrahlungsbedingungen und damit eine gute Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse der zusammen bestrahlten Proben zu erreichen, ein minimales Volumen angestrebt.

Flüchtigkeit anorganischer Holzbestandteile Ab Veraschungstemperaturen über 500°C weist die Ca-Konzentration eine Variation von circa 20 – 30%, abhängig von dem betrachteten Holz, auf. Bei über 1300°C steigt diese Änderung auf bis zu 40 – 50% der ursprünglichen Ca-Konzentration an. Die auf die Ca-Konzentration normierten Konzentrationswerte anderer Spurenelemente zeigen kaum Schwankungen (Ausnahmen sind beispielsweise die Konzentrationen von B, Cu und K ab Temperaturen von 900°C) [Misra u. a., 1993]. Daher wird bei einem analytischen Veraschungsprozess eine möglichst niedrige Temperatur angestrebt. Am Atominstitut steht hierzu ein *Cool Plasma Asher*⁸ zur Verfügung. In einem Sauerstoffplasma, angeregt durch ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld, 27.12 MHz, wird die Probe bei Grobvakuumbedingungen (Arbeitsbereich bei circa 20mbar) bei einer Temperatur knapp über 100°C verascht [Anton Paar GmbH].

Das Aschenvolumen beträgt abhängig von der beim Veraschen erreichten

⁷Extran Sauer AP 22 mit Citronensäure; Erzeuger: Merck 1.07561.2500

⁸*Cool Plasma Asher*: Type CPA - 1, Anton Paar, Graz, Österreich

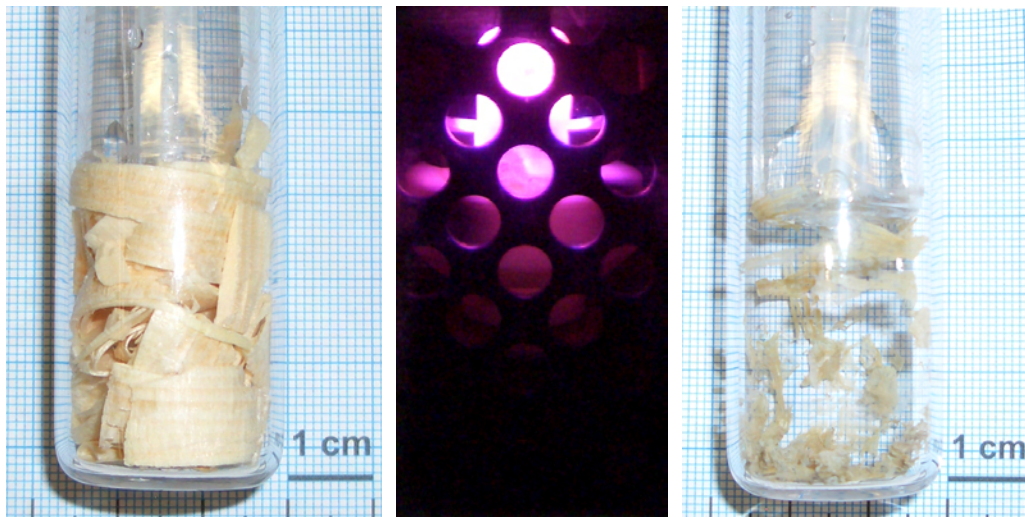


Abbildung 5.5.: Veraschungsprozess im Cool Plasma Asher Probengefäß mit Kühlfinger (oben, mit Zuleitung für Sauerstoff), gefüllt mit *Pinus Cembra* Spänen; Bild links: vor Beginn der Veraschung, 1.463 g; Bild mitte: während der Veraschung; Bild rechts: nach der Veraschung, 4 mg $\hat{=}$ 0.27%, Veraschungsdauer: 72.7 h, O_2 -Fluss: 4 l/h, Hochfrequenzleistung: 20 W, Grobvakuum: 20 mbar

Temperatur durchschnittlich unter 3% des ursprünglichen Holzvolumen [Liodakis u. a., 2005; Misra u. a., 1993].

Die mit dem *Cool Plasma Asher* durchgeführten Veraschungen reduzierten das Probenmaterial unter 5 mg. Diese Aschenmenge ist für eine weitere aussagekräftige Untersuchung nicht ausreichend. Die Verwendung größerer Ausgangsmassen ist aufgrund des vorgegebenen Probenvolumens zur Veraschung (siehe Abbildung 5.5) nicht möglich.

5.2.3. Gefriertrocknung

Um eine eindeutige Bezugsmasse zu erhalten, ist eine über die Lufttrocknung hinausgehende Trocknung notwendig. Die Gefriertrocknung stellt ein schonendes Trocknungsverfahren dar. Das verwendete Gerät⁹ besteht aus einer zylinderförmigen evakuierbaren Kammer, welche durch eine am äußeren Umfang angebrachte spulenförmige Kühlmittelleitung gekühlt wird. Diese Spule dient als Eiskondensator. Zentral können auf einer kreisförmigen Stellfläche Probengefäße in diese Kammer eingebracht werden.

Das Trocknen erfolgt durch Überführen des wasserhaltigen Materials in den gefrorenen Zustand. Die dazu verwendete Kühlschule erreicht Temperaturen von circa -80°C , die Proben selbst werden auf circa -20°C geheizt. Bei Feinvaku-

⁹Gefriertrocknungsanlage ALPHA 2-4 (Best.-Nr. 100402) der Firma MARTIN CHRIST, Gefriertrocknungsanlagen GmbH

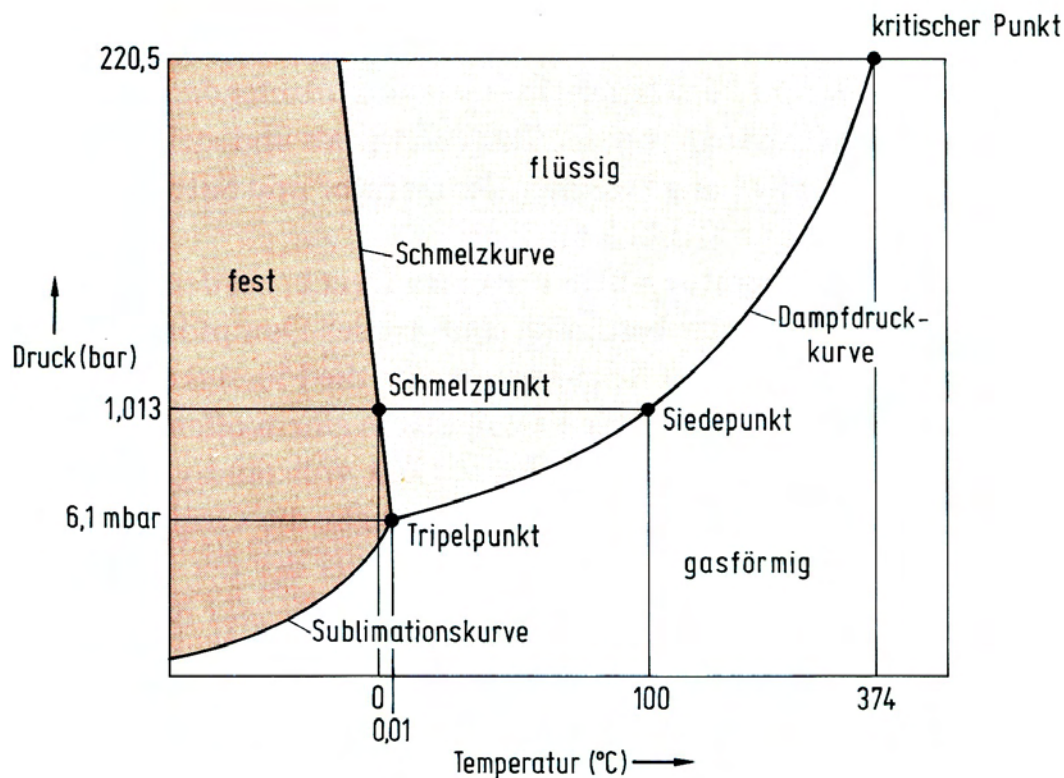


Abbildung 5.6.: Zustandsdiagramm Wasser (aus [Riedel, 2004, S. 253])

umbedingungen bei einem Druck unter 6.1 mbar (= Druck des Tripelpunkts von Wasser) wird der Dampfdruck des gefrorenen Wassers unterschritten, das Eis sublimiert (siehe Sublimationskurve in Abbildung 5.6). Der Druck in der Vakuumkammer wird dabei so eingestellt, dass dieser den Dampfdruck von Wasser bei Probertemperatur unterschreitet, den Dampfdruck von Wasser bei der Temperatur der Kühlpule jedoch überschreitet. Dies führt zur Sublimation des gefrorenen Wassers der Probe und zur Kondensation des Wasserdampfs an der Kühlpule [Christ, 1984].

Bei Untersuchungen zur Flüchtigkeit von Bestandteilen beim Gefriertrocknen von Proben biologischen Ursprungs werden in der Studie [Krokida und Philipopoulos, 2006; Bos u. a., 2002] nur organische Komponenten identifiziert.

6. Aktivierung

Zur Aktivierung stehen am Forschungsreaktor des ATI verschiedene Bestrahlungspositionen zur Verfügung. In dieser Arbeit wurden Proben in einem Trockenbestrahlungsrohr, rotierend oberhalb des Reaktorkerns, in einer Rohrpostanlage (Langsame Rohrpost) und in dem Zentralen Bestrahlungsrohr aktiviert.

Anmerkung: für sämtliche Einwägearbeiten verwendete Waage: *Sartorius Elektronische Feinwaage Bauart R160P-*A1*

6.1. Aktivierung im Trockenbestrahlungsrohr

Um erste Erfahrungen in der Aktivierung von Holz zu gewinnen, wurde die Möglichkeit der Bestrahlung in einem der Trockenbestrahlungsrohre am Forschungsreaktor des ATI gewählt. Diese Position wurde aus Gründen der Verfügbarkeit und des einfachen Zuganges ausgewählt. Der Neutronenfluss in den Trockenbestrahlungsrohren beträgt circa $1.7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

6.1.1. Pinus Cembra Kern- und Splintholz

Zur Ermittlung eines geeigneten Standards und geeigneter Bestrahlungs- und Abklingzeiten wurden zunächst jeweils eine Probe aus Kern- und eine Probe aus Splintholz, luftgetrocknet, analysiert. Diese Proben stellen Holz aus ca. 5 Jahresringen dar und stammen aus der Probe *Zirbe C* (siehe 5.1.2). Sie wurden dem halben Stammquerschnitt entnommen, und waren am lebenden Baum in Richtung Osten orientiert. Die Aktivierung erfolgte durch eine 2-tägige (siehe Tabelle 6.2, Reaktorprotokoll) Bestrahlung in einem Trockenbestrahlungsrohr (Nr. 5) des Forschungsreaktors des ATI im Zeitraum vom 22. bis 23. Mai 2007.

| Datum: 15.5.2007 | | |
|------------------|----------------------------|-----------------------|
| Proben Nr. | Jahresringe Bezeichnung | Nettogewicht in mg |
| 1 | Kernholz Zirbe C | 417.92 |
| 2 | Splintholz Zirbe C | 270.32 |
| 3 | Standard SO-1 | 25.68 |

Tabelle 6.1.: *Einwägetabelle Bestrahlung 7.1, Kern- und Splintholz Pinus Cembra, Proben luftgetrocknet*

6. Aktivierung

| Datum | Reaktor kritisch Uhrzeit | Dauer in h ^{min} |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 22. 05. 2007 | 10 ⁵⁶ - 14 ⁴⁹ | 03 ³⁵ |
| 22. 05. 2007 | 14 ⁵³ - 15 ⁴⁵ | 00 ⁵² |
| 23. 05. 2007 | 08 ⁴⁷ - 15 ⁴⁵ | 06 ⁵⁷ |
| Σ | | 11 ⁴³ |

Tabelle 6.2.: Reaktorkritikalität während der Bestrahlung der Proben Kern- und Splintholz *Pinus Cembra*, Auszug aus dem Reaktorprotokoll

6.2. Rotierende Aktivierung oberhalb des Reaktorkerns

Die ersten Erfahrungen der Aktivierung im Trockenbestrahlungsrohr zeigten, dass die Spurenelementkonzentrationen so gering sind, dass danach gestrebt werden muss, eine größtmögliche Probenmasse zu aktivieren. Um eine gute Vergleichbarkeit verschiedener Proben zu erhalten, ist eine gemeinsame Aktivierung günstig. Diese Bestrahlungsposition erlaubt eine Kombination dieser Ansprüche. Der Neutronenfluss wurde 1 cm oberhalb des Reaktorkerns gemessen (siehe Anhang B) und beträgt dort für thermische Neutronen circa $5.5 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

6.2.1. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

Im Stammquerschnitt von Zirbe C sind 229 Jahresringe (innerster Ring entspricht dem Jahr 1778) erkennbar. Entlang einer, am lebenden Baum nach Westen orientierten, Ausrichtung wurden Proben, jeweils 5 Jahresringe umfassend, aufbereitet. In dieser Arbeit werden 20 Proben, entsprechend dem Zeitraum 1906 - 2007, betrachtet. Die Probenbezeichnung ist in der Einwägetabelle, Tabelle 6.3, angegeben. Um möglichst große Probenmassen zu erreichen, wurden diese Proben in ca. 11 cm lange Quarzgläser ($\varnothing 12 \text{ mm}$) eingeschweißt (Quarzglasbehandlung siehe 5.2.1). Aufgrund des relativ großen Probenvolumens ist keine Bestrahlung in den üblichen Bestrahlungspositionen am Forschungsreaktor des ATI möglich. Es wurde eine Bestrahlungsposition oberhalb des Reaktorkerns gewählt. Die Proben wurden hierzu am Umfang eines langsam rotierenden Aluminiumbechers angeordnet (siehe Abbildung 6.1). Dieser rotiert in minimaler Distanz über dem Kern an in Abbildung 3.4 angegebener Position *RBO*. Die Aktivierung erfolgte im Zeitraum vom 23. bis 27. Juli 2007 (siehe Tabelle 6.4, Reaktorprotokoll).

6.2.2. Vergleich der Bestrahlungsbedingungen der Standards

Die Elementkonzentrationen in den verwendeten Standards sind bekannt (siehe Anhang C.2). Um die Bestrahlungsbedingungen zu vergleichen, können die Zähl-



Abbildung 6.1.: rotierender Probenbehälter (oben Zentralperspektive, unten Aufsicht); Die Proben sind am inneren Umfang angeordnet, und werden durch eine Aluminiumfeder an den einschließenden Aluminiumbecher gedrückt. Angebrachtes Blei (fehlt in Fotos), verhindert das Aufschwimmen der einzelnen Proben. Der Aussendurchmesser des einfassenden Aluminiumbechers beträgt 100 mm.

6. Aktivierung

| Datum: 17.7.2007 | | | |
|------------------|------------------------|------|-----------------------|
| Proben Nr. | Jahresringe von bis | | Nettogewicht in mg |
| 1 | 2001 | 2007 | 695.31 |
| 2 | 1996 | 2000 | 621.75 |
| 3 | 1991 | 1995 | 851.87 |
| 4 | 1986 | 1990 | 727.72 |
| 5 | 1981 | 1985 | 647.29 |
| 6 | 1976 | 1980 | 764.47 |
| 7 | 1971 | 1975 | 793.80 |
| 8 | 1966 | 1970 | 878.87 |
| 9 | 1961 | 1965 | 744.38 |
| 10 | 1956 | 1960 | 572.55 |
| 11 | 1951 | 1955 | 741.96 |
| 12 | 1946 | 1950 | 1090.58 |
| 13 | 1941 | 1945 | 877.40 |
| 14 | 1936 | 1940 | 702.30 |
| 15 | 1931 | 1935 | 789.12 |
| 16 | 1926 | 1930 | 863.67 |
| 17 | 1921 | 1925 | 679.89 |
| 18 | 1916 | 1920 | 785.41 |
| 19 | 1911 | 1915 | 788.01 |
| 20 | 1906 | 1910 | 904.25 |
| Standards | | | |
| S1 | SO-1 | | 110.34 |
| S2 | NIST 1515 | | 106.97 |
| S3 | NIST 1566b | | 107.91 |
| S4 | NIST 1573a | | 99.81 |

Tabelle 6.3.: *Probenbezeichnung und Einwägetabelle Bestrahlung 6.2.1, Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Proben gefriergetrocknet (8 Tage)*

6.2. Rotierende Aktivierung oberhalb des Reaktorkerns

| Datum | Reaktor kritisch Uhrzeit | Dauer in h ^{min} |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 23. 07. 2007 | 08 ⁴¹ - 15 ⁴⁵ | 07 ⁰⁴ |
| 24. 07. 2007 | 09 ⁴⁰ - 09 ⁴³ | 00 ⁰³ |
| 24. 07. 2007 | 10 ³⁶ - 14 ⁵⁷ | 04 ²¹ |
| 24. 07. 2007 | 15 ¹⁴ - 15 ¹⁵ | 00 ⁰¹ |
| 24. 07. 2007 | 15 ²⁷ - 15 ⁵⁰ | 00 ²³ |
| 25. 07. 2007 | 08 ⁴⁷ - 09 ⁰² | 00 ¹⁵ |
| 25. 07. 2007 | 09 ⁴³ - 15 ⁴⁵ | 06 ⁰² |
| 26. 07. 2007 | 09 ¹² - 15 ⁴⁵ | 06 ³³ |
| 27. 07. 2007 | 08 ⁴³ - 13 ⁵⁰ | 05 ⁰⁷ |
| Σ | | 29 ⁴⁹ |

Tabelle 6.4.: Reaktorkritikalität während der Bestrahlung der Proben *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Auszug aus dem Reaktorprotokoll;

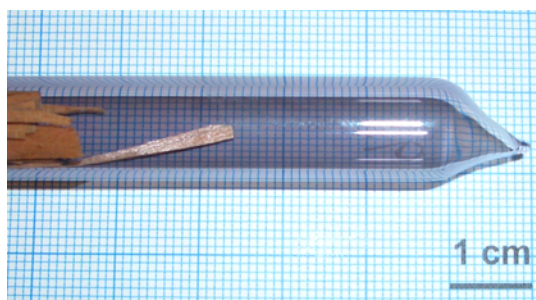


Abbildung 6.2.: Bestrahlungskapsel aus hochreinem Quarzglas mit eingeschweißten Xylem *Pinus Cembra* nach 30 h Bestrahlung (siehe Tabelle 6.4, Reaktorprotokoll) oberhalb des Reaktorkerns des ATI. Das Quarzglas ist durch die Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung grüulich gefärbt; Rauchquarz;

6. Aktivierung

| Radionuklid | SO - 1 | NIST 1515 | NIST 1566b | NIST1573a |
|------------------|--------|-----------|------------|-----------|
| ^{24}Na | 11.9 | (68.5) | 12.5 | (14.3) |
| ^{42}K | 0.121 | 0.122 | 0.142 | 0.123 |

Tabelle 6.5.: Vergleich der Zählraten verschiedener Elemente der zusammen aktivierten Standards. Alle Angaben in $\text{mg}^{-1}(\text{des aktivierbaren Elements})\text{s}^{-1}$ zum Zeitpunkt des Beginns der ersten Messung. Eingeklammerte Werte basieren auf deutlich abweichenden geringeren Elementkonzentrationen (siehe Standard Konzentrationsangaben in Anhang C). Bei Na spielen Verunreinigungen im Quarzglas dann eine entscheidendere Rolle.

raten verschiedener Elemente, unterschiedlicher Standards, verglichen werden. Hierzu wurde aus den gemessenen Gammaspektren (Tabelle D.11, D.12, D.13 und D.14) nach Abschnitt 3.2.5 die Zählrate Z_0 eines Elements in den verschiedenen Standards berechnet. Die folgenden Angaben in Tabelle 6.5 beziehen sich jeweils auf den Zeitpunkt des Beginns der ersten Messung. Die Ergebnisse unterstützen die These ähnlicher Aktivierungsbedingungen im rotierenden Aluminiumbecher.

6.3. Aktivierung in der Langsamen Rohrpost

Zur Bestimmung von Spurenelementen mit kurzlebigen Aktivierungsprodukten (Al, Cl und Mg) ist der Abklingvorgang zwischen Probenentnahme nach Ende der Aktivierung und vor Beginn der Messung zu minimieren. Ein Rohrpostsystem erlaubt dies. Der Neutronenfluss in dieser Bestrahlungsposition beträgt circa $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

6.3.1. Probe Nr. 20 Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

Die Langsame Rohrpost ermöglicht ein schnelles Zugreifen auf eine Probe nach einem Bestrahlungsvorgang (Bestrahlungsposition siehe Abbildung 3.4).

6.3.1.1. 1h, 250kW

Probenmaterial der Probe Nr. 20 *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, $m = 1140.66 \text{ mg}$, wurde verpackt in einer Kunststoffkapsel 3600 s lang im Reaktor aktiviert (2. August 2007 von 09^{33} bis 10^{33}). Der Reaktor war während des gesamten Zeitraumes kritisch bei einer Leistung von 250 kW.

6.3.1.2. 2min, 225kW

Probenmaterial der Probe Nr. 19 *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, $m = 1107.78$ mg, wurde verpackt in einer Kunststoffkapsel 120 s lang im Reaktor aktiviert (3. August 2007 von 10^{36} bis 10^{38}). Der Reaktor war während des gesamten Zeitraumes kritisch bei einer Leistung von 225 kW.

6.4. Aktivierung im Zentralen Bestrahlungsrohr

Da in den durchgeführten Messungen mit Aktivierungen im Trockenbestrahlungsrohr, rotierend oberhalb des Kerns und mit Hilfe der Langsamen Rohrpostanlage vorwiegend die langlebigen Nuklide vielversprechend bezüglich Standortunterschieden sind, wurden Bestrahlungen im *Zentralen Bestrahlungsrohr (ZBR)* (siehe Abbildung 3.4) durchgeführt. Der höhere Neutronenfluss (circa $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) aktiviert eine höhere Anzahl an Nukliden. Die langlebigeren Radionuklide werden nach Abklingen der Linien der kurzlebigen Aktivierungsprodukte ^{56}Mn , ^{82}Br und ^{24}Na ausgewertet.

6.4.1. Probe Nr. 2 Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

In Folge der Probenaktivierung durch Neutronenbestrahlung finden in Proben Zersetzungsprozesse statt. Diese können zu einer Druckentwicklung, im Extremfall auch zum Bersten der Probenkapseln, führen. Um diesen Aspekt bei Aktivierungen von Holz im *ZBR* einschätzen zu können, wurde zunächst eine Probe (Probe Nr. 2 *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007) eingeschweißt in einer Quarzglaskapsel im *ZBR* aktiviert. Es konnte keine Druckentwicklung beobachtet werden.

| Datum: 6.8.2007 | |
|--|-----------------------|
| Proben Bezeichnung | Nettogewicht in mg |
| <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 Probe Nr. 2 | 759.48 |

Tabelle 6.6.: *Einwägetabelle Bestrahlung 6.4.1, Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe Nr. 2, Probe gefriergetrocknet (8 Tage)*

6.4.2. 3 Jahresringsegmente 1892 - 1896 Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007)

Zur Bestimmung der Inhomogenitäten innerhalb von Jahresringen, wurden 3 Proben aus einem 5-Jahresringsegment untersucht. Hierzu wurde Holz aus der

6. Aktivierung

| Datum | Reaktor kritisch Uhrzeit | Dauer in h ^{min} |
|-------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 7. 08. 2007 | 08 ⁵⁶ - 15 ⁴⁵ | 06 ⁴⁹ |
| 8. 08. 2007 | 08 ⁴¹ - 15 ⁴⁵ | 07 ⁰⁴ |
| Σ | | 13 ⁵³ |

Tabelle 6.7.: Reaktorkritikalität während der Bestrahlung der Probe Nr. 2 *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Auszug aus dem Reaktorprotokoll;



Abbildung 6.3.: Probenpositionen, Probe S, Probe NO und Probe NW, in Baumscheibe *Pinus Cembra* Zirbe C 1892 - 1896, $\varnothing_{max} \approx 62$ cm (Norden oben)

vollen Baumscheibe *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007), siehe Abschnitt 5.1.2 und Abbildung 6.3, herangezogen. Ausgewählt wurde ein Bereich, in dem optisch keine Wachstumsstörungen ersichtlich waren (siehe Abbildung 6.4). Der ausgewählte Bereich entspricht den Jahren 1892 - 1896. Innerhalb dieser Jahre trat ein relativ zu den angrenzenden Jahresringen großes Wachstum auf. Die 3 Proben entstammen den Ausrichtungen Südsüdost (175° Probe S), Nordost (55° Probe NO) und Westnordwest (295° Probe NW).

6.4. Aktivierung im Zentralen Bestrahlungsrohr

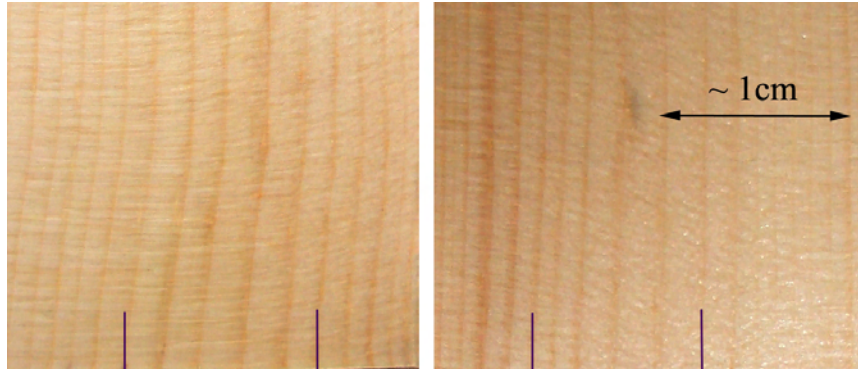


Abbildung 6.4.: Querschnitt durch Probenmaterial *Pinus Cembra* Zirbe C (links: Probe NO, rechts: Probe NW). Der markierte Bereich entspricht dem 5-Jahresringsegment 1892 - 1896, aus dem das jeweilige Probenmaterial entnommen wurde.

| Datum: 21.8.2007 | | |
|-------------------|--------------------|---------------------|
| Probenbezeichnung | Nettogewicht in mg | Bruttogewicht in mg |
| Probe S | 600.12 | 10402.44 |
| Probe NO | 968.19 | 11245.73 |
| Probe NW | 820.50 | 9666.29 |
| Quarz Leerwert | 9419.09 | 9419.09 |
| Standards | | |
| S1 SO-1 | 107.03 | 1772.64 |
| S2 NIST 1515 | 117.40 | 1822.33 |
| S3 NIST 1566b | 133.03 | 1786.58 |
| S4 NIST 1573a | 103.48 | 1739.67 |

Tabelle 6.8.: Einwägetabelle Bestrahlung 6.4.2, *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1892 - 1896, Probe gefriergetrocknet (8 Tage)

| Datum | Reaktor kritisch Uhrzeit | Dauer in h ^{min} |
|-------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 3. 09. 2007 | 10 ³⁴ - 15 ⁵² | 05 ¹⁸ |
| 4. 09. 2007 | 09 ³³ - 09 ⁴⁰ | 00 ⁰⁷ |
| Σ | | 05 ²⁵ |

Tabelle 6.9.: Reaktorkritikalität während der Bestrahlung der Proben S, NO, NW, *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1892 - 1896, Auszug aus dem Reaktorprotokoll;

6. Aktivierung

7. Messergebnisse

Die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Messungen nach den in Kapitel 6 durchgeführten Aktivierungen sind hier angegeben. Die Gammaspektren auf denen die Ergebnisse beruhen sind jeweils bei den Messergebnissen angeführt und im Anhang D dargestellt.

7.1. Pinus Cembra Kern- und Splintholz

Die in Tabelle 7.1 angegebenen Elemente konnten nachgewiesen werden. Mit den Proben wurde ein Standard (SO-1 in Tabelle C.2 spezifiziert) aktiviert. Die in Tabelle C.2 angeführten Elementkonzentrationen werden in [Govindaraju, 1994] ergänzt und korrigiert. Unter Heranziehen dieses erweiterten Elementspektrums wurden die Elementkonzentrationen von Br, Ba, Ca, Cs, Cr, Fe, K, La, Mn, Na, Rb, Sb und Zn quantitativ abgeschätzt (siehe Tabelle 7.2).

| <i>Pinus Cembra</i> Kern- und Splintholz | | | | |
|--|-----------------------|-------------|--|-----------------------|
| Probenbezeichnung | Aktivierung Abschnitt | Messung Nr. | zugeordnete Elemente | Gammaspektrum Tabelle |
| Splintholz mit Quarzglas | 6.1.1 | 1A | Br, K, Mn, Si, Zn | D.1 |
| Splintholz mit Quarzglas | 6.1.1 | 1D | Ag, Au, Br, Ca, Cs, La, Rb, Sb, Zn | D.4 |
| Splintholz ohne Quarzglas | 6.1.1 | 1G | Ag, Br, Ca, Cs, Rb, Sb, Zn | D.7 |
| Kernholz mit Quarzglas | 6.1.1 | 1B | Br, K, Mn, Si, Zn | D.2 |
| Kernholz mit Quarzglas | 6.1.1 | 1E | Ag, Au, Br, Ca, Cd, Cs, La, Rb, Sb, Zn | D.5 |
| Kernholz ohne Quarzglas | 6.1.1 | 1H | Ag, Br, Ca, Cs, Rb, Zn | D.8 |

Tabelle 7.1.: Messergebnisse *Pinus Cembra* Kern- und Splintholz; Elemente, deren langlebigen Aktivierungsprodukte im Quarzglas (Messung 1I, Tabelle D.9) oder als natürlichen Radionuklide (Leerwertmessung L1, Tabelle D.34) nachgewiesen wurden, wurden entfernt.

7. Messergebnisse

Die quantitativen Konzentrationsangaben wurden durch Zählratenvergleiche mit Standards, welche zusammen mit den Proben aktiviert wurden, ermittelt (siehe Abschnitt 3.2.5). Dabei wurden jeweils die in Tabelle C.1 angeführten Gamma-
linien betrachtet.

| <i>Pinus Cembra</i> Kern- und Splintholz | | |
|--|---|---|
| Element | Konzentration in Splintholz in $\mu\text{g/g}$ | Konzentration in Kernholz in $\mu\text{g/g}$ |
| Br | $3.4 \cdot 10^{-2}$ | $1.2 \cdot 10^{-2}$ |
| Ba | 0.90 | 0.81 |
| Ca | 271 | 192 |
| Cs | $5.7 \cdot 10^{-2}$ | $7.8 \cdot 10^{-3}$ |
| Cr | 0.62 | 0.38 |
| Fe | 68 | 38 |
| K | 722 | 81 |
| La | $6.1 \cdot 10^{-3}$ | $2.6 \cdot 10^{-3}$ |
| Mn | 45.6 | 41.6 |
| Na | 7.7 | 4.2 |
| Rb | 3.4 | $3.7 \cdot 10^{-1}$ |
| Sb | $3.3 \cdot 10^{-3}$ | $2.0 \cdot 10^{-3}$ |
| Zn | 3.4 | 3.6 |

Tabelle 7.2.: Abschätzung der Spurenelementkonzentrationen in *Pinus Cembra* Splint- und Kernholz (inklusive Anteilen der verwendeten Quarzglaskapseln), Probe Zeder C. Da nur auf einen Standard Bezug genommen wird, liegen die Fehler der absoluten Konzentrationsangaben bei etwa 20%. Betrachtet man die Messwerte relativ zueinander, so spielen diese absoluten Fehler eine geringe Rolle.

7.2. *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

Diese Messergebnisse konnten nach Aktivierungen in der Langsamen Rohrpost-anlage des ATI erzielt werden.

7.2.1. Probe Nr. 19 und Nr. 20 *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

Bei verschiedenen Bestrahlungs-, Abkling- und Messbedingungen konnten die in Tabelle 7.3 angegebenen Elemente nachgewiesen werden.

| Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007 | | | | |
|--|--------------------------|----------------|---|--------------------------|
| Proben- bezeichnung | Aktivierung Abschnitt | Messung Nr. | zugeordnete Elemente | Gammaspektrum Tabelle |
| Probe 1 | 6.2.1 | H1A | Br, K, Na | D.15 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1A | Ca, Cl, K, Mg, Mn | D.16 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1B | Ca, Cl, K, Mg, Mn, Na | D.17 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1C | Au, Br, Cl, K, Mn, Na | D.18 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1D | Au, As, Br, Co, K, Mn Na, Sb, Zn, W | D.19 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1E | Br, K, Mn, Na, Sb, Zn | D.20 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1F | Au, Ag, As, Br, Ca, Co, K, La, Mn, Na, Rb, Sb, Zn, W | D.21 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1G | Au, Ag, Br, Ca, Co, K, Na, Rb, Sb, Zn | D.22 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1H | Au, Ag, Br, Ca, Cd, Co, K, Na, Rb, Sb, Zn | D.23 |
| Probe 20 | 6.3.1.1 | LH1K | Ag, Br, Ca, Co, K, Rb, Sb, Zn | D.24 |
| Probe 19 | 6.3.1.2 | LH2A | Al, Ca, Cl, K, Mg, Mn, Na | D.25 |
| Probe 19 | 6.3.1.2 | LH2B | Al, Ca, Cl, K, Mg, Mn, Na | D.26 |
| Probe 19 | 6.3.1.2 | LH2C | Ca, Cl, K, Mn, Na | D.27 |

Tabelle 7.3.: Messergebnisse *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Bestrahlung rotierend über Kern (Probe 1) und in Langsamer Rohrpost (Probe 19 und 20), Proben gefriergetrocknet (8 Tage)

7.2.2. Probe Nr. 2 Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

Nach Aktivierung im ZBR (siehe Abschnitt 6.4.1) wurden die in Tabelle 7.4 angegebenen Elemente in Probe Nr. 2 *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, nachgewiesen.

| Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe Nr. 2 | | | | |
|--|--------------------------|----------------|--|--------------------|
| Proben- bezeichnung | Aktivierung Abschnitt | Messung Nr. | zugeordnete Elemente | Gamma- spektrum |
| Probe 2 mit Quarzglas | 6.4.1 | ZH1A | Au, Ag, Br, Ca, Co, Cr, Cs, Fe Hf, K, La, Na, Rb, Sb, Sc, Zn | D.28 |
| Probe 2 mit Quarzglas | 6.4.1 | ZH1B | Au, Ag, Ba, Br, Ca, Cd, Co, Cr, Cs Fe, Hf, La, Na, Rb, Sb, Sc, Se, Zn | D.29 |
| Probe 2 mit Quarzglas | 6.4.1 | ZH1C | Au, Ag, Ba, Br, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs Eu, Fe, Hf, La, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Zn, Zr | D.30 |
| Probe 2 ohne Quarzglas | 6.4.1 | ZH1K | Ag, Ba, Ca, Co, Cr, Cs Fe, Ni, Rb, Sb, Se, Zn | D.32 |

Tabelle 7.4.: Messergebnisse *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe Nr. 2 (mit Quarzglas), Bestrahlung im ZBR, Proben gefriergetrocknet (8 Tage)

7.3. Konzentrationsverteilung innerhalb eines 5-Jahresringsegmentes

| <i>Pinus Cembra</i> Zirbe C Jahresringsegment 1892 - 1896 | | | | | | | | |
|---|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| Element | Probe S | | Probe NO | | Probe NW | | Mittelwert | |
| | c in $\mu\text{g/g}$ | σ in % | c in $\mu\text{g/g}$ | σ in % | c in $\mu\text{g/g}$ | σ in % | c in $\mu\text{g/g}$ | σ in % |
| Na ^I | 18.9 | 67 | 10.8 | 67 | 9.9 | 67 | 13.2 | 31 |
| K | 173 | 6 | 168 | 5 | 152 | 3 | 164 | 6 |
| Ca | 357 | 13 | 309 | 7 | 361 | 7 | 342 | 7 |
| Sc | $2.1 \cdot 10^{-4}$ | 12 | $2.3 \cdot 10^{-4}$ | 12 | $2.0 \cdot 10^{-4}$ | 12 | $2.1 \cdot 10^{-4}$ | 6 |
| Co | $6.9 \cdot 10^{-3}$ | 12 | $4.6 \cdot 10^{-3}$ | 12 | $5.8 \cdot 10^{-3}$ | 12 | 5.8 | 16 |
| Ni | - | - | $3.9 \cdot 10^{-2}$ | 36 | - | - | - | - |
| Zn | 6.4 | 5 | 5.0 | 5 | 6.1 | 5 | 5.8 | 10 |
| Br | $6.7 \cdot 10^{-2}$ | 6 | $1.2 \cdot 10^{-1}$ | 3 | $6.8 \cdot 10^{-2}$ | 3 | $8.5 \cdot 10^{-2}$ | 29 |
| Rb | 0.84 | 2 | 0.73 | 3 | 0.63 | 2 | 0.73 | 12 |
| Ag | 0.12 | 8 | 0.16 | 8 | 0.18 | 8 | 0.15 | 16 |
| Cd | $6.8 \cdot 10^{-2}$ | 13 | $6.9 \cdot 10^{-2}$ | 13 | $9.5 \cdot 10^{-2}$ | 13 | $7.7 \cdot 10^{-2}$ | 16 |
| Cs | $1.2 \cdot 10^{-2}$ | 9 | $9.0 \cdot 10^{-3}$ | 9 | $1.1 \cdot 10^{-2}$ | 9 | $1.1 \cdot 10^{-2}$ | 12 |
| Ba | 0.45 | 27 | 0.25 | 11 | 0.31 | 11 | 0.34 | 25 |
| La ^I | $5 \cdot 10^{-4}$ | 56 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 56 | $1 \cdot 10^{-3}$ | 56 | $2 \cdot 10^{-3}$ | 94 |
| Eu | - | - | - | - | $5.3 \cdot 10^{-4}$ | 50 | - | - |
| Au | $1.5 \cdot 10^{-5}$ | 25 | $5.7 \cdot 10^{-5}$ | 25 | - | - | - | - |

Tabelle 7.5.: *Pinus Cembra* Zirbe C Spurenelementkonzentrationen im Jahresringsegment 1892 - 1896 (^I Anteile aus Quarzglas, siehe Tabelle 7.6 korrigiert).

7.3. *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) Konzentrationsverteilung innerhalb des 5-Jahresringsegmentes 1892 - 1896

In den drei Proben (S, NO und NW) des Jahresringsegmentes 1892 - 1896 (siehe Aktivierung Abschnitt 6.4.2) ergeben sich die in Tabelle 7.5 angegebenen Elementkonzentrationen. Teilweise wurden diese Konzentrationsangaben unter Verwendung der in Tabelle 7.6 angegebenen Spurenelementkonzentrationen im Quarzglas der Probenkapseln korrigiert. Die Messung der langlebigen Nuklide (siehe Tabelle C.1 im Anhang) erfolgte nach Entnehmen der Holzproben aus den Quarzglasprobenkapseln.

Die Diskussion dieser für dendrochronologische Fragestellungen interessanten Ergebnisse ist in Kapitel 8 ausgeführt.

7. Messergebnisse

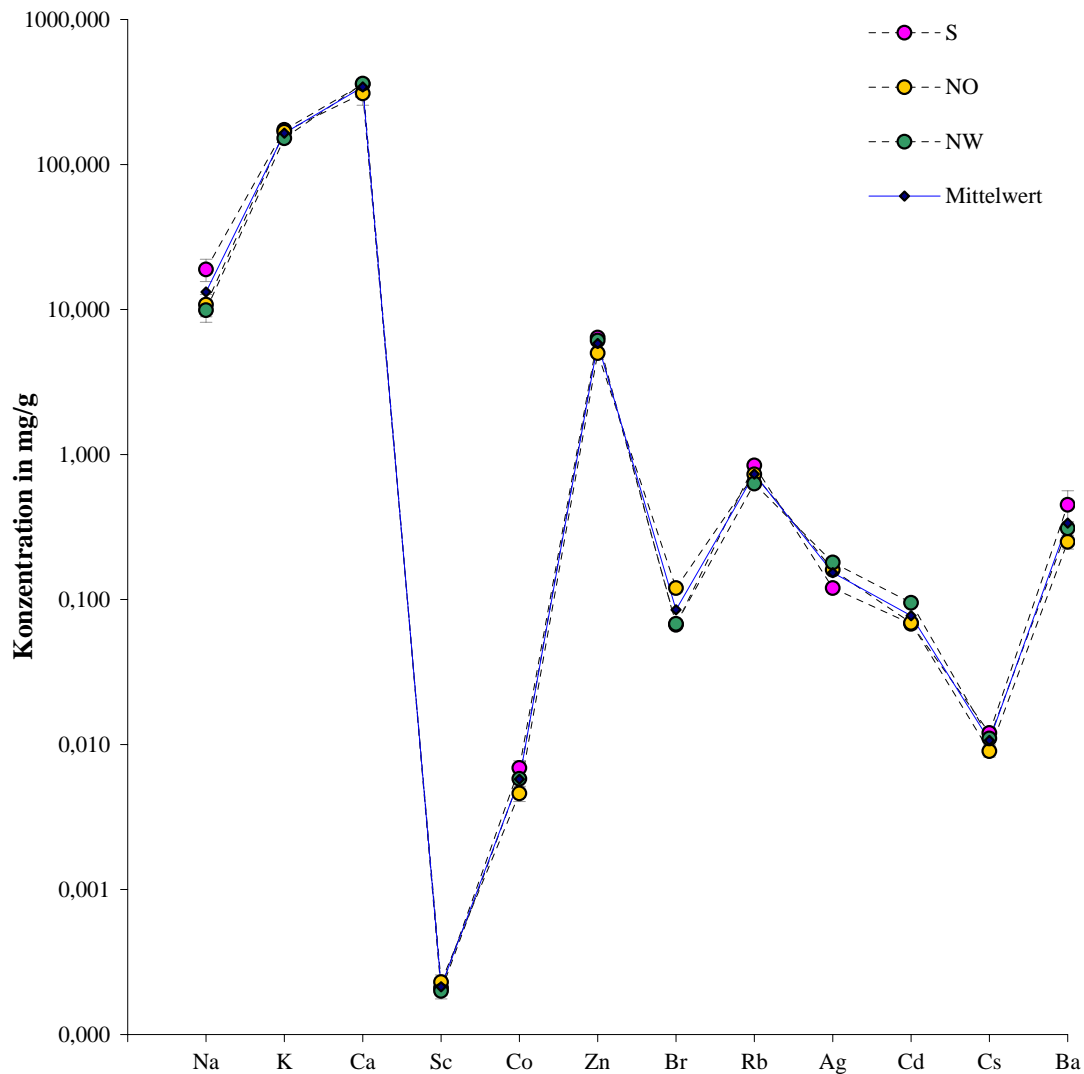


Abbildung 7.1.: *Pinus Cembra* Zirbe C Spurenelementkonzentrationen im Jahresringsegment 1892 - 1896; absolute Konzentrationsangaben der Proben S, NO und NW (siehe Tabelle 7.5)

7.3. Konzentrationsverteilung innerhalb eines 5-Jahresringsegmentes

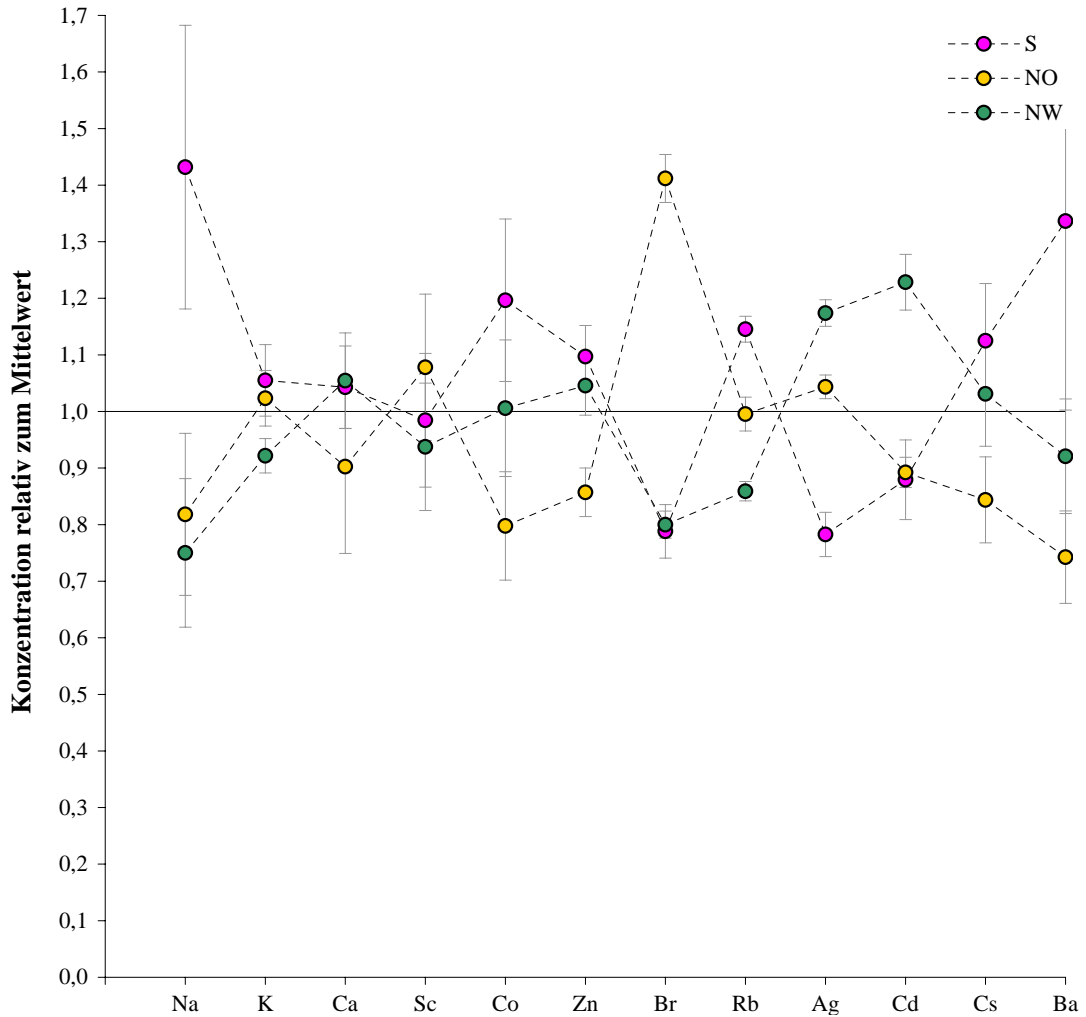


Abbildung 7.2.: *Pinus Cembra* Zirbe C Spurenelementkonzentrationen im Jahresringsegment 1892 - 1896; Darstellung auf einer linearen Skalierung zur besseren Auflösung der Konzentrationsunterschiede; Konzentrationsangaben der Proben S, NO und NW (siehe Tabelle 7.5) relativ zum Mittelwert dargestellt;

7.4. Spurenelemente in Quarzglaskapseln

Nach durchgeführten Aktivierungen von Holzproben in Quarzglaskapseln wurden durch Langzeitmessungen Verunreinigungen im Quarzglas festgestellt. Das Gammapektrum Tabelle D.9 zeigt die Anwesenheit von Ba, Cr, Fe, Eu, Sc, Sm und Yb in einer zusammen mit Holz aktivierten Quarzglaskapsel. Im Rahmen der Aktivierung Abschnitt 6.4.1 im ZBR wurde der Beitrag der langlebigen Nuklide im Quarzglas zu dem Gammapektrum von einer Quarzglaskapsel, gefüllt mit einer Holzprobe, quantifiziert. Dabei wurden die folgenden Beiträge des Quarzglases zu den Nettopeakflächen festgestellt: ^{181}Hf 100%, ^{141}Ce 100%, ^{152}Eu 100%, ^{46}Sc 100%, ^{95}Zr , 100%, ^{51}Cr 66%, ^{59}Fe 60%, ^{58}Co 38%, ^{131}Ba 26%, ^{124}Sb 22% und ^{60}Co 15%. Diese Werte wurden nach einmaligem Spülen der betrachteten Quarzglaskapsel mit Aceton ermittelt und werden von einer Messung der aus der Quarzglaskapsel entnommenen Holzprobe (siehe Gammapektrum Tabelle D.32) bestätigt (Fehler <10%). Eine weitere Messung nach einer sauren und einer mild alkalischen Ultraschallreinigung der Quarzglaskapsel bestätigt die angeführten Anteile und zeigt damit, dass es sich bei den Verunreinigungen um keine Oberflächenkontamination handelt (siehe Gammapektrum D.33).

Die Zählraten der getrennten Komponenten Holz und Quarzglas ergänzen sich zusammen zu 100% der Zählrate der Messung der geschlossenen Probenkapsel mit Holz. Dies gilt für alle in Quarzglas gefundenen Elemente. Die notwendige Trennung von Holzprobe und Quarzglaskapsel zur Messung der genannten langlebigen Nuklide ist somit zulässig, da keine Verdampfung und Kondensation am Quarzglas beobachtet werden kann.

Um die Möglichkeit der Anlagerung dieser Elemente aus der Holzprobe ausschließen zu können, und um diese Verunreinigungen absolut zu quantifizieren (siehe Tabelle 7.6), wurde in einer weiteren Aktivierung im ZBR (siehe Abschnitt 6.4.2) eine leere Quarzglaskapsel bestrahlt. Diese Quarzglaskapsel wurde wie die zur Messung von Holzproben verwendete Quarzglaskapseln behandelt. In den Gammapektren dieser leer aktivierten Quarzglaskapsel bestätigen sich abermals die Anteile der bereits genannten langlebigen Nuklide. Weiters wird Na, Au und La nachgewiesen.

| Quarzglaskapseln | | |
|-------------------------|--|----------------|
| Element | Konzentration in Quarzglaskapsel in $\mu\text{g/g}$ | Fehler in % |
| Na | 4 | 17 |
| Sc | $1.2 \cdot 10^{-4}$ | 12 |
| Cr | $4.6 \cdot 10^{-3}$ | 14 |
| Fe | 0.19 | 9 |
| Co | $7.0 \cdot 10^{-4}$ | 15 |
| Zr | $1.7 \cdot 10^{-2}$ | 18 |
| Sb | $1.3 \cdot 10^{-3}$ | 49 |
| La | $3.3 \cdot 10^{-4}$ | 15 |
| Ce | $4.2 \cdot 10^{-3}$ | 11 |
| Hf | $7.2 \cdot 10^{-4}$ | 18 |
| Au | $4 \cdot 10^{-6}$ | 20 |
| Th | $4.7 \cdot 10^{-5}$ | 50 |

Tabelle 7.6.: Spurenelementkonzentrationen in Quarzglas der Probenkapseln

7. Messergebnisse

8. Diskussion und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt verschiedene Methoden zur Spurenelementbestimmung mit NAA in Holz. Anhand des Baumes *Pinus Cembra* (L.) wurden Spurenelementkonzentrationen in mehreren Proben ermittelt. Eine durchgeführte erste Anwendung zur Bestimmung der Konzentrationsschwankungen innerhalb eines Jahresringsegments liefert die Grundlage für weitere Untersuchungen mit Bezug zu dendrochronologischen Fragestellungen.

8.1. Probenaufbereitung

Die Spurenelementkonzentrationen in Holz bewegen sich in einem Bereich von wenigen $\mu\text{g/g}$ und darunter. Dies setzt ein absolut sauberes Arbeiten in der Probenvorbereitung voraus. Die in dieser Arbeit durchgeführte Veraschung von Holzproben erwies sich als nicht zweckmäßig, da der Ascherückstand selbst bei größt möglichem Holzvolumen des verfügbaren Plasmaveraschers zu gering ausfällt. Andere Systeme, welche die Möglichkeit zur Plasmaveraschung von größeren Probenmassen ermöglichen, sind bei weiteren Untersuchungen jedenfalls in Betracht zu ziehen.

Durch Gefriertrocknen ist eine Möglichkeit zur Herstellung von Proben mit vergleichbarem Wassergehalt gegeben. Nach einer Trocknungsdauer von 8 Tagen konnte kein aus der Probe entweichendes weiteres Wasser festgestellt werden.

8.2. Bestrahlungsbedingungen

Die Konzentrationen von Spurenelementen in Holz sind so gering, dass selbst der Nachweis von Elementen, die über einen hohen Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang verfügen, schwierig ist. Die niedrigen Konzentrationswerte erfordern eine Aktivierung einer größtmöglichen Masse bei höchstmöglichem Neutronenfluss über mehrere Stunden. Einzig die Elemente Na, Ca, K und Mn mit kurzlebigen Aktivierungsprodukten sind auch bei anderen Bestrahlungsbedingungen gut nachweisbar gewesen.

Am Atominstitut der Österreichischen Universitäten bietet sich daher eine Aktivierung im Zentralen Bestrahlungsrohr des Forschungsreaktors, oder die mehrtägige Aktivierung in einem der Trockenbestrahlungsrohre an. Beide diese Möglichkeiten bringen aufgrund der beschränkten verfügbaren Bestrahlungsvolumina die Schwierigkeit mit sich, mehrere Proben zusammen zu aktivieren. Dies ist aus Gründen der Vergleichbarkeit der Messergebnisse anzustreben.

8.3. Probenkapseln

Die extrem niedrigen Spurenelementkonzentrationen in Holz erfordern bei Anwendung der NAA die Auswahl eines höchst möglich reinen Probenbehältnisses zur Aktivierung des Probenmaterials. Trotz der in Tabelle 7.6 angeführten Verunreinigungen in den verwendeten Quarzglasprobenkapseln stellen diese ein geeignetes Behältnis zur Probenaktivierung dar. Wie Messungen zeigen, siehe Abschnitt 7.4, ist es zulässig, die Holzprobe nach Aktivierung von der Probenkapsel zu trennen. Damit spielen die Verunreinigungen im Quarzglas bei der Auswertung der langlebigen Radionuklide keine Rolle. In dieser Arbeit erfolgte diese Trennung nach der Messung von Brom, da dieses flüchtig ist. Eine frühere Trennung von Probe und Probenkapsel ist denkbar, um andere kurzlebige Radionuklide (beispielsweise Au und La) störungsfrei auszuwerten.

Die Verwendung von noch reineren Polyethylenkapseln zur Bestimmung von Elementen mit langlebigen Aktivierungsprodukten ist nicht anwendbar, da dieses Material nicht den notwendigen Bestrahlungsbedingungen standhalten kann.

8.4. Nachweisbare Spurenelemente in Holz

Kurzlebige Aktivierungsprodukte Bei relativ kurzen Aktivierungszeiträumen (Neutronenfluss $\approx 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) und direkt anschließender Messung (Messdauer $< 1\text{h}$) konnten ausgehend von einer Probenmasse von circa 1 g die Elemente Al, Ca, Cl, K, Mg, Mn und Na nachgewiesen werden.

Langlebige Aktivierungsprodukte Bei Aktivierungsdauern im Bereich von Stunden (Neutronenfluss $\approx 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) können nach einer Abklingdauer von circa ein bis drei Tagen in einer Probenmasse von circa 1 g die Elemente As, Au, Br, Cd, La, Sb und W bei einer Messdauer von circa 12h nachgewiesen werden. Nach 2 Wochen Abklingzeit können in 24h Messungen die weiteren Elemente Ag, Ba, Co, Cr, Cs, Fe, Ni, Rb, Sb, Sc, Se und Zn erfasst werden.

8.5. Variation der Spurenelementkonzentrationen in Holz

8.5.1. Kern- und Splintholz

Eine erste Abschätzung der Spurenelementkonzentrationen (siehe Abschnitt 7.1) in Kern- und Splintholz zeigt große Konzentrationsunterschiede in diesen Wachstumsabschnitten des betrachteten Baumes. Generell liegen die Spurenelement-

konzentrationen in Splintholz höher als jene des Kernholzes. Die Abweichungen lassen sich durch einen Faktor von 1 bis 10 beschreiben. Ausgenommen die Konzentration von Zn lag im Kernholz leicht über der Konzentration im Splintholz. Diese Tendenz zunehmender Zn Konzentration mit zunehmendem Alter des Baumes wird von einer weiteren Konzentrationsbestimmung in den Jahresringen 1892 - 1896 bestätigt. Auch die Tendenzen in Kern- und Splintholz der weiteren Elemente werden von deren Elementkonzentrationen in den Jahresringen 1892 - 1896 bestätigt. Dies trifft im besonderen auf die Elemente Cr, Fe, Sb und Se zu. Deren Konzentration liegt in den Jahren 1892 - 1896 unter der Nachweisgrenze. In Jahresringen jüngerer Alters sind die Aktivierungsprodukte dieser Elemente in Gammaspekten eindeutig erkennbar.

8.5.2. Variation innerhalb eines Jahresringsegments

In Abbildung 7.2 sind die Streuungen einer vergleichenden Messung von 3 Proben aus denselben Jahresringen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen relativ geringe Variationen innerhalb dieser Jahresringe für die Elemente K, Ca und Sc (Abweichung <10%).

Für die Elemente Co, Zn, Br, Rb, Ag, Cd, Cs und Ba sind Abweichungen <20% zu beobachten. Bei K, Ca, Br und Cd trifft es weiters zu, dass zwei Konzentrationswerte kaum voneinander abweichen (Abweichung <5%), der jeweils dritte jedoch deutlich eine abweichende Konzentration aufweist. Eine Systematik dieser Abweichungen ist nicht erkennbar.

Ba weist Konzentrationsschwankungen von bis zu 40% auf. Die Elementkonzentrationen von La und Au weisen Variationen von teilweise über 100% auf. Diese Angaben zu La und Au sind jedoch aufgrund der durchgeführten Korrektur der Verunreinigungen im Quarzglas mit ebenso großen Fehlern belastet.

8.6. NAA Spurenelementanalytik in dendrochronologischen Fragestellungen

Die Variationen der betrachteten Spurenelemente innerhalb derselben Jahresringe sind für verschiedene als Marker für Umwelteinflüsse vielversprechende (seltene) Elemente relativ gering und liegen im Bereich von $\pm 20\%$. Vergleicht man die Abweichungen dieser Elemente innerhalb desselben Jahresringes mit jenen der Konzentrationsunterschiede in Kern- und Splintholz, so ist es für viele Elemente durchaus zulässig, eine Probe aus einer Stelle eines Jahresringes als repräsentativ für diesen Jahresring zu betrachten. Auch die Nachweisbarkeit verschiedener Elemente im Jahresringabschnitt 1996 - 2000 (siehe Tabelle

8. *Diskussion und Ausblick*

7.4), und das Fehlen dieser Nachweisbarkeit der Elemente in dem Jahresringabschnitt 1892 - 1896 (siehe Tabelle 7.5) unterstützt diese Annahme. In konkreten Anwendungsfällen sind Konzentrationsverläufe über mehrere Jahresringabschnitte zu betrachten. Zeigen diese Verläufe signifikante Zu- bzw. Abnahmen von Elementkonzentrationen, welche die hier ermittelten Schwankungen innerhalb der Jahresringe selbst überschreiten, so ist von ebensolchen Konzentrationstendenzen in anderen Orientierungen im Baumquerschnitt auszugehen.

Literaturverzeichnis

- [Agarwal 1991] AGARWAL, B. K.: *X-Ray Spectroscopy: An Introduction*. Springer, 1991
- [Alfassi u. a. 1998] ALFASSI, Z. B. ; DE SILVA, N. ; FELIX, S. ; GLASCOCK, M. D. ; C., Gregoire D. ; HAUSER, P. C. ; KREGSAMER, P. ; LEVIN, S. ; MANTLER, M. ; PELLY, I. Z. ; POLAK, M. ; RAUHALA, E. ; WOBRAUSCHEK, P. ; ALFASSI, Z. B. (Hrsg.): *Instrumental Multi-Element Chemical Analysis*. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht/Boston/London, 1998
- [Allitsch 1986] ALLITSCH, Getrude: *Neutronenaktivierungsanalyse von fossilen und rezenten Naturharzen*. Atominstitut der Österreichischen Universitäten, 1986
- [Aoki u. a. 1998] AOKI, Toru ; KATAYAMA, Yukio ; KAGAWA, Akira ; KOH, Susumu ; YOSHIDA, Kohji: Measurement of trace elements in tree rings using the PIXE method. In: *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 136-138 (1998), S. 919–922
- [Bergmann u. a. 2003] BERGMANN, Ludwig ; SCHAEFER, Clemens ; KLEIN-POPPE, Hans ; RISCH, Nikolaus ; FINK, Manfred ; LIEB, Klaus-Peter ; HEUER, Rolf-Dieter ; SCHMÜSER, Peter ; RAITH, Wilhelm (Hrsg.): *Bergmann Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 4, Bestandteile der Materie, Atome, Moleküle, Atomkerne, Elementarteilchen, 2. überarbeitete Auflage*. Walter de Gruyter & Co.KG, D-10785 Berlin, 2003
- [Bindler u. a. 2004] BINDLER, Richard ; RENBERG, Ingemar ; KLAMINDER, Jonatan ; EMTERYD, Ove: Tree rings as Pb pollution archives? A comparison of $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ isotope ratios in pine and other environmental media. In: *The Science of the Total Environment* 319 (2004), S. 173–183
- [BNL 2007] BNL, Brookhaven National L.: *Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR / CSISRS), Database Version of July 16, 2007*. National Nuclear Data Center, 2007
- [Bos u. a. 2002] BOS, Rein ; KOULMAN, Albert ; WOERDENBAG, Herman J. ; QUAX, Wim J. ; PRAS, Niesko: Volatile components from *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. In: *Journal of Chromatography A* 966 (2002), S. 233–238

- [Brackhage u. a. 1996] BRACKHAGE, C. ; HAGEMEYER, J. ; BRECKLE, S. W.: Radial distribution patterns of Cd and Zn in stems of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees analyzed 12 years after a contamination event. In: *Water, Air and Soil Pollution* 90 (1996), S. 417–428
- [Calva-Vázquez u. a. 2006] CALVA-VÁZQUEZ, G. ; RAZO-ANGEL, G. ; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L. ; RUVALCABA-SIL, J. L.: Study of Z >18 elements concentration in tree rings from surroundings forests of the Mexico Valley using external beam PIXE. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* B249 (2006), S. 588–591
- [Christ 1984] CHRIST (Hrsg.): *Bedienungsanleitung Gefriertrocknungsanlage ALPHA 2-4 (Best.-Nr. 100402) mit Anlagensteuerung LDC-1M*. MARTIN CHRIST Gefriertrocknungsanlagen GmbH, 1984
- [Cichocki 2000] CICHOCKI, Otto ; BIETAK, Manfred (Hrsg.): *Methods and Aims of Dendrochronology. Dating Wooden Objects from Eastern Mediterranean in the Second Millenium B.C. (Absolut Chronology IV) In: Proceedings of an International Symposium at Schloß Haindorf 15th-17th of November 1996 and at the Austrian Academy, Vienna, 11th-12th of May 1998*. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2000
- [Clarke und Sloss 1992] CLARKE, Lee B. ; SLOSS, Lesley L.: *Trace elements*. IEA Coal Research, London, 1992
- [Cutter und Guyette 1993] CUTTER, Bruce E. ; GUYETTE, Richard P.: Anatomical, Chemical, and Ecological Factors Affecting Tree Species Choice in Dendrochemistry Studies. In: *Journal of Environmental Quality* 22 (1993), S. 611–619
- [De Soete u. a. 1972] DE SOETE, D. ; GIJBELS, R. ; HOSTE, J.: *Neutron Activation Analysis*. Wiley-Interscience, 1972
- [Dion u. a. 1993] DION, M. ; LORANGER, S. ; KENNEDY, G. ; COURCHESNE, F. ; ZAYED, J.: Evaluation of black spruce (*picea mariana*) as a bioindicator of aluminum contamination. In: *Water, Air and Soil Pollution* 71, n1-2 (1993), S. 29–41
- [Douglass 1914] DOUGLASS, Andrew E.: A Method of Estimating Rainfall by the Growth of Trees. In: *Bulletin of the American Geographical Society* 46 No. 5 (1914), S. 321–335
- [Fiedler und Rösler 1993] FIEDLER, Hans J. ; RÖSLER, Hans J. ; 25 FACHWISSENSCHAFTLERN bearbeitet von (Hrsg.): *Spurenelemente in der Umwelt*. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 2. überarbeitete Auflage, 1993

- [Flügel und Neubauer 1984] FLÜGEL, Helmut W. ; NEUBAUER, Franz R.: *Geologische Karte der Steiermark 1:200.000*. Geologische Bundesanstalt Wien, 1984
- [Friedrich u. a. 2006] FRIEDRICH, W.L. ; KROMER, B. ; FRIEDRICH, M. ; HEINEMEIER, J. ; PFEIFFER, T. ; TALAMO, S.: Santorini Eruption Dated to 1627-1600 B.C. In: *Science* 312 (2006), S. 548
- [Frimmel 1987] FRIMMEL, Hartwig: *Strukturgeologische, geochemische und geochronologische Untersuchungen zur Entwicklungsgeschichte des NW-Randes der Gurktaler Decke (Oberostalpin)*. 1987
- [Gills 1995] GILLS, Thomas E.: Certificate of Analysis, Standard Reference Material 1573a Tomato Leaves. In: *National Institute of Standards & Technology, Standard Reference Materials Group* (1995)
- [Govil 2001] GOVIL, I. M.: Proton Induced X-ray Emission – A tool for non-destructive trace element analysis. In: *CURRENT SCIENCE* 80 (2001), S. 12
- [Govindaraju 1994] GOVINDARAJU, K. (Hrsg.): *Geostandards Newsletter, Special Issue of Geostandards Newsletter, Vol XVIII, ISSN: 0150 - 5505*. Analytical Standards of Minerals, Ores and Rocks, Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CNRS), 1994
- [Grassi u. a. 2005] GRASSI, N. ; MIGLIORI, A. ; MANDO, P. A. ; CASTILLO, H. Calvo del: Differential PIXE measurements for the stratigraphic analysis of the painting Madonna dei fusi by Leonardo da Vinci†. In: *X-Ray Spectrometry* 34 (2005), S. 306–309
- [Grosser 1977] GROSSER, Dietger: *Die Hölzer Mitteleuropas; Ein mikrophotographischer Lehratlas*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1977
- [Hagemeyer u. a. 1994] HAGEMEYER, Jürgen ; SCHÄFER, Hartmut ; BRECKLE, Siegmund-W.: Seasonal variations of nickel concentrations in annual xylem rings of beech trees (*Fagus sylvatica* L.). In: *The Science of the Total Environment* 145 (1994), S. 111–118
- [Hall u. a. 1990] HALL, G. S. ; YAMAGUCHI, D. K. ; RETTBERG, T. M.: Multielemental analyses of tree rings by inductively coupled plasma mass spectrometry. In: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters* 146 (1990), S. 255–265
- [Hammer u. a. 1987] HAMMER, C. U. ; CLAUSEN, H. B. ; FRIEDRICH, W. L. ; TAUBER, H.: The Minoan eruption of Santorini in Greece dated to 1645 BC? In: *Nature* 328 (1987), S. 517 – 519

- [Hayashi u. a. 2003] HAYASHI, Y. ; IKEUE, N. ; TANOI, K. ; NOGAWA, N. ; TANGE, T. ; YAGI, H. ; MATSUNE, K. ; NAKANISHI, T. M.: Element analysis and radioactivity measurement within a wood disk by neutron activation analysis. In: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 255 (2003), S. 115–118
- [Hutchinson u. a. 1998] HUTCHINSON, Thomas C. ; WATMOUGH, Shaun A. ; SAGER, Eric P. S. ; KARAGATZIDES, Jim D.: Effects of excess nitrogen deposition and soil acidification on sugar maple (*Acer saccharum*) in Ontario, Canada: an experimental study. In: *Canadian Journal of Forest Research* 28 (1998), S. 299–310
- [IUCN 2006] IUCN: *2006 IUCN Red List of Threatened Species; Pinus cembra*. IUCN; Conifer Specialist Group; www.iucnredlist.org; downloaded on 17 April 2007, 2006
- [Kawamura u. a. 2006] KAWAMURA, Hidehisa ; MATSUOKA, Nobuaki ; MOMOSHIMA, Noriyuki ; KOIKE, Masami ; TAKASHIMA, Yoshimasa: Isotopic evidence in tree rings for historical changes in atmospheric sulfur sources. In: *Environmental Science and Technology* 40 (2006), S. 5750–5754
- [Kinsey 1996] KINSEY, R. R.: *The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data, paper submitted to the 9th International Symposium of Capture-Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics*. Data extracted from NUDAT database (Jan. 14/1999), Budapest, Hungary, 1996
- [Krause 1993] KRAUSE, Petra ; KRAUSE, Petra (Hrsg.): *Entwicklung von Anwendungsmöglichkeiten der ICP-MS und der Laser-ICP-MS in der Umweltanalytik*. Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg, Abt. Angewandte Analytik, Prof. Dr. W. Dannecker, Martin-Luther-King-Platz 6, 20146 Hamburg, 1993
- [Krokida und Philippopoulos 2006] KROKIDA, M. K. ; PHILIPPOPOULOS, C.: Volatility of apples during air and freeze drying. In: *Journal of Food Engineering* 73 (2006), S. 135–141
- [Kuniholm u. a. 1996] KUNIHOLM, P. I. ; KROMER, B. ; MANNING, S. W. ; NEWTON, M. ; LATINI, C. E. ; BRUCE, M. J.: Anatolian tree-rings and the absolute chronology of the eastern Mediterranean 2220-718 BC. In: *Nature* 381 (1996), S. 780–783
- [LaMarche und Hirschboeck 1984] LAMARCHE, Valmore C. ; HIRSCHBOECK, Katherine K.: Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. In: *Nature* 307 (1984), S. 121 – 126
- [Lapatto 1990] LAPATTO, Risto ; LAPATTO, Risto (Hrsg.): *Biomedical applications of the PIXE and the PIGE methods*. Societas Scientiarum Fennica,

- The Finnish Society of Sciences and Letters, No 110, Dissertationes No 29, 1990
- [Lepp 1975] LEPP, N. W.: The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. In: *Environmental Pollution* 9 (1975), S. 49–61
- [Liodakis u. a. 2005] LIODAKIS, S. ; KATSIGIANNIS, G. ; KAKALI, G.: Ash properties of some dominant Greek forest species. In: *Thermochemica Acta* 437 (2005), S. 158–167
- [Lomský u. a. 2002] LOMSKÝ, B. ; MATERNA, J. ; PFANZ, H.: *SO₂-Pollution and Forests Decline in the Ore Mountains*. Forestry and Game Management Research Institute, Jíloviste Simerová, 2002
- [Magill u. a. 2006] MAGILL, J. ; PFENNIG, G. ; GALY, J.: *Karlsruher Nuklidkarte, 7. Auflage*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2006
- [Manning 1988] MANNING, S. W.: Dating of the Santorini eruption. In: *Nature* 332 (1988), S. 401–401
- [Manning 1999] MANNING, Sturt W.: *A test of time*. Oxbow Books, Oxford, 1999
- [Manning u. a. 2006] MANNING, Sturt W. ; RAMSEY, Christopher B. ; KUTSCHERA, Walter ; HIGHAM, Thomas ; KROMER, Bernd ; STEIER, Peter ; WILD, Eva M.: Chronology for the Aegean Late Bronze Age 1700-1400 B.C. In: *Science* 312 no. 5773 (2006), S. 565–569
- [Maringer 2005] MARINGER, Franz J.: *Skriptum zur Vorlesung Strahlenphysikalische und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes*. Technische Universität Wien, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, 2005
- [Martin u. a. 2000] MARTIN, Ronald R. ; TOMLIN, Alan ; MARSELLO, Brenda: Arsenic uptake in orchard trees: implications for dendroanalysis. In: *Chemosphere* 41 (2000), S. 635–637
- [Anton Paar GmbH] ANTON PAAR GMBH: *CPA - 1 Cool Plasma Asher, Betriebsanleitung*. Anton Paar, Graz, Österreich
- [NuDat 2.3 2007] NUDAT 2.3: National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. In: <http://www.nndc.bnl.gov/> (2007)
- [McCarroll und Loader 2004] MCCARROLL, Danny ; LOADER, Neil J.: Stable isotopes in tree rings. In: *Quaternary Science Reviews* 23 (2004), S. 771–801

- [Mägdefrau 1951] MÄGDEFRAU, K.: *Botanik. Eine Einführung in das Studium der Pflanzenkunde*. Heidelberg: Carl Winter Verlag, 1951
- [Misra u. a. 1993] MISRA, Mahendra K. ; RAGLAND, Kenneth W. ; BAKER, Andrew J.: Wood ash composition as a function of furnace temperature. In: *Biomass and Bioenergy* 4.2 (1993), S. 103–116
- [Müller 1967] MÜLLER, Rudolf O. ; MÜLLER, Rudolf O. (Hrsg.): *Spektrochemische Analysen mit Röntgenfluoreszenz*. R. Oldenbourg München Wien, 1967
- [Mohr u. a. 2007] MOHR, P.J. ; TAYLOR, B.N. ; NEWELL, D.B. ; J. BAKER, M. D. This database was developed by (Hrsg.) ; KOTOCHIGOVA, S. (Hrsg.): *The 2006 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899 (Web Version 5.0) available: <http://physics.nist.gov/constants>, 2007
- [Nagj u. a. 1987] NAGJ, Marina ; INJUK, Jasna ; VALKOVIC, Vlado: Trace element concentration variations in tree rings. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* B22 (1987), S. 465–472
- [Nimz u. a. 2005] NIMZ, Horst H. ; SCHMITT, Uwe ; SCHWAB, Eckart ; WITTMANN, Otto ; WOLF, Franz ; ULLMANN (Hrsg.): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005
- [Ünlü u. a. 2005] ÜNLÜ, K. ; KUNIHOLM, P. I. ; CHIMENT, J. J. ; HAUCK, D. K.: Neutron activation analysis of absolutely-dated tree rings. In: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 264 (2005), S. 21–27
- [Nriagu 1990] NRIAGU, J. O.: Global Metal Pollution: poisoning the biosphere? In: *Environment* 32 (1990), S. 7–33
- [Oberberger u. a. 1997] OBERBERGER, Ingwald ; BIEDERMANN, Friedrich ; WIDMANN, Walter ; RIEDL, Rudolf: Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. In: *Biomass and Bioenergy* 12, No.3 (1997), S. 211–224
- [Padilla und Anderson 2002] PADILLA, Kimberly L. ; ANDERSON, Kim A.: Trace element concentration in tree-rings biomonitoring centuries of environmental change. In: *Chemosphere* 49 (2002), S. 575–585
- [Parry 1991] PARRY, Susan J. ; WINEFORDNER, J. D. (Hrsg.) ; KOLTHOFF, I. M. (Hrsg.): *Chemical Analysis, Volume 119, Activation Spectrometry in Chemical Analysis*. John Wiley & Sons, 1991
- [Pearson u. a. 2005] PEARSON, Charlotte ; MANNING, Sturt W. ; COLEMAN, Max ; JARVIS, Kym: Can tree-ring chemistry reveal absolute dates for past

- volcanic eruptions? In: *Journal of Archaeological Science* 32 (2005), S. 1265–1274
- [Pearson u. a. 2006] PEARSON, Charlotte L. ; MANNING, Sturt W. ; COLEMAN, Max ; JARVIS, Kym: A dendrochemical study of *Pinus sylvestris* from Siljansfors Experimental Forest, central Sweden. In: *Applied Geochemistry* 21 (2006), S. 1681–1691
- [Piepke 2001] PIEPKE, Andreas: Effective Neutron Capture Cross Sections. In: *Department of Physics and Astronomy, University of Alabama* (2001)
- [Reed 1993] REED, William P.: Certificate of Analysis, Standard Reference Material 1515, Apple Leaves. In: *National Institute of Standards & Technology, Standard Reference Materials Group* (1993)
- [Riedel 2004] RIEDEL, Erwin: *Anorganische Chemie, 6. Auflage*. Walter de Gruyter & Co.KG, D-10785 Berlin, 2004
- [Rosenberg und Johnson 2006] ROSENBERG, Kenneth E. ; JOHNSON, Stephen G.: Assembly and testing of a radioisotope power system for the new horizons spacecraft. In: *Collection of Technical Papers - 4th International Energy Conversion Engineering Conference 2* (2006), S. 1450–1460
- [Salvii 1753] SALVII, Laurentii: *Species Plantarum 2*. 1753
- [Schultz 1987] SCHULTZ, R.: *Vergleichende Betrachtung des Schwermetallhaushalts verschiedener Waldökosysteme Norddeutschlands*. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe A 32, 1987
- [Schweingruber 1983] SCHWEINGRUBER, Fritz H.: *Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart, 1983
- [Skipperud u. a. 1998] SKIPPERUD, L. ; SALBU, B. ; HAGEBØ, E.: Speciation of trace elements in discharges from the pulp industry. In: *The Science of the Total Environment* 217 (1998), S. 251–256
- [Sterba 2007] STERBA, Johannes H.: *Anwendung der Neutronen-Aktivierungsanalyse zum Aufbau der Chemostratigraphie einer vulkanischen Eruptionsequenz auf Tilos und Nisyros, Griechenland*. Dissertation, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, 2007
- [Swaine u. a. 1988] SWAINE, D. J. ; GODBEER, W. C. ; MORGAN, N. C.: The deposition of trace elements from the atmosphere. In: *Trace elements in New Zealand: environmental, human and animal. Proceedings of the New Zealand Trace Elements Group Conference, Canterbury, New Zealand* (1988), S. 1–10

- [Symeonides 1979] SYMEONIDES, C.: Tree-Ring Analysis for Tracing the History of Pollution: Application to a Study in Northern Sweden. In: *Journal of Environmental Quality* 8 (1979), S. 482–486
- [Tendel und Wolf 1988] TENDEL, J. ; WOLF, K.: Distribution of nutrients and trace elements in annual rings of pine trees (*Pinus silvestris*) as and indicator of environmental changes. In: *Experientia* 44 (1988), S. 975–980
- [Thy u. a. 2006] THY, P. ; JENKINS, B. M. ; GRUNDTVIG, S. ; SHIRAKI, R. ; LESHER, C. E.: High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. In: *Fuel* 85 (2006), S. 783–795
- [Trahey 2001] TRAHEY, Nancy M.: Certificate of Analysis, Standard Reference Material 1566b Oyster Tissue. In: *National Institute of Standards & Technology, Standard Reference Materials Group* (2001)
- [Ullmann und Ringer 1986] ULLMANN, R. ; RINGER, H.: Bestimmung von Spurenelementen in Wolfram mit sequentieller ICP-AES. In: *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 323 (1986), S. 139–141
- [Wallner 1998] WALLNER, G.: Elements in tree rings of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) as indicators for SO_2 polluted sites at the East-Erzgebirge (Germany). In: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 238 (1998), S. 149–153
- [Warren und Hankey 1989] WARREN, Peter ; HANKEY, Vronwy: *Aegean bronze age chronology*. Bristol Classical Press, 1989
- [Watmough u. a. 1999a] WATMOUGH, Richard I. ; HUTCHINSON ; C., Thomas: $^{206}Pb/^{207}Pb$ ratios in tree rings as monitors of environmental change. In: *Environmental Science and Technology* 33 (1999), S. 670–673
- [Watmough 1999] WATMOUGH, S. A.: Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis. In: *Environmental Pollution* 106 (1999), S. 391–403
- [Watmough und Hutchinson 1996] WATMOUGH, S.A. ; HUTCHINSON, T.C.: Analysis of tree rings using inductively coupled plasma mass spectrometry to record fluctuations in a metal pollution episode. In: *Environmental Pollution* 93 (1996), S. 93
- [Watmough u. a. 1999b] WATMOUGH, S.A. ; HUTCHINSON, T.C. ; EVANS, R.D.: The distribution of ^{67}Zn and ^{207}Pb applied to white spruce foliage at ambient concentrations under different pH regimes. In: *Environmental and Experimental Botany* 41 (1999), S. 83–92

- [Watmough 1997] WATMOUGH, Shaun A.: An evaluation of the use of dendrochemical analyses in environmental monitoring. In: *Environmental Reviews* 5 (1997), S. 181–201
- [Watmough und Hutchinson 2003] WATMOUGH, Shaun A. ; HUTCHINSON, Thomas C.: A comparison of temporal patterns in trace metal concentration in tree rings of four common European tree species adjacent to a Cu-Cd refinery. In: *Water, Air, and Soil Pollution* 146 (2003), S. 225–241
- [Wegener 2003] WEGENER, D. ; SCHULTZ-COULON, H. C. (Hrsg.): *Skriptum zur Vorlesung Teilchendetektoren*. Universität Dortmund, 2003
- [Werklin u. a. 2005] WERKLIN, Johan ; SKRIFVARS, Bengt-Johan ; HUPA, Mikko: Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest. In: *Biomass and Bioenergy* 29 (2005), S. 451–466
- [Yao 2006] YAO, W.-M.: neutrons (Particle Data Group, URL: <http://pdg.lbl.gov>). In: *J. Phys. G* 33 (2006), S. 1
- [ZAMG 2007] ZAMG: Klima Monatsrückblick April 2007; Extrem trocken, warm und sonnig. In: <http://www.zamg.ac.at/> (2007)
- [Zayed u. a. 1992] ZAYED, J. ; LORANGER, S. ; KENNEDY, G.: Variations of trace element concentrations in red spruce tree rings. In: *Water, Air and Soil Pollution* 65, n3-4 (1992), S. 281–291

Literaturverzeichnis

Teil III.

Anhang

A. Bindungsenergie von Kernen

Tröpfchenmodell

Das Tröpfchenmodell beschreibt die Bindungsenergie von Atomkernen anhand zweier Grundannahmen. Die Massendichte sei analog zu einem Flüssigkeitstropfen im gesamten Atomkern konstant. Weiters existiere zusätzlich zur Coulombabstoßung der Protonen eine anziehende kurzreichweitige Kraft, welche den Atomkern zusammenhält.

Bethe-Weizsäcker-Formel

Die Bethe-Weizsäcker-Formel beschreibt aufbauend auf dem Tröpfchenmodell die Bindungsenergie eines Atomkerns pro Nukleon. Diese setzt sich zusammen aus Volumenenergie E_V , Oberflächenenergie E_O , Coulombenergie E_C , Symmetrienergie E_S und Paarungsenergie E_P .

Volumenenergie E_V Die Volumenenergie E_V wird bei konstant angenommener Dichteverteilung im Kern direkt proportional zur Nukleonenzahl A im Kern. Die Bindungsenergie wird üblicherweise unter Verwendung des Faktors $c_V = 15.56\text{MeV}$ angegeben.

$$E_V = c_V A \quad (\text{A.1})$$

Oberflächenenergie E_O Da Nukleonen an der Tröpfchenoberfläche weniger Nachbarn besitzen, verringert sich die Bindungsenergie dieser Nukleonen. Das Tröpfchenvolumen (kugelförmig) ist proportional zu A^3 , die Oberfläche proportional zu A^2 , damit schreibt sich der Anteil, um den sich die Bindungsenergie des Kerns verringert wie folgt mit $c_O = 17.23\text{MeV}$.

$$E_O = -c_O A^{2/3} \quad (\text{A.2})$$

Coulombabstoßung E_C Die Coulombabstoßung der Protonen im Kern ist nach dem Coulombschen Gesetz proportional zu Z^2 . Der Abstand der Protonen ergibt sich proportional zum Kugelradius, welcher wiederum proportional zu

A. Bindungsenergie von Kernen

$A^{1/3}$ ist. Die Verringerung der Bindungsenergie in Folge der Coulombstoßung wird unter Verwendung von $c_C = 0.7\text{MeV}$ angeschlossen.

$$E_C = -c_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad (\text{A.3})$$

Symmetrieanteil E_S Ein Ungleichgewicht zwischen Protonen und Neutronen im Atomkern wirkt sich destabilisierend auf diesen aus. Es wird daher ein Term proportional der Differenz $A - 2Z$ angesetzt. Das Vorzeichen dieser Differenz hat keinen Einfluss auf die Bindungsenergie. Daher schreibt sich diese Verringerung der Bindungsenergie mit $c_S = 23.28\text{MeV}$ unter Einbeziehung des auf A normierten Quadrates dieser Differenz. Eine Beschreibung für den Symmetrieterm liefert das Fermigas-Modell.

$$E_S = -c_S \frac{(A - 2Z)^2}{A} \quad (\text{A.4})$$

Paarungsanteil E_P Beobachtungen zeigen, dass Kerne mit geraden Nukleonenzahlen stabiler sind als Kerne mit ungeraden Nukleonenzahlen. Dies wird im Schalenmodell¹ von Kernen unter Berücksichtigung der Spineigenschaften der Nukleonen beschrieben. Kerne mit gerader Protonen- und Neutronenzahl (*gg-Kerne*) weisen eine höhere Stabilität auf, als Kerne mit einer (*ug-* bzw. *gu-Kerne*), bzw. zwei (*uu-Kerne*) ungeraden Nukleonenzahlen auf. Dieser Einfluss nimmt mit steigender Nukleonenzahl ab. Man berücksichtigt daher einen weiteren Energieterm (mit $c_P = 12\text{MeV}$) in folgender Form.

$$E_P = c_P \frac{\delta}{A^{1/2}} \quad (\text{A.5})$$

$$\delta = \begin{cases} -1 & \text{uu-Kerne} \\ 0 & \text{ug- und gu-Kerne} \\ 1 & \text{gg-Kerne} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

¹Das Schalenmodell ist ein Modell zur Beschreibung des Aufbaus von Atomkernen, welches den Kernaufbau auf quantenmechanische Gesetzmäßigkeiten zurückführt. Im Gegensatz zum Tröpfchenmodell wird den Nukleonen im Schalenmodell eine relative Bewegungsunabhängigkeit zugeschrieben.

Gesamtbindungsenergie Die Gesamtbindungsenergie eines Kerns ergibt sich durch Summation der genannten Anteile in der *Bethe-Weizsäcker-Formel*.

$$E_P = c_V A - c_O A^{2/3} - c_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - c_S \frac{(A - 2Z)^2}{A} + c_P \frac{\delta}{A^{1/2}} \quad (\text{A.7})$$

Diese halbempirische Formel wurde erstmals 1935 von Carl Friedrich von Weizsäcker² und Hans Albrecht Bethe³ aufgestellt. Während sie für leichtere Kerne unbrauchbar ist, stellt sie für schwere Kerne eine gute Näherung dar (siehe Abbildung A.1) [Bergmann u. a., 2003, S. 710].

²Carl Friedrich von Weizsäcker (1912 - 2007), deutscher Physiker

³Hans Albrecht Bethe (1906 - 2005), 1967 Nobelpreisträger für Physik

A. Bindungsenergie von Kernen

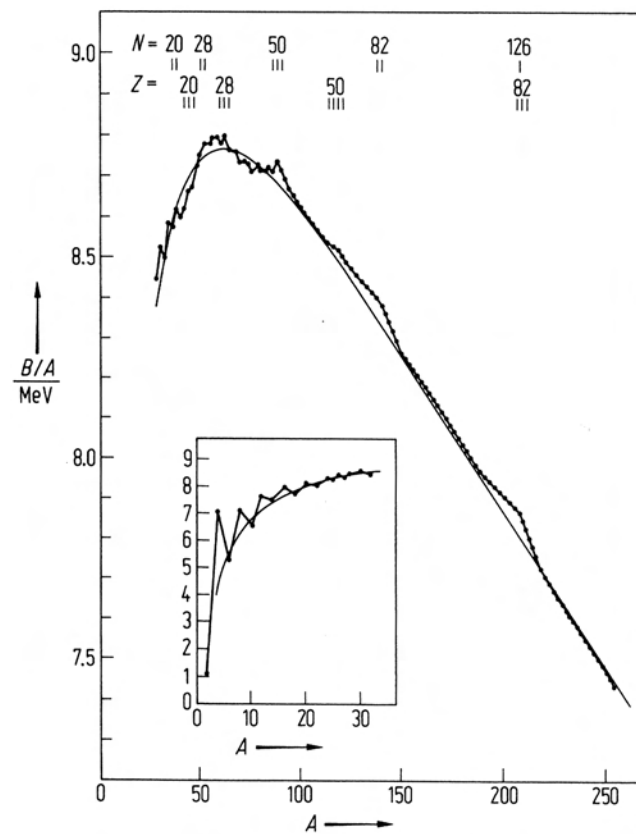


Abbildung A.1.: Bindungsenergie pro Nukleon der stabilen und langlebigen Isotope als Funktion der Massenzahl, A . Die durchgezogene Linie entspricht einer Parametrisierung nach dem Tröpfchenmodell (aus [Bergmann u. a., 2003]).

B. Neutronenflussmessung oberhalb des Reaktorkerns

Zur Bestimmung des Neutronenflusses an der gewählten Bestrahlungsposition für die Bestrahlung großvolumiger Proben (siehe Abschnitt 6.2.1) wurde eine Flussmessung durchgeführt. Ein Zirkon-Plättchen wurde dazu 1cm oberhalb des Kerns für die Dauer von 1h bestrahlt.

Bestrahlung Bestrahlungsangaben zur Neutronenflussmessung oberhalb des Kerns an Position *RBO* (siehe Abbildung 3.4).

| Datum: 18.7.2007 | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Probenbezeichnung | Nettogewicht in mg |
| Zirkon-Plättchen zur Flussmessung | 42.09 |

Tabelle B.1.: *Einwügetabelle Neutronenflussmessung*

Neutronenbestrahlung oberhalb des Kerns an Position *RBO* (siehe Abbildung 3.4) am Forschungsreaktors des ATI am 18. Juli 2007 von 14⁰⁵ bis 15⁰⁵ Uhr, $t_{Aktivierung} = 1h$, Reaktor durchgehend kritisch.

Aktivitätsmessung Die Aktivität des Zirkon-Plättchens wurde nach

$$t_{Abkling} = 42.5h \quad (B.1)$$

Abklingzeit in einer festgelegten Geometrie gemessen, siehe Gammaspektrum, Tabelle B.2.

$$t_{Mess} = 2000s \quad (B.2)$$

Dies ermöglicht durch Vergleichen von Aktivitäten bekannter Bestrahlungsbedingungen eine Feststellung des Neutronenflusses, welcher zur Aktivierung verwendet wurde. Der an der Bestrahlungsposition vorhandene thermische, $\Phi_{thermisch}$, und epithermische Neutronenfluss, $\Phi_{epithermisch}$, ergibt sich daraus. Zur Aktivitätsbestimmung werden die primären Gammalinien der Radionuklide ⁹⁵Zr (756.725keV, [NuDat 2.3, 2007]) und ⁹⁷Zr (743.36keV, [NuDat 2.3, 2007]) herangezogen. Die Wirkungsquerschnitte für Neutroneneinfangprozesse sind für diese

B. Neutronenflussmessung oberhalb des Reaktorkerns

Kerne bekannt. Die verwendeten thermischen Wirkungsquerschnitte und Resonanzintegrale aus [BNL, 2007] sind im Folgenden angegeben.

$$\sigma_{th}({}^{94}\text{Zr}) = 0.04981 \text{ b} \quad (\text{B.3})$$

$$\sigma_{th}({}^{96}\text{Zr}) = 2.2844 \cdot 10^{-2} \text{ b} \quad (\text{B.4})$$

$$I_{\gamma}({}^{94}\text{Zr}) = 0.311 \text{ b} \quad (\text{B.5})$$

$$I_{\gamma}({}^{96}\text{Zr}) = 5.32 \text{ b} \quad (\text{B.6})$$

Weiters fließen in die Rechnung die folgenden Parameter ein:

☼ Die natürliche Isotopenhäufigkeit (aus [NuDat 2.3, 2007]):

$$i_{94\text{Zr}} = 17.38 \% \quad (\text{B.7})$$

$$i_{96\text{Zr}} = 2.8 \% \quad (\text{B.8})$$

Daraus ergibt sich jeweils die Anzahl an aktivierbaren Ausgangsnukliden, $N_{x\text{Zr}}$.

☼ Die Halbwertszeiten (aus [NuDat 2.3, 2007]):

$$T_{1/295\text{Zr}} = 64.032 \text{ d} \quad (\text{B.9})$$

$$T_{1/297\text{Zr}} = 16.744 \text{ h} \quad (\text{B.10})$$

☼ Die Detektorausbeute (siehe Abbildung B.1):

$$\eta_{743\text{keV}} = 1.92 \% \quad (\text{B.11})$$

$$\eta_{756\text{keV}} = 1.89 \% \quad (\text{B.12})$$

☼ Die Aussendewahrscheinlichkeiten der betrachteten Gammalinien (aus [NuDat 2.3, 2007]):

$$I_{743\text{keV}} = 93.06 \% \quad (\text{B.13})$$

$$I_{756\text{keV}} = 54.38 \% \quad (\text{B.14})$$

☼ Die Nettofläche der betrachteten Peaks
(aus Gammaspektrometrie, siehe Tabelle B.2):

$$N_{netto743\text{keV}} = 12493 \quad (\text{B.15})$$

$$N_{netto756\text{keV}} = 85844 \quad (\text{B.16})$$

Aus den Nettoflächen der betrachteten Peaks, ergeben sich die Zählraten, Z_{xZr} (siehe ¹), zu Beginn der Messung (siehe Abschnitt 3.2.5).

$$Z_{xZr} = \frac{-N_{netto_{xZr}} \lambda_{xZr}}{e^{-\lambda_{xZr} t_{mess}} - 1} \quad (B.17)$$

Aus den Zählraten folgen die Aktivitäten, A_{xZr} , zu Beginn der Messung.

$$A_{xZr} = \frac{Z_{xZr}}{\eta_{x\ keV} I_{x\ keV}} \quad (B.18)$$

Dies entspricht den Aktivitäten, A_{xZr}^* , bei Beendigung der Neutronenbestrahlung.

$$A_{xZr}^* = A_{xZr} e^{\lambda_{xZr} t_{Abkling}} \quad (B.19)$$

Diese Aktivität rührt von $N_{0_{xZr}}$ Radionukliden her.

$$N_{0_{xZr}} = A_{xZr}^* \lambda_{xZr}^{-1} \quad (B.20)$$

Die Aktivierungsgleichungen lauten:

$$N_{0_{xZr}} = \frac{N_{xZr} (\Phi_{thermisch} \sigma_{th}(xZr) + \Phi_{epithermisch} I_{\gamma}(xZr)) (1 - e^{-\lambda_{xZr} t_{Aktivierung}})}{\lambda_{xZr}} \quad (B.21)$$

Aus beiden Aktivierungsgleichungen ergibt sich der epithermische Neutronenfluss, $\Phi_{epithermisch}$.

$$\Phi_{epithermisch} = \frac{\frac{N_{0_{97Zr}} \lambda_{97Zr}}{(1 - e^{-\lambda_{97Zr} t_{Aktivierung}}) N_{96Zr}} - \frac{\sigma_{th}(^{96}Zr)}{\sigma_{th}(^{94}Zr)} \frac{N_{0_{95Zr}} \lambda_{95Zr}}{(1 - e^{-\lambda_{95Zr} t_{Aktivierung}}) N_{94Zr}}}{I_{\gamma}(^{96}Zr) - I_{\gamma}(^{94}Zr) \frac{\sigma_{th}(^{96}Zr)}{\sigma_{th}(^{94}Zr)}}} \quad (B.22)$$

Aus dem epithermischen Neutronenfluss berechnet sich der thermische Neutronenfluss, $\Phi_{thermisch}$.

$$\Phi_{thermisch} = \frac{1}{\sigma_{th}(^{94}Zr)} \left(\frac{N_{0_{95Zr}} \lambda_{95Zr}}{(1 - e^{-\lambda_{95Zr} t_{Aktivierung}}) N_{94Zr}} - \Phi_{epithermisch} I_{\gamma}(^{94}Zr) \right) \quad (B.23)$$

Bei dieser Flussmessung wurde folgendes Ergebnis erzielt.

$$\Phi_{thermisch} = 5.48 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (B.24)$$

$$\Phi_{epithermisch} = 6.50 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (B.25)$$

¹Im Weiteren werden die Gleichungen allgemein unter Verwendung des Elementsymbols xZr angeschrieben. Dieses steht für ^{94}Zr / ^{95}Zr , bzw. für ^{96}Zr / ^{97}Zr .

B. Neutronenflussmessung oberhalb des Reaktorkerns

| ANALYSENBLATT | | | | | | | F 1 |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 20.07.07 09:31:52 | | | | | |
| Live Time: | | 3543 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 3600 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 20.07.2007 11:37:44 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 12.90 | 64 | 0 | 0.246 | 3.181E-002 | 115.68 |
| - | 2 | 25.21 | 63 | 0 | 0.258 | 3.136E-002 | 3987.9 |
| - | 3 | 42.52 | 1461 | 3532 | 1.278 | 7.305E-001 | 6.32 |
| - | 4 | 254.90 | 2424 | 10731 | 1.498 | 1.212E+000 | 3.23 |
| - | 5 | 355.97 | 3089 | 8673 | 1.541 | 1.544E+000 | 9.16 |
| - | 6 | 508.03 | 6148 | 6778 | 1.614 | 3.074E+000 | 1.49 |
| - | 7 | 513.50 | 716 | 7119 | 1.619 | 3.582E-001 | 8.12 |
| - | 8 | 602.72 | 1420 | 3758 | 1.658 | 7.100E-001 | 13.94 |
| - | 9 | 658.25 | 105108 | 2335 | 1.729 | 5.255E+001 | 0.43 |
| - | 10 | 703.85 | 865 | 1183 | 1.804 | 4.325E-001 | 12.81 |
| - | 11 | 724.24 | 10135 | 1404 | 1.745 | 5.067E+000 | 2.17 |
| ⁹⁷ Zr | 12 | 743.42 | 85844 | 788 | 1.776 | 4.292E+001 | 0.46 |
| ⁹⁵ Zr | 13 | 756.73 | 12493 | 302 | 1.769 | 6.246E+000 | 1.34 |
| - | 14 | 765.79 | 882 | 239 | 1.774 | 4.412E-001 | 3.79 |
| - | 15 | 804.52 | 645 | 273 | 1.943 | 3.227E-001 | 11.22 |
| - | 16 | 829.83 | 163 | 205 | 1.873 | 8.138E-002 | 33.73 |
| - | 17 | 854.71 | 233 | 235 | 1.678 | 1.164E-001 | 8.06 |
| - | 18 | 909.07 | 264 | 205 | 2.385 | 1.321E-001 | 21.89 |
| - | 19 | 971.41 | 219 | 99 | 1.742 | 1.093E-001 | 22.23 |
| - | 20 | 1021.17 | 809 | 107 | 1.824 | 4.045E-001 | 3.66 |
| - | 21 | 1024.39 | 869 | 122 | 1.826 | 4.345E-001 | 3.48 |
| - | 22 | 1147.90 | 1572 | 100 | 1.972 | 7.859E-001 | 4.87 |
| - | 23 | 1268.28 | 70 | 54 | 1.983 | 3.479E-002 | 16.87 |
| - | 24 | 1276.12 | 573 | 59 | 1.987 | 2.866E-001 | 9.17 |
| - | 25 | 1362.64 | 662 | 50 | 1.947 | 3.310E-001 | 3.93 |
| - | 26 | 1460.79 | 167 | 33 | 1.917 | 8.332E-002 | 20.98 |
| - | 27 | 1750.77 | 490 | 17 | 2.296 | 2.452E-001 | 4.48 |
| - | 28 | 1852.19 | 151 | 9 | 2.104 | 7.573E-002 | 11.17 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle B.2.: Analysenblatt Neutronenflussmessung oberhalb des Kerns, Messung F 1

Ausbeute 100 Mikroliter QCY48 auf Filterpapierscheibe 7mm

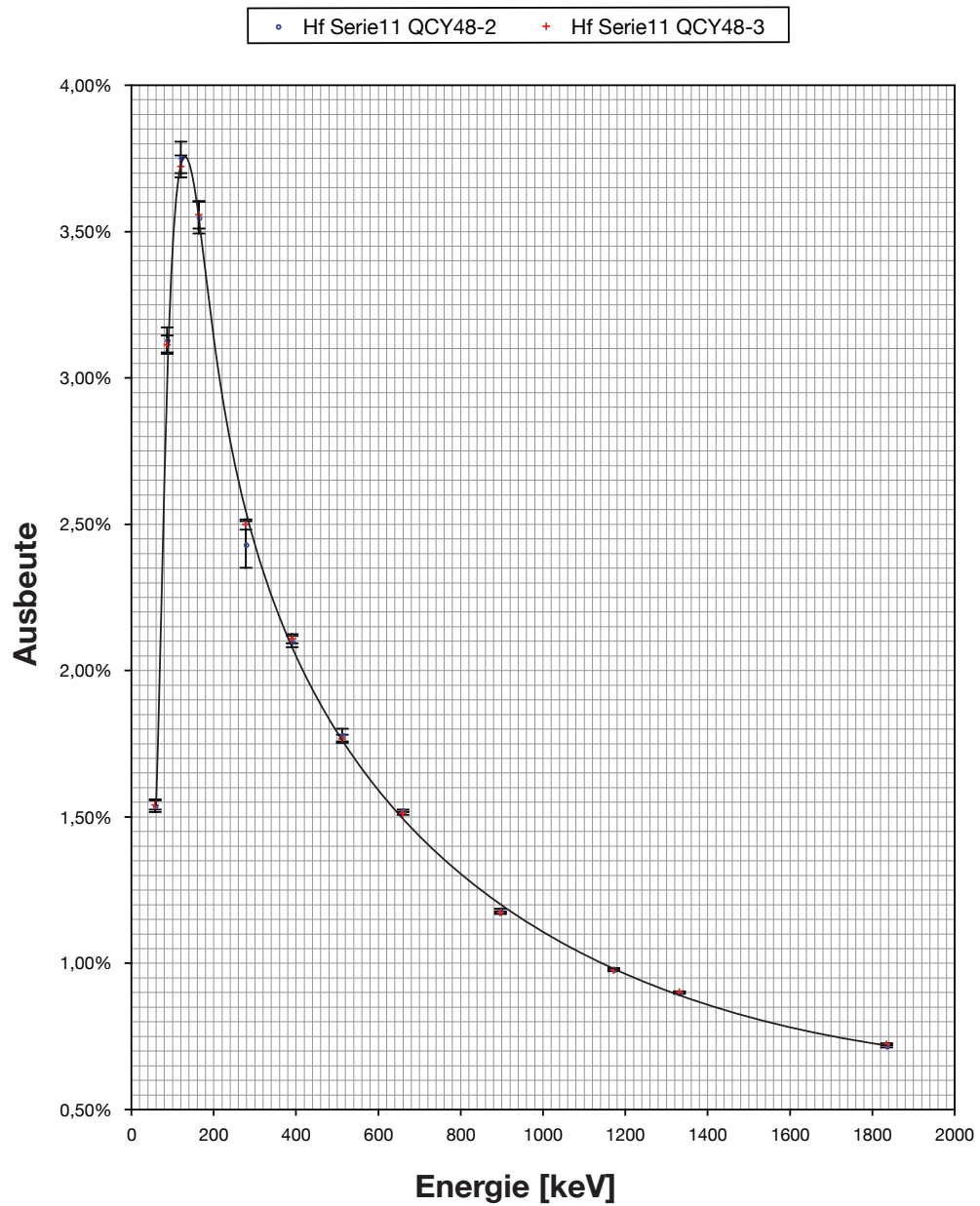


Abbildung B.1.: Detektorausbeute des zur Messung verwendeten HPGe-Halbleiterdetektors (Bichler Max, Atominstytut der Österreichischen Universität, Wien)

B. Neutronenflussmessung oberhalb des Reaktorkerns

C. Betrachtete Radionuklide und Standard Konzentrationsangaben

C.1. Radionuklide zu Konzentrationsbestimmungen

| Radionuklid | zur Auswertung verw. Gammalinie / keV | Halbwertszeit |
|---|--|---------------|
| Messung direkt nach Entnahme, Messdauer \approx 30min | | |
| ⁴⁹ Ca | 3084.4 | 8.718m |
| ⁵⁶ Mn | 1810.72 | 2.5789h |
| ⁴² K | 1524.6 | 12.321h |
| ²⁴ Na | 2754.028 | 14.951h |
| Messung nach 1 Woche, Messdauer \approx 12h | | |
| ⁷⁶ As | 599.1 | 26.24h |
| ⁸² Br | 776.517 | 35.282h |
| ¹⁴⁰ La | 1596.21 | 1.6781d |
| ¹¹⁵ Cd | 336.241 | 53.46h |
| ¹⁹⁸ Au | 411.80205 | 2.6956d |
| ¹²² Sb | 564.24 | 2.7238d |
| ⁴⁷ Ca | 1297.09 | 4.536d |
| Messung nach 2 Wochen, Messdauer \approx 24h | | |
| ¹³¹ Ba | 496.321 | 11.50d |
| ⁸⁶ Rb | 1077.0 | 18.642d |
| ⁵¹ Cr | 320.0824 | 27.7025d |
| ¹⁴¹ Ce | 145.4433 | 32.508d |
| ¹⁸¹ Hf | 482.18 | 42.39d |
| ⁵⁹ Fe | 1099.245 | 44.495d |
| ¹²⁴ Sb | 1690.975 | 60.11d |
| ⁹⁵ Zr | 756.725 | 64.032d |
| ⁸⁵ Sr | 514.0067 | 64.84d |
| ⁵⁸ Co | 810.7593 | 70.86d |
| ⁴⁶ Sc | 1120.545 | 83.79d |
| ⁷⁵ Se | 264.6576 | 119.79d |
| ⁶⁵ Zn | 1115.54 | 244.06d |
| ^{110m} Ag | 657.7600 | 249.76d |
| ⁶⁰ Co | 1173.228 | 1925.28d |
| ¹³⁴ Cs | 795.864 | 2.0652a |
| ¹⁵² Eu | 1408.006 | 13.506a |

Tabelle C.1.: Zu Konzentrationsbestimmungen betrachtete Radionuklide (Halbwertszeiten und Gammaenergien nach [NuDat 2.3, 2007])

C.2. Standard Konzentrationsangaben

Reference Soil SO-1

| | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Element Konzentration | Si 25.72 ¹ | Al 9.38 ¹ | Fe 6.00 ¹ | K 2.68 ¹ | Mg 2.31 ¹ | Ca 1.80 ¹ | Ti 0.53 ¹ | Mn 0.089 ¹ |
| | P 0.062 ¹ | Cr 160 ² | Zn 146 ² | V 139 ² | Ni 94 ² | Cu 61 ² | Pb 21 ² | Hg 0.022 ² |

Tabelle C.2.: Canadian certified reference materials project: Reference Soil SO-1 (Canadian Centre for Mineral and Energy Technology, 555 Booth St., Ottawa, Ontario K 1A 0G1), Konzentrationsangaben ¹in %, ²in µg/g;

NIST - SRM 1515 - Apple Leaves

| | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Element Konzentration | Ca 1.526 ¹ | Mg 0.271 ¹ | N 2.25 ¹ | P 0.159 ¹ | K 1.61 ¹ | Al 286 ² | As 0.038 ² | Ba 49 ² | B 27 ² |
| | Cd 0.013 ² | Cl 579 ² | Cu 5.64 ² | Fe 83 ² | Mn 54 ² | Hg 0.044 ² | Mo 0.094 ² | Ni 0.91 ² | Rb 10.2 ² |
| | Se 0.050 ² | Na 24.4 ² | Sr 25 ² | V 0.26 ² | Zn 12.5 ² | Sb 0.013 ² | Br 1.8 ² | Ce 3 ² | Cr 0.3 ² |
| | Co 0.09 ² | Eu 0.2 ² | Gd 3 ² | Au 0.001 ² | I 0.3 ² | La 20 ² | Nd 17 ² | Sm 3 ² | Sc 0.03 ² |
| | Tb 0.4 ² | Th 0.03 ² | Sn <0.2 ² | W 0.007 ² | U 0.006 ² | Yb 0.3 ² | Pb 0.470 ² | | |

Tabelle C.3.: NIST Standard Reference Material 1515 - Apple Leaves, Konzentrationsangaben ¹in %, ²in µg/g; [Reed, 1993]

NIST - SRM 1566b - Oyster Tissue

| | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Element Konzentration | Ca 0.0838 ¹ | Cl 0.514 ¹ | Mg 0.1085 ¹ | K 0.652 ¹ | Na 0.3297 ¹ | S 0.6887 ¹ | Al 197.2 ² | As 7.65 ² | Cd 2.48 ² |
| | Co 0.371 ² | Cu 71.6 ² | Fe 205.8 ² | Pb 0.308 ² | Mn 18.5 ² | Hg 0.0371 ² | Ni 1.04 ² | Rb 3.262 ² | Se 2.06 ² |
| | Ag 0.666 ² | Th 0.0367 ² | V 0.577 ² | Zn 1424 ² | N 7.6 ¹ | Sb 0.011 ² | Ba 8.6 ² | B 4.5 ² | H 7.2 ² |
| | Sr 6.8 ² | Sn 0.031 ² | U 0.2550 ² | | | | | | |

Tabelle C.4.: NIST Standard Reference Material 1566b - Oyster Tissue, Konzentrationsangaben ¹in %, ²in µg/g; [Trahey, 2001]

NIST - SRM 1573a - Tomato Leaves

| | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Element | Ca | N | P | K | Al | Sb | As | B | Cd |
| Konzentration | 5.05 ¹ | 3.03 ¹ | 0.216 ¹ | 2.70 ¹ | 598 ² | 0.063 ² | 0.112 ² | 33.3 ² | 1.52 ² |
| | Cr | Co | Cu | Fe | Mn | Hg | Ni | Rb | Se |
| | 1.99 ² | 0.57 ² | 4.70 ² | 368 ² | 246 ² | 0.034 ² | 1.59 ² | 14.89 ² | 0.054 ² |
| | Na | V | Zn | H | Mg | S | Ba | Br | Ce |
| | 136 ² | 0.835 ² | 30.9 ² | 5.2 ² | 1.2 ² | 0.96 ² | 63 ² | 1300 ² | 2 ² |
| | Cs | Cl | Gd | Hf | I | La | Mo | Sm | Sc |
| | 0.053 ² | 6600 ² | 0.17 ² | 0.14 ² | 0.85 ² | 2.3 ² | 0.46 ² | 0.19 ² | 0.1 ² |
| | Ag | Sr | Th | U | | | | | |
| | 0.017 ² | 85 ² | 0.12 ² | 0.035 ² | | | | | |

Tabelle C.5.: *NIST Standard Reference Material 1573a - Tomato Leaves, Konzentrationsangaben* ¹in %, ²in $\mu\text{g/g}$; [Gills, 1995]

C. Betrachtete Radionuklide und Standard Konzentrationsangaben

D. Gammaspektren

Die zur Erstellung dieser Arbeit angefertigten Gammaspektren sind hier angeführt.

Angegeben sind erkannte Peaks mit deren *FWHM*, deren Nettozählrate, dem Background, sowie deren statistischer Fehler. Das dem jeweiligen Peak zugeordnete Radionuklid ist angeführt. Ist kein Radionuklid angegeben, so war keine eindeutige Zuordnung möglich bzw. die Peaks waren nicht von Interesse für diese Arbeit.

Datum und Uhrzeit, sowie die Dauer der Bestrahlung ist in Anhang 6.1.1 angegeben.

D.1. Pinus Cembra Kern- und Splintholz

Messdaten zu Abschnitt 7.1.

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 A |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 24.05.07 09:28:18 | | | | | |
| Live Time: | | 3543 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 3600 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 25.05.2007 09:17:10 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.70 | 13493 | 30862 | 1.037 | 3.748E+000 | 0.99 |
| - | 2 | 75.78 | 6557 | 142565 | 0.986 | 1.821E+000 | 37.49 |
| - | 3 | 85.46 | 5220 | 162257 | 3.425 | 1.450E+000 | 23.85 |
| ¹⁵² Eu | 4 | 122.46 | 4285 | 103712 | 1.357 | 1.190E+000 | 5.26 |
| ⁴² K | 5 | 313.15 | 6287 | 30302 | 1.486 | 1.746E+000 | 2.18 |
| ²⁴ Na | 6 | 344.75 | 1109 | 27187 | 1.748 | 3.080E-001 | 39.87 |
| ^{69m} Zn | 7 | 438.93 | 813 | 16702 | 1.287 | 2.259E-001 | 11.38 |
| - | 8 | 502.80 | 531 | 12086 | 1.691 | 1.474E-001 | 16.64 |
| - | 9 | 511.17 | 31707 | 30147 | 2.754 | 8.808E+000 | 0.60 |
| ⁸² Br | 10 | 554.32 | 1785 | 14998 | 1.576 | 4.959E-001 | 5.63 |
| ⁸² Br | 11 | 619.09 | 1089 | 16783 | 1.587 | 3.025E-001 | 36.16 |
| ⁸² Br | 12 | 776.42 | 1799 | 9848 | 1.811 | 4.997E-001 | 8.28 |
| - | 13 | 788.57 | 666 | 7380 | 1.819 | 1.851E-001 | 11.09 |
| ^{69m} Zn | 14 | 827.99 | 360 | 4873 | 1.540 | 1.001E-001 | 19.23 |
| ^{152m} Eu | 15 | 841.42 | 3131 | 7417 | 1.810 | 8.697E-001 | 2.79 |
| ⁵⁶ Mn | 16 | 846.61 | 272355 | 7189 | 1.813 | 7.565E+001 | 0.26 |
| ⁴² K | 17 | 899.41 | 381 | 7254 | 1.300 | 1.059E-001 | 16.12 |
| ^{152m} Eu | 18 | 963.13 | 2311 | 9252 | 1.938 | 6.420E-001 | 11.91 |
| - | 19 | 1013.53 | 1618 | 9432 | 2.716 | 4.493E-001 | 5.10 |
| ⁸² Br | 20 | 1043.67 | 506 | 8887 | 1.586 | 1.406E-001 | 14.13 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 A |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ³¹ Si | 21 | 1266.14 | 11126 | 10540 | 2.050 | 3.091E+000 | 3.98 |
| ⁴¹ Ar | 22 | 1293.42 | 5803 | 9444 | 2.178 | 1.612E+000 | 5.91 |
| ⁵⁶ Mn | 23 | 1299.60 | 1421 | 9283 | 2.180 | 3.946E-001 | 7.47 |
| ²⁴ Na | 24 | 1368.52 | 86425 | 6985 | 2.072 | 2.401E+001 | 0.62 |
| ⁴⁰ K | 25 | 1460.73 | 397 | 3066 | 2.284 | 1.103E-001 | 12.92 |
| ⁴² K | 26 | 1524.74 | 137175 | 4823 | 2.151 | 3.810E+001 | 0.43 |
| ⁵⁶ Mn | 27 | 1602.24 | 892 | 2855 | 2.851 | 2.477E-001 | 24.01 |
| ²⁴ Na | 28 | 1732.15 | 3890 | 2378 | 2.254 | 1.081E+000 | 5.68 |
| ⁵⁶ Mn | 29 | 1810.96 | 42022 | 2626 | 2.286 | 1.167E+001 | 0.85 |
| ⁴² K | 30 | 1922.57 | 277 | 1481 | 2.162 | 7.697E-002 | 14.03 |
| ⁵⁶ Mn | 31 | 2113.51 | 19771 | 2062 | 2.415 | 5.492E+000 | 1.15 |
| ²⁴ Na | 32 | 2243.50 | 7420 | 2262 | 3.378 | 2.061E+000 | 3.21 |
| ⁵⁶ Mn | 33 | 2523.75 | 1141 | 3017 | 2.305 | 3.170E-001 | 15.57 |
| ⁵⁶ Mn | 34 | 2658.24 | 1035 | 459 | 2.488 | 2.875E-001 | 3.67 |
| ²⁴ Na | 35 | 2754.83 | 48287 | 311 | 2.688 | 1.341E+001 | 0.67 |
| ⁵⁶ Mn | 36 | 2960.80 | 520 | 55 | 2.774 | 1.445E-001 | 10.17 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.1.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Zirbe C Splintholz mit Quarzglas, Messung 1A

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 B |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 24.05.07 08:21:36 | | | |
| Live Time: | | | | 3535 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 3600 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 25.05.2007 09:17:53 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.72 | 15296 | 35976 | 1.041 | 4.249E+000 | 0.94 |
| - | 2 | 75.57 | 8274 | 151980 | 1.450 | 2.298E+000 | 29.65 |
| - | 3 | 85.35 | 2661 | 126847 | 1.565 | 7.390E-001 | 9.56 |
| ¹⁵² Eu | 4 | 122.37 | 4927 | 144961 | 1.668 | 1.369E+000 | 5.06 |
| ⁴² K | 5 | 313.20 | 1252 | 33287 | 1.557 | 3.477E-001 | 10.30 |
| ²⁴ Na | 6 | 344.93 | 659 | 28958 | 0.500 | 1.830E-001 | 12.63 |
| ^{69m} Zn | 7 | 438.75 | 1376 | 16519 | 1.564 | 3.822E-001 | 8.02 |
| - | 8 | 511.10 | 22315 | 31251 | 2.977 | 6.199E+000 | 3.08 |
| ⁸² Br | 9 | 554.44 | 751 | 15498 | 1.415 | 2.086E-001 | 14.68 |
| ⁸² Br | 10 | 776.49 | 922 | 8646 | 1.885 | 2.562E-001 | 8.30 |
| - | 11 | 788.65 | 1327 | 10507 | 1.782 | 3.686E-001 | 25.06 |
| ^{152m} Eu | 12 | 841.48 | 2928 | 8159 | 1.811 | 8.133E-001 | 2.97 |
| ⁵⁶ Mn | 13 | 846.62 | 517694 | 6298 | 1.813 | 1.438E+002 | 0.18 |
| ^{152m} Eu | 14 | 963.13 | 2319 | 6642 | 1.891 | 6.442E-001 | 3.28 |
| - | 15 | 1090.96 | 1281 | 8744 | 1.917 | 3.559E-001 | 19.14 |
| ²¹⁴ Bi | 16 | 1237.99 | 340 | 4123 | 1.388 | 9.444E-002 | 51.13 |
| ³¹ Si | 17 | 1266.14 | 13078 | 6936 | 2.004 | 3.633E+000 | 2.83 |
| ⁴¹ Ar | 18 | 1293.44 | 7863 | 4942 | 2.135 | 2.184E+000 | 3.53 |
| ⁵⁶ Mn | 19 | 1299.63 | 2207 | 4810 | 2.138 | 6.129E-001 | 4.40 |
| ²⁴ Na | 20 | 1368.54 | 75642 | 5965 | 2.078 | 2.101E+001 | 0.66 |
| ⁴² K | 21 | 1524.76 | 25170 | 6374 | 2.186 | 6.992E+000 | 1.56 |
| ⁵⁶ Mn | 22 | 1602.17 | 2326 | 6166 | 3.025 | 6.461E-001 | 11.65 |
| ²⁴ Na | 23 | 1732.14 | 3358 | 2776 | 2.244 | 9.329E-001 | 8.87 |
| ⁵⁶ Mn | 24 | 1811.00 | 80235 | 4187 | 2.279 | 2.229E+001 | 0.62 |
| ⁵⁶ Mn | 25 | 2113.56 | 37204 | 2043 | 2.426 | 1.033E+001 | 0.92 |
| ²⁴ Na | 26 | 2243.55 | 6555 | 2252 | 3.373 | 1.821E+000 | 3.13 |
| ⁵⁶ Mn | 27 | 2523.69 | 2132 | 2414 | 2.344 | 5.922E-001 | 2.85 |

D.1. Pinus Cembra Kern- und Splintholz

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 B |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁵⁶ Mn | 28 | 2658.30 | 2127 | 469 | 2.627 | 5.909E-001 | 4.87 |
| ²⁴ Na | 29 | 2754.87 | 42916 | 382 | 2.685 | 1.192E+001 | 0.70 |
| ⁵⁶ Mn | 30 | 2960.67 | 860 | 81 | 2.765 | 2.390E-001 | 3.56 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.2.: Analysenblatt Gammaskopmetrie Zirbe C Kernholz mit Quarzglas, Messung 1B

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 C |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 24.05.07 11:59:14 | | | |
| Live Time: | | | | 1802 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 3600 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 25.05.2007 09:05:52 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.44 | 291661 | 565563 | 1.087 | 8.102E+001 | 0.22 |
| - | 2 | 69.43 | 11262 | 1889998 | 1.746 | 3.128E+000 | 9.35 |
| - | 3 | 72.55 | 43885 | 2054731 | 1.752 | 1.219E+001 | 5.70 |
| - | 4 | 74.74 | 85546 | 2092112 | 1.756 | 2.376E+001 | 3.51 |
| - | 5 | 84.48 | 26461 | 1909509 | 1.432 | 7.350E+000 | 3.90 |
| - | 6 | 102.89 | 132000 | 2617799 | 1.824 | 3.667E+001 | 3.28 |
| ¹⁵² Eu | 7 | 121.52 | 116029 | 3030904 | 1.865 | 3.223E+001 | 4.11 |
| - | 8 | 218.50 | 53289 | 2688670 | 2.217 | 1.480E+001 | 1.99 |
| ⁴² K | 9 | 312.54 | 21505 | 1301434 | 2.558 | 5.973E+000 | 4.27 |
| ¹⁴⁰ La | 10 | 328.40 | 68832 | 1229386 | 2.086 | 1.912E+001 | 1.27 |
| ¹⁵² Eu | 11 | 343.93 | 21548 | 804223 | 1.892 | 5.985E+000 | 3.55 |
| ²⁴ Na | 12 | 346.25 | 43311 | 1037126 | 1.894 | 1.203E+001 | 1.92 |
| - | 13 | 432.04 | 6236 | 581275 | 1.647 | 1.732E+000 | 10.16 |
| - | 14 | 438.38 | 4992 | 616664 | 1.652 | 1.387E+000 | 12.09 |
| ¹⁴⁰ La | 15 | 486.48 | 115200 | 905069 | 2.037 | 3.200E+001 | 2.53 |
| - | 16 | 510.48 | 1379043 | 996581 | 3.413 | 3.831E+002 | 0.33 |
| - | 17 | 558.51 | 5522 | 404835 | 1.834 | 1.534E+000 | 11.22 |
| ⁷² Ga | 18 | 629.32 | 14202 | 782046 | 2.812 | 3.945E+000 | 4.82 |
| - | 19 | 750.97 | 8795 | 680145 | 1.973 | 2.443E+000 | 25.86 |
| ¹⁴⁰ La | 20 | 815.08 | 45447 | 719419 | 2.228 | 1.262E+001 | 1.53 |
| ⁷² Ga | 21 | 833.35 | 40474 | 691075 | 2.314 | 1.124E+001 | 1.96 |
| ^{152m} Eu | 22 | 840.82 | 96316 | 729012 | 2.318 | 2.675E+001 | 1.44 |
| ⁵⁶ Mn | 23 | 846.05 | 245698 | 731780 | 2.320 | 6.825E+001 | 1.23 |
| ²⁴ Na | 24 | 856.89 | 71408 | 702078 | 2.326 | 1.984E+001 | 1.48 |
| - | 25 | 867.02 | 10331 | 741674 | 2.332 | 2.870E+000 | 5.97 |
| ⁴⁶ Sc | 26 | 888.56 | 17959 | 678201 | 2.317 | 4.989E+000 | 15.83 |
| - | 27 | 893.45 | 4188 | 788766 | 2.320 | 1.163E+000 | 20.32 |
| ^{152m} Eu | 28 | 962.58 | 71392 | 1008862 | 2.340 | 1.983E+001 | 4.14 |
| ⁴⁶ Sc | 29 | 1119.84 | 11830 | 1152028 | 1.890 | 3.286E+000 | 7.14 |
| - | 30 | 1149.52 | 81114 | 1432841 | 6.887 | 2.253E+001 | 1.32 |
| - | 31 | 1314.10 | 2185 | 336686 | 1.737 | 6.069E-001 | 46.84 |
| ²⁴ Na | 32 | 1368.16 | 18199102 | 983325 | 2.532 | 5.055E+003 | 0.03 |
| ⁴² K | 33 | 1524.42 | 413806 | 306545 | 2.563 | 1.149E+002 | 0.19 |
| ¹⁴⁰ La | 34 | 1595.96 | 114673 | 310743 | 2.586 | 3.185E+001 | 0.47 |
| ²⁴ Na | 35 | 1731.89 | 839282 | 364915 | 2.717 | 2.331E+002 | 0.12 |
| ⁵⁶ Mn | 36 | 1810.78 | 37380 | 320704 | 2.736 | 1.038E+001 | 5.96 |
| - | 37 | 1879.55 | 11902 | 306492 | 3.941 | 3.306E+000 | 4.46 |
| ⁵⁶ Mn | 38 | 2113.40 | 17370 | 339045 | 2.826 | 4.825E+000 | 3.06 |
| ⁷² Ga | 39 | 2202.15 | 5331 | 320403 | 2.888 | 1.481E+000 | 33.86 |
| ²⁴ Na | 40 | 2243.47 | 1618685 | 574740 | 3.762 | 4.496E+002 | 0.09 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 C |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 41 | 2737.53 | 38745 | 122557 | 3.252 | 1.076E+001 | 0.90 |
| ²⁴ Na | 42 | 2754.95 | 10596240 | 352881 | 3.164 | 2.943E+003 | 0.03 |
| - | 43 | 2845.61 | 953 | 38240 | 2.842 | 2.646E-001 | 17.53 |
| - | 44 | 2857.32 | 1247 | 37672 | 2.846 | 3.463E-001 | 14.09 |
| - | 45 | 2893.47 | 1626 | 40542 | 3.530 | 4.516E-001 | 12.36 |
| - | 46 | 3101.44 | 8342 | 40299 | 3.561 | 2.317E+000 | 2.27 |
| - | 47 | 3161.93 | 5459 | 5389 | 1.967 | 1.516E+000 | 1.84 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.3.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Standard SO-1 (siehe Tabelle C.2) mit Quarzglas, Messung 1C

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 D |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 29.05.07 08:58:12 | | | |
| Live Time: | | | | 86380 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 86400 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 30.05.2007 10:44:23 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.55 | 2666 | 4386 | 0.997 | 3.085E-002 | 2.45 |
| - | 2 | 64.12 | 1472 | 19242 | 1.304 | 1.703E-002 | 23.77 |
| - | 3 | 70.46 | 1329 | 44332 | 1.316 | 1.538E-002 | 13.85 |
| - | 4 | 75.67 | 2337 | 45673 | 1.325 | 2.705E-002 | 12.52 |
| - | 5 | 85.15 | 693 | 19001 | 1.450 | 8.017E-003 | 14.76 |
| - | 6 | 93.29 | 2567 | 26221 | 1.462 | 2.971E-002 | 4.55 |
| ¹⁵³ Sm | 7 | 103.86 | 10552 | 24312 | 1.329 | 1.221E-001 | 1.35 |
| ¹⁵² Eu | 8 | 122.56 | 1219 | 26255 | 1.935 | 1.411E-002 | 9.31 |
| ⁴⁷ Sc | 9 | 160.10 | 2511 | 24714 | 1.353 | 2.907E-002 | 4.20 |
| ²²⁶ Ra | 10 | 186.42 | 1883 | 13895 | 1.511 | 2.180E-002 | 5.18 |
| - | 11 | 198.50 | 481 | 11018 | 1.286 | 5.572E-003 | 18.17 |
| ²¹² Pb | 12 | 239.29 | 877 | 10941 | 1.455 | 1.015E-002 | 9.28 |
| ¹⁷⁵ Yb | 13 | 283.28 | 702 | 8561 | 1.362 | 8.129E-003 | 9.98 |
| ⁵¹ Cr | 14 | 320.71 | 4448 | 7878 | 1.443 | 5.148E-002 | 1.98 |
| ¹⁵² Eu | 15 | 344.88 | 664 | 4877 | 1.394 | 7.681E-003 | 9.19 |
| ²¹⁴ Pb | 16 | 352.42 | 429 | 5702 | 1.400 | 4.961E-003 | 13.11 |
| ¹³³ Ba | 17 | 356.62 | 266 | 5233 | 1.403 | 3.076E-003 | 20.62 |
| ¹⁷⁵ Yb | 18 | 396.84 | 1528 | 5750 | 1.446 | 1.769E-002 | 4.24 |
| ¹⁹⁸ Au | 19 | 412.34 | 691 | 7399 | 1.648 | 8.002E-003 | 30.68 |
| ¹⁴⁰ La | 20 | 487.71 | 462 | 3355 | 1.763 | 5.352E-003 | 11.34 |
| ¹³¹ Ba | 21 | 496.84 | 340 | 4362 | 1.769 | 3.932E-003 | 14.57 |
| - | 22 | 511.42 | 5508 | 6184 | 2.939 | 6.375E-002 | 8.16 |
| ⁸² Br | 23 | 554.76 | 7525 | 3693 | 1.596 | 8.710E-002 | 1.28 |
| ¹²² Sb | 24 | 564.20 | 870 | 3375 | 1.602 | 1.007E-002 | 5.77 |
| ¹³⁴ Cs | 25 | 569.80 | 395 | 3586 | 1.605 | 4.569E-003 | 11.58 |
| ²⁰⁸ Tl | 26 | 583.58 | 352 | 4040 | 1.310 | 4.071E-003 | 44.69 |
| ¹³⁴ Cs | 27 | 605.09 | 2650 | 3576 | 1.766 | 3.067E-002 | 5.02 |
| ²¹⁴ Bi | 28 | 609.65 | 678 | 3547 | 1.769 | 7.851E-003 | 8.08 |
| ⁸² Br | 29 | 619.46 | 4418 | 3496 | 1.775 | 5.114E-002 | 4.62 |
| ^{110m} Ag | 30 | 658.01 | 530 | 2674 | 1.295 | 6.136E-003 | 8.83 |
| ⁸² Br | 31 | 698.66 | 2219 | 2837 | 1.589 | 2.568E-002 | 10.83 |
| ⁸² Br | 32 | 776.78 | 7026 | 3806 | 1.753 | 8.132E-002 | 1.32 |
| ¹³⁴ Cs | 33 | 796.14 | 1984 | 3131 | 1.727 | 2.296E-002 | 8.98 |
| ⁸² Br | 34 | 828.03 | 2044 | 2837 | 1.730 | 2.366E-002 | 8.17 |
| ^{110m} Ag | 35 | 884.75 | 497 | 2467 | 1.848 | 5.753E-003 | 8.54 |

D.1. *Pinus Cembra* Kern- und Splintholz

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 D |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁴⁶ Sc | 36 | 889.37 | 1078 | 2599 | 1.851 | 1.247E-002 | 4.69 |
| ²²⁸ Ac | 37 | 911.32 | 553 | 2163 | 1.659 | 6.406E-003 | 28.92 |
| ¹⁵² Eu | 38 | 964.43 | 383 | 2469 | 2.209 | 4.437E-003 | 10.50 |
| ²²⁸ Ac | 39 | 969.07 | 480 | 2618 | 2.211 | 5.553E-003 | 8.65 |
| ^{234m} Pa | 40 | 1001.51 | 128 | 1852 | 0.802 | 1.478E-003 | 22.54 |
| ⁸² Br | 41 | 1044.16 | 1985 | 2622 | 1.961 | 2.298E-002 | 2.90 |
| ⁸⁶ Rb | 42 | 1076.92 | 5594 | 2899 | 1.904 | 6.475E-002 | 1.49 |
| ⁵⁹ Fe | 43 | 1099.46 | 4031 | 2721 | 1.933 | 4.665E-002 | 5.97 |
| ⁶⁵ Zn | 44 | 1115.75 | 3160 | 2286 | 1.898 | 3.657E-002 | 5.26 |
| ⁴⁶ Sc | 45 | 1120.61 | 1351 | 2284 | 1.900 | 1.564E-002 | 5.89 |
| ⁶⁰ Co | 46 | 1173.46 | 2596 | 2405 | 2.012 | 3.004E-002 | 2.39 |
| ⁵⁹ Fe | 47 | 1291.89 | 2842 | 1330 | 2.100 | 3.290E-002 | 6.07 |
| ⁴⁷ Ca | 48 | 1297.21 | 682 | 1170 | 2.102 | 7.891E-003 | 7.85 |
| ⁸² Br | 49 | 1317.70 | 1759 | 1476 | 2.068 | 2.036E-002 | 7.74 |
| ⁶⁰ Co | 50 | 1332.75 | 2349 | 1236 | 2.186 | 2.719E-002 | 6.01 |
| ²⁴ Na | 51 | 1368.95 | 11456 | 904 | 2.072 | 1.326E-001 | 1.81 |
| ²¹⁴ Bi | 52 | 1377.79 | 185 | 773 | 2.076 | 2.141E-003 | 13.25 |
| ¹⁵² Eu | 53 | 1408.30 | 312 | 779 | 2.029 | 3.612E-003 | 9.21 |
| ⁴⁰ K | 54 | 1461.23 | 8344 | 783 | 2.106 | 9.657E-002 | 2.17 |
| ⁸² Br | 55 | 1475.30 | 888 | 753 | 2.107 | 1.028E-002 | 9.32 |
| ²¹⁴ Bi | 56 | 1509.96 | 74 | 405 | 1.433 | 8.518E-004 | 26.45 |
| ⁴² K | 57 | 1525.17 | 5373 | 625 | 2.096 | 6.218E-002 | 2.72 |
| ²⁴ Na | 58 | 1732.60 | 520 | 521 | 2.124 | 6.018E-003 | 16.09 |
| ²¹⁴ Bi | 59 | 1765.14 | 791 | 366 | 2.276 | 9.153E-003 | 4.11 |
| - | 60 | 2104.57 | 220 | 426 | 2.870 | 2.549E-003 | 10.71 |
| ²¹⁴ Bi | 61 | 2205.04 | 259 | 389 | 2.141 | 2.995E-003 | 28.64 |
| ²⁴ Na | 62 | 2243.87 | 1048 | 530 | 3.576 | 1.213E-002 | 9.54 |
| ²⁰⁸ Tl | 63 | 2615.74 | 2239 | 239 | 2.558 | 2.592E-002 | 2.20 |
| ²⁴ Na | 64 | 2755.30 | 6503 | 97 | 2.643 | 7.527E-002 | 1.92 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.4.: Analysenblatt Gammaskpektrometrie Zirbe C Splintholz mit Quarzglas, Messung 1D

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 E |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 30.05.07 09:02:08 | | | |
| Live Time: | | | | 86384 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 86400 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 31.05.2007 10:45:33 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.45 | 1575 | 2496 | 0.880 | 1.823E-002 | 3.29 |
| - | 2 | 64.04 | 1260 | 10163 | 1.205 | 1.458E-002 | 17.84 |
| - | 3 | 70.29 | 873 | 19791 | 1.216 | 1.010E-002 | 13.49 |
| - | 4 | 75.72 | 1614 | 20410 | 1.226 | 1.868E-002 | 11.92 |
| - | 5 | 93.30 | 2695 | 18077 | 1.469 | 3.119E-002 | 4.83 |
| ¹⁵³ Sm | 6 | 103.89 | 6698 | 20937 | 1.290 | 7.752E-002 | 5.19 |
| ¹⁵² Eu | 7 | 122.61 | 1125 | 19136 | 1.570 | 1.302E-002 | 8.18 |
| ⁴⁷ Sc | 8 | 160.10 | 2599 | 15012 | 1.227 | 3.008E-002 | 11.67 |
| ²²⁶ Ra | 9 | 186.43 | 1839 | 10182 | 1.423 | 2.129E-002 | 17.28 |
| ⁵⁹ Fe | 10 | 193.00 | 529 | 11641 | 1.430 | 6.124E-003 | 21.43 |
| ²¹² Pb | 11 | 239.43 | 937 | 10033 | 1.517 | 1.084E-002 | 7.74 |
| ¹⁷⁵ Yb | 12 | 283.17 | 632 | 4691 | 1.267 | 7.319E-003 | 9.80 |
| ⁵¹ Cr | 13 | 320.70 | 4060 | 6976 | 1.459 | 4.699E-002 | 2.01 |
| ¹¹⁵ Cd | 14 | 336.81 | 418 | 3935 | 1.342 | 4.835E-003 | 12.29 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 E |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ¹⁵² Eu | 15 | 344.85 | 545 | 4078 | 1.348 | 6.303E-003 | 9.41 |
| ²¹⁴ Pb | 16 | 352.59 | 485 | 3880 | 1.354 | 5.615E-003 | 10.22 |
| ¹³³ Ba | 17 | 356.65 | 426 | 4084 | 1.358 | 4.936E-003 | 11.44 |
| ¹⁷⁵ Yb | 18 | 396.90 | 1231 | 5192 | 1.423 | 1.424E-002 | 15.44 |
| ¹⁹⁸ Au | 19 | 412.18 | 476 | 3427 | 1.734 | 5.514E-003 | 45.25 |
| ¹⁴⁰ La | 20 | 487.43 | 284 | 2447 | 1.314 | 3.282E-003 | 14.58 |
| ¹³¹ Ba | 21 | 496.79 | 448 | 2690 | 1.320 | 5.183E-003 | 10.22 |
| - | 22 | 511.48 | 4534 | 4623 | 2.795 | 5.248E-002 | 1.66 |
| ⁸² Br | 23 | 554.83 | 2639 | 2521 | 1.526 | 3.054E-002 | 2.45 |
| ¹²² Sb | 24 | 564.34 | 563 | 2383 | 1.531 | 6.521E-003 | 7.57 |
| ²⁰⁸ Tl | 25 | 583.58 | 533 | 2642 | 1.863 | 6.170E-003 | 8.54 |
| ¹³⁴ Cs | 26 | 605.04 | 719 | 3172 | 1.758 | 8.326E-003 | 10.28 |
| ²¹⁴ Bi | 27 | 609.70 | 874 | 3145 | 1.761 | 1.012E-002 | 9.66 |
| ⁸² Br | 28 | 619.54 | 1713 | 3094 | 1.767 | 1.982E-002 | 8.79 |
| ^{110m} Ag | 29 | 658.07 | 1780 | 3402 | 1.578 | 2.060E-002 | 3.23 |
| ⁸² Br | 30 | 698.67 | 954 | 2215 | 1.885 | 1.104E-002 | 17.40 |
| ^{110m} Ag | 31 | 706.99 | 339 | 2887 | 1.890 | 3.925E-003 | 18.78 |
| ^{110m} Ag | 32 | 764.40 | 293 | 1798 | 1.325 | 3.389E-003 | 13.47 |
| ⁸² Br | 33 | 776.86 | 2462 | 2803 | 1.838 | 2.849E-002 | 2.46 |
| ¹³⁴ Cs | 34 | 796.02 | 415 | 2107 | 1.675 | 4.803E-003 | 35.02 |
| ⁸² Br | 35 | 828.07 | 652 | 2133 | 1.641 | 7.542E-003 | 21.11 |
| - | 36 | 847.09 | 265 | 1296 | 1.622 | 3.062E-003 | 14.69 |
| ^{110m} Ag | 37 | 884.90 | 1248 | 2105 | 1.762 | 1.445E-002 | 3.95 |
| ⁴⁶ Sc | 38 | 889.53 | 926 | 2033 | 1.764 | 1.071E-002 | 4.88 |
| ²²⁸ Ac | 39 | 911.36 | 406 | 2032 | 1.267 | 4.700E-003 | 28.19 |
| ^{110m} Ag | 40 | 937.64 | 464 | 1977 | 1.697 | 5.366E-003 | 8.98 |
| ¹⁵² Eu | 41 | 964.71 | 278 | 1808 | 1.410 | 3.216E-003 | 26.40 |
| ²²⁸ Ac | 42 | 969.21 | 384 | 1837 | 1.412 | 4.446E-003 | 25.13 |
| ⁸² Br | 43 | 1044.23 | 611 | 1702 | 1.799 | 7.069E-003 | 6.59 |
| ⁸⁶ Rb | 44 | 1077.09 | 903 | 1899 | 1.927 | 1.045E-002 | 15.96 |
| ⁵⁹ Fe | 45 | 1099.47 | 3452 | 1974 | 1.882 | 3.995E-002 | 6.59 |
| ⁶⁵ Zn | 46 | 1115.79 | 5149 | 1674 | 1.927 | 5.959E-002 | 3.65 |
| ⁴⁶ Sc | 47 | 1120.65 | 1351 | 1453 | 1.929 | 1.564E-002 | 4.61 |
| ⁶⁰ Co | 48 | 1173.45 | 2835 | 1615 | 1.966 | 3.281E-002 | 2.14 |
| ²¹⁴ Bi | 49 | 1238.61 | 225 | 855 | 1.612 | 2.603E-003 | 50.91 |
| ⁵⁹ Fe | 50 | 1291.97 | 2528 | 911 | 2.146 | 2.926E-002 | 2.20 |
| ⁴⁷ Ca | 51 | 1297.27 | 642 | 953 | 2.148 | 7.425E-003 | 5.32 |
| ⁸² Br | 52 | 1317.82 | 593 | 890 | 1.990 | 6.859E-003 | 5.74 |
| ⁶⁰ Co | 53 | 1332.85 | 2729 | 1098 | 2.062 | 3.158E-002 | 4.95 |
| ²⁴ Na | 54 | 1368.99 | 3253 | 851 | 2.036 | 3.766E-002 | 1.87 |
| ^{110m} Ag | 55 | 1384.82 | 315 | 703 | 2.085 | 3.645E-003 | 8.73 |
| ¹⁵² Eu | 56 | 1408.31 | 276 | 629 | 2.180 | 3.197E-003 | 9.76 |
| ⁴⁰ K | 57 | 1461.26 | 8680 | 675 | 2.112 | 1.005E-001 | 2.09 |
| ⁸² Br | 58 | 1475.47 | 426 | 464 | 2.063 | 4.935E-003 | 17.61 |
| ^{110m} Ag | 59 | 1505.29 | 75 | 476 | 1.404 | 8.693E-004 | 24.42 |
| ⁴² K | 60 | 1525.06 | 231 | 405 | 2.179 | 2.673E-003 | 9.86 |
| ²²⁸ Ac | 61 | 1589.01 | 76 | 295 | 1.705 | 8.837E-004 | 26.53 |
| ¹⁴⁰ La | 62 | 1596.96 | 436 | 696 | 1.708 | 5.045E-003 | 10.68 |
| ²¹⁴ Bi | 63 | 1765.20 | 840 | 309 | 2.303 | 9.723E-003 | 3.86 |
| - | 64 | 2104.61 | 291 | 326 | 3.086 | 3.364E-003 | 24.84 |
| ²¹⁴ Bi | 65 | 2205.03 | 322 | 226 | 2.373 | 3.728E-003 | 6.91 |
| ²⁴ Na | 66 | 2244.29 | 294 | 283 | 3.690 | 3.399E-003 | 7.51 |
| ²⁰⁸ Tl | 67 | 2615.85 | 2162 | 149 | 2.550 | 2.502E-002 | 2.22 |
| ²⁴ Na | 68 | 2755.36 | 1781 | 88 | 2.600 | 2.062E-002 | 4.58 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.5.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Zirbe C Kernholz mit Quarzglas, Messung 1E

D.1. *Pinus Cembra* Kern- und Splintholz

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 F |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 31.05.07 09:28:08 | | | | | |
| Live Time: | | 86135 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 86400 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 01.06.2007 10:45:15 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 45.68 | 65408 | 44796 | 2.626 | 7.570E-001 | 0.06 |
| - | 2 | 49.08 | 36735 | 91067 | 2.637 | 4.252E-001 | 0.36 |
| - | 3 | 51.96 | 86937 | 137516 | 2.645 | 1.006E+000 | 0.16 |
| - | 4 | 57.42 | 90886 | 236542 | 2.659 | 1.052E+000 | 0.16 |
| - | 5 | 63.18 | 69106 | 342966 | 2.669 | 7.998E-001 | 0.21 |
| - | 6 | 70.00 | 96256 | 485469 | 2.681 | 1.114E+000 | 0.19 |
| - | 7 | 75.44 | 37966 | 526656 | 2.690 | 4.394E-001 | 0.47 |
| - | 8 | 85.10 | 8731 | 273819 | 1.387 | 1.011E-001 | 3.94 |
| - | 9 | 87.49 | 15020 | 314018 | 1.392 | 1.738E-001 | 2.34 |
| - | 10 | 91.85 | 34322 | 309245 | 1.398 | 3.972E-001 | 1.11 |
| - | 11 | 95.35 | 43690 | 305364 | 1.404 | 5.057E-001 | 0.91 |
| - | 12 | 99.01 | 79213 | 301104 | 1.409 | 9.168E-001 | 0.60 |
| - | 13 | 103.84 | 629090 | 291060 | 1.416 | 7.281E+000 | 0.34 |
| - | 14 | 111.45 | 10611 | 297187 | 1.426 | 1.228E-001 | 3.11 |
| - | 15 | 114.06 | 22648 | 276361 | 1.431 | 2.621E-001 | 1.55 |
| - | 16 | 123.34 | 66464 | 342315 | 2.720 | 7.693E-001 | 0.67 |
| - | 17 | 133.55 | 20049 | 576233 | 2.734 | 2.321E-001 | 2.10 |
| - | 18 | 143.33 | 17279 | 247085 | 1.423 | 2.000E-001 | 2.76 |
| - | 19 | 146.13 | 124366 | 243788 | 1.427 | 1.439E+000 | 1.45 |
| - | 20 | 152.97 | 3109 | 236707 | 1.435 | 3.598E-002 | 10.05 |
| - | 21 | 160.07 | 27427 | 247268 | 1.443 | 3.174E-001 | 1.89 |
| - | 22 | 173.74 | 1392 | 197773 | 1.258 | 1.611E-002 | 13.06 |
| - | 23 | 177.94 | 2544 | 197061 | 1.262 | 2.945E-002 | 12.91 |
| - | 24 | 193.04 | 17452 | 194613 | 1.279 | 2.020E-001 | 12.86 |
| - | 25 | 198.63 | 4667 | 193602 | 1.284 | 5.401E-002 | 12.87 |
| - | 26 | 209.13 | 31896 | 274510 | 1.655 | 3.692E-001 | 3.62 |
| - | 27 | 216.70 | 25945 | 259302 | 1.663 | 3.003E-001 | 3.67 |
| - | 28 | 228.92 | 7035 | 205755 | 1.425 | 8.142E-002 | 4.69 |
| - | 29 | 242.63 | 2245 | 121187 | 1.182 | 2.599E-002 | 12.08 |
| - | 30 | 245.37 | 6035 | 143445 | 1.185 | 6.985E-002 | 4.83 |
| - | 31 | 250.09 | 2604 | 134632 | 1.189 | 3.013E-002 | 9.90 |
| - | 32 | 267.19 | 4315 | 197581 | 1.422 | 4.995E-002 | 25.52 |
| - | 33 | 278.19 | 6584 | 134732 | 1.446 | 7.620E-002 | 4.00 |
| - | 34 | 283.14 | 14976 | 141424 | 1.450 | 1.733E-001 | 1.93 |
| - | 35 | 293.95 | 6037 | 115792 | 1.513 | 6.987E-002 | 4.22 |
| - | 36 | 300.42 | 20686 | 131502 | 1.518 | 2.394E-001 | 1.48 |
| - | 37 | 308.44 | 3787 | 118099 | 1.525 | 4.383E-002 | 6.75 |
| - | 38 | 312.52 | 101556 | 124188 | 1.528 | 1.175E+000 | 0.67 |
| - | 39 | 320.69 | 109602 | 118150 | 1.535 | 1.269E+000 | 0.67 |
| - | 40 | 329.38 | 176177 | 111165 | 1.542 | 2.039E+000 | 0.60 |
| - | 41 | 335.47 | 3287 | 99122 | 1.547 | 3.805E-002 | 7.08 |
| - | 42 | 341.13 | 11192 | 104316 | 1.552 | 1.295E-001 | 2.30 |
| - | 43 | 344.87 | 28651 | 102344 | 1.555 | 3.316E-001 | 1.13 |
| - | 44 | 373.84 | 10637 | 107362 | 1.640 | 1.231E-001 | 2.33 |
| - | 45 | 396.91 | 29476 | 108516 | 1.657 | 3.412E-001 | 0.94 |
| - | 46 | 411.75 | 2238 | 74389 | 1.626 | 2.591E-002 | 9.43 |
| - | 47 | 416.37 | 4204 | 92349 | 1.629 | 4.866E-002 | 5.39 |
| - | 48 | 433.03 | 20789 | 102343 | 1.568 | 2.406E-001 | 4.88 |
| - | 49 | 444.40 | 1854 | 96137 | 1.563 | 2.146E-002 | 11.99 |
| - | 50 | 482.63 | 15856 | 75732 | 1.601 | 1.835E-001 | 3.63 |
| - | 51 | 487.47 | 313778 | 85283 | 1.604 | 3.632E+000 | 3.23 |
| - | 52 | 496.77 | 27761 | 82422 | 1.610 | 3.213E-001 | 3.32 |
| - | 53 | 511.60 | 22705 | 127253 | 3.222 | 2.628E-001 | 1.24 |
| - | 54 | 531.44 | 7842 | 115208 | 1.767 | 9.076E-002 | 14.00 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 F |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 55 | 554.88 | 2898 | 78055 | 1.706 | 3.354E-002 | 7.29 |
| - | 56 | 559.39 | 2962 | 83665 | 1.709 | 3.428E-002 | 7.03 |
| - | 57 | 564.03 | 3929 | 83705 | 1.712 | 4.548E-002 | 5.41 |
| - | 58 | 569.75 | 3089 | 89336 | 1.715 | 3.575E-002 | 6.79 |
| - | 59 | 574.66 | 2573 | 89381 | 1.718 | 2.978E-002 | 8.20 |
| - | 60 | 605.08 | 22529 | 104278 | 1.667 | 2.607E-001 | 4.26 |
| - | 61 | 619.78 | 3764 | 98287 | 2.467 | 4.357E-002 | 6.52 |
| - | 62 | 723.73 | 2543 | 68362 | 2.099 | 2.943E-002 | 8.72 |
| - | 63 | 751.97 | 23753 | 68446 | 1.766 | 2.749E-001 | 1.08 |
| - | 64 | 757.03 | 935 | 67816 | 1.768 | 1.082E-002 | 20.06 |
| - | 65 | 779.28 | 9439 | 103714 | 1.788 | 1.092E-001 | 10.83 |
| - | 66 | 796.10 | 16609 | 68474 | 1.777 | 1.922E-001 | 1.61 |
| - | 67 | 802.37 | 1752 | 68567 | 1.780 | 2.028E-002 | 10.62 |
| - | 68 | 810.78 | 2061 | 68681 | 1.784 | 2.386E-002 | 9.03 |
| - | 69 | 816.02 | 124590 | 64518 | 1.787 | 1.442E+000 | 0.87 |
| - | 70 | 835.08 | 16140 | 89403 | 1.742 | 1.868E-001 | 5.41 |
| - | 71 | 868.02 | 29774 | 105243 | 1.839 | 3.446E-001 | 3.64 |
| - | 72 | 879.62 | 6397 | 72685 | 1.830 | 7.404E-002 | 3.38 |
| - | 73 | 889.47 | 941441 | 75191 | 1.835 | 1.090E+001 | 0.19 |
| - | 74 | 919.74 | 12226 | 52434 | 1.818 | 1.415E-001 | 1.71 |
| - | 75 | 925.39 | 32687 | 57894 | 1.820 | 3.783E-001 | 0.80 |
| - | 76 | 951.20 | 2707 | 57677 | 1.855 | 3.133E-002 | 7.00 |
| - | 77 | 964.75 | 14366 | 78850 | 3.644 | 1.663E-001 | 1.58 |
| - | 78 | 1005.03 | 1144 | 47504 | 1.944 | 1.324E-002 | 55.90 |
| - | 79 | 1076.94 | 20406 | 40606 | 1.996 | 2.362E-001 | 3.68 |
| - | 80 | 1085.85 | 8040 | 41341 | 2.000 | 9.305E-002 | 4.03 |
| - | 81 | 1099.43 | 327496 | 57284 | 1.941 | 3.790E+000 | 0.37 |
| - | 82 | 1112.29 | 6355 | 37181 | 1.954 | 7.355E-002 | 2.59 |
| - | 83 | 1115.73 | 12686 | 37057 | 1.955 | 1.468E-001 | 1.46 |
| - | 84 | 1120.74 | 810083 | 35188 | 1.958 | 9.376E+000 | 0.18 |
| - | 85 | 1173.45 | 68478 | 25185 | 1.991 | 7.926E-001 | 1.25 |
| - | 86 | 1178.26 | 2898 | 23872 | 1.993 | 3.355E-002 | 4.40 |
| - | 87 | 1189.10 | 1924 | 22902 | 1.998 | 2.227E-002 | 6.29 |
| - | 88 | 1221.70 | 2455 | 19929 | 1.864 | 2.842E-002 | 5.19 |
| - | 89 | 1231.18 | 830 | 19242 | 1.868 | 9.606E-003 | 12.68 |
| - | 90 | 1274.04 | 2687 | 25195 | 3.761 | 3.110E-002 | 4.96 |
| - | 91 | 1291.88 | 223318 | 19289 | 2.025 | 2.585E+000 | 0.43 |
| - | 92 | 1297.41 | 3088 | 19179 | 2.027 | 3.574E-002 | 3.70 |
| - | 93 | 1312.47 | 672 | 14961 | 1.900 | 7.774E-003 | 55.03 |
| - | 94 | 1332.82 | 62475 | 26681 | 2.069 | 7.231E-001 | 1.16 |
| - | 95 | 1368.97 | 297303 | 29551 | 2.081 | 3.441E+000 | 0.32 |
| - | 96 | 1408.41 | 8204 | 15670 | 2.032 | 9.495E-002 | 4.55 |
| - | 97 | 1461.25 | 8680 | 14700 | 2.102 | 1.005E-001 | 4.13 |
| - | 98 | 1500.06 | 542 | 7289 | 2.124 | 6.273E-003 | 14.05 |
| - | 99 | 1525.19 | 1293 | 8886 | 2.050 | 1.496E-002 | 20.03 |
| - | 100 | 1596.74 | 302531 | 9346 | 2.183 | 3.502E+000 | 0.30 |
| - | 101 | 1732.61 | 13453 | 8253 | 2.280 | 1.557E-001 | 2.44 |
| - | 102 | 1765.06 | 906 | 6790 | 2.465 | 1.049E-002 | 8.24 |
| - | 103 | 1925.77 | 1677 | 5918 | 2.309 | 1.941E-002 | 27.34 |
| - | 104 | 2010.66 | 13682 | 6429 | 2.385 | 1.584E-001 | 9.53 |
| - | 105 | 2084.15 | 3237 | 6756 | 2.329 | 3.747E-002 | 2.61 |
| - | 106 | 2244.04 | 25473 | 8505 | 3.355 | 2.948E-001 | 1.62 |
| - | 107 | 2349.04 | 2509 | 7066 | 2.671 | 2.904E-002 | 3.48 |
| - | 108 | 2413.27 | 1313 | 7612 | 2.498 | 1.520E-002 | 20.17 |
| - | 109 | 2506.89 | 738 | 9263 | 2.124 | 8.537E-003 | 11.20 |
| - | 110 | 2522.66 | 8613 | 9399 | 2.595 | 9.968E-002 | 1.42 |

D.1. Pinus Cembra Kern- und Splintholz

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 F |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 111 | 2755.38 | 168656 | 1271 | 2.681 | 1.952E+000 | 0.36 |
| - | 112 | 3101.86 | 180 | 340 | 3.051 | 2.084E-003 | 12.11 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.6.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Standard SO-1 (siehe Tabelle C.2) mit Quarzglas, Messung 1F

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 G |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 01.06.07 11:40:44 | | | |
| Live Time: | | | | 246208 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 246250 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 04.06.2007 09:23:49 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.65 | 5453 | 11785 | 1.044 | 2.214E-002 | 1.60 |
| - | 2 | 64.01 | 2598 | 43482 | 1.126 | 1.055E-002 | 18.24 |
| - | 3 | 75.73 | 4014 | 60625 | 1.402 | 1.630E-002 | 28.41 |
| - | 4 | 85.42 | 1549 | 38220 | 1.422 | 6.290E-003 | 9.28 |
| - | 5 | 93.26 | 7611 | 53438 | 1.434 | 3.091E-002 | 2.27 |
| ⁴⁷ Sc | 6 | 160.09 | 3768 | 39043 | 1.311 | 1.530E-002 | 4.00 |
| ²²⁶ Ra | 7 | 186.50 | 5907 | 41207 | 1.297 | 2.399E-002 | 3.43 |
| ²¹² Pb | 8 | 239.28 | 2153 | 26952 | 1.416 | 8.744E-003 | 20.41 |
| ²¹⁴ Pb | 9 | 352.53 | 1046 | 10457 | 1.409 | 4.249E-003 | 7.57 |
| ¹³³ Ba | 10 | 356.57 | 1122 | 10091 | 1.412 | 4.558E-003 | 7.09 |
| - | 11 | 511.38 | 10638 | 10370 | 3.005 | 4.320E-002 | 3.96 |
| ⁸² Br | 12 | 554.73 | 2993 | 5731 | 1.630 | 1.215E-002 | 9.43 |
| ¹²² Sb | 13 | 563.86 | 725 | 5969 | 1.636 | 2.943E-003 | 12.01 |
| ¹³⁴ Cs | 14 | 569.77 | 1101 | 5864 | 1.639 | 4.472E-003 | 10.48 |
| ²⁰⁸ Tl | 15 | 583.53 | 1235 | 8431 | 1.781 | 5.017E-003 | 22.70 |
| ¹³⁴ Cs | 16 | 605.07 | 6581 | 5654 | 1.672 | 2.672E-002 | 1.49 |
| ²¹⁴ Bi | 17 | 609.62 | 1580 | 5481 | 1.675 | 6.415E-003 | 4.10 |
| ⁸² Br | 18 | 619.46 | 1782 | 5267 | 1.681 | 7.235E-003 | 3.72 |
| ^{110m} Ag | 19 | 657.94 | 1560 | 4647 | 1.538 | 6.335E-003 | 4.40 |
| ⁸² Br | 20 | 698.68 | 1016 | 6196 | 1.725 | 4.126E-003 | 6.08 |
| ²¹² Bi | 21 | 727.50 | 349 | 3475 | 1.827 | 1.416E-003 | 16.03 |
| - | 22 | 764.14 | 335 | 6544 | 1.677 | 1.359E-003 | 16.75 |
| ⁸² Br | 23 | 776.75 | 2818 | 5824 | 1.782 | 1.144E-002 | 2.61 |
| ¹³⁴ Cs | 24 | 796.05 | 5088 | 4456 | 1.853 | 2.066E-002 | 6.13 |
| ¹³⁴ Cs | 25 | 802.36 | 498 | 4192 | 1.857 | 2.023E-003 | 11.80 |
| ⁸² Br | 26 | 827.96 | 770 | 3878 | 1.718 | 3.129E-003 | 7.64 |
| - | 27 | 847.08 | 653 | 4495 | 1.975 | 2.652E-003 | 8.86 |
| ^{110m} Ag | 28 | 884.88 | 1252 | 4355 | 1.768 | 5.084E-003 | 4.83 |
| ²²⁸ Ac | 29 | 911.31 | 1248 | 4136 | 1.801 | 5.068E-003 | 4.70 |
| - | 30 | 937.80 | 713 | 4497 | 1.820 | 2.895E-003 | 34.38 |
| ²²⁸ Ac | 31 | 969.06 | 593 | 2415 | 1.449 | 2.408E-003 | 8.40 |
| ^{234m} Pa | 32 | 1001.31 | 447 | 3242 | 1.495 | 1.814E-003 | 10.38 |
| ⁸² Br | 33 | 1044.11 | 774 | 3677 | 2.014 | 3.145E-003 | 6.61 |
| ⁸⁶ Rb | 34 | 1076.89 | 13056 | 4098 | 1.917 | 5.302E-002 | 1.74 |
| ⁶⁵ Zn | 35 | 1115.70 | 8627 | 2656 | 1.897 | 3.503E-002 | 1.18 |
| ²¹⁴ Bi | 36 | 1120.45 | 1050 | 2657 | 1.899 | 4.262E-003 | 4.71 |
| ⁶⁰ Co | 37 | 1173.38 | 1364 | 3568 | 2.059 | 5.540E-003 | 4.02 |
| ²¹⁴ Bi | 38 | 1238.45 | 493 | 2660 | 2.105 | 2.000E-003 | 9.36 |
| ⁴⁷ Ca | 39 | 1297.21 | 740 | 2118 | 2.020 | 3.004E-003 | 6.08 |
| ⁸² Br | 40 | 1317.65 | 795 | 1611 | 1.932 | 3.230E-003 | 5.42 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 G |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁶⁰ Co | 41 | 1332.69 | 1276 | 1968 | 2.152 | 5.182E-003 | 10.62 |
| ²⁴ Na | 42 | 1368.76 | 176 | 1059 | 1.740 | 7.147E-004 | 17.46 |
| ²¹⁴ Bi | 43 | 1377.92 | 281 | 1229 | 1.743 | 1.143E-003 | 11.40 |
| - | 44 | 1384.36 | 297 | 1151 | 1.746 | 1.208E-003 | 10.86 |
| - | 45 | 1401.39 | 199 | 1273 | 2.129 | 8.092E-004 | 15.71 |
| ²¹⁴ Bi | 46 | 1408.25 | 320 | 1314 | 2.132 | 1.300E-003 | 10.85 |
| ⁴⁰ K | 47 | 1461.16 | 18274 | 1633 | 2.110 | 7.421E-002 | 1.29 |
| ⁸² Br | 48 | 1475.34 | 362 | 1064 | 1.975 | 1.470E-003 | 8.92 |
| ²²⁸ Ac | 49 | 1588.72 | 287 | 604 | 1.759 | 1.164E-003 | 9.36 |
| - | 50 | 1592.94 | 260 | 603 | 1.760 | 1.054E-003 | 9.96 |
| - | 51 | 1631.00 | 158 | 752 | 2.038 | 6.418E-004 | 13.00 |
| ²¹⁴ Bi | 52 | 1730.22 | 301 | 699 | 2.276 | 1.221E-003 | 9.11 |
| ²¹⁴ Bi | 53 | 1765.09 | 1861 | 790 | 2.172 | 7.559E-003 | 6.08 |
| - | 54 | 1848.12 | 241 | 569 | 2.575 | 9.770E-004 | 10.81 |
| ²¹⁴ Bi | 55 | 2104.24 | 624 | 601 | 3.147 | 2.533E-003 | 5.24 |
| ²¹⁴ Bi | 56 | 2119.49 | 170 | 437 | 2.339 | 6.904E-004 | 13.21 |
| ²¹⁴ Bi | 57 | 2204.95 | 690 | 478 | 2.467 | 2.803E-003 | 4.75 |
| ²¹⁴ Bi | 58 | 2448.79 | 195 | 266 | 2.402 | 7.926E-004 | 10.85 |
| ²⁰⁸ Tl | 59 | 2615.66 | 4944 | 261 | 2.647 | 2.008E-002 | 1.44 |
| ²⁴ Na | 60 | 2755.07 | 129 | 137 | 2.549 | 5.247E-004 | 12.19 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.7.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Zirbe C Splintholz ohne Quarzglas, Messung 1G

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 H |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 04.06.07 08:07:46 | | | |
| Live Time: | | | | 91586 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 91600 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 05.06.2007 10:51:07 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.53 | 1316 | 2197 | 0.980 | 1.437E-002 | 3.53 |
| - | 2 | 63.97 | 849 | 8422 | 1.196 | 9.264E-003 | 25.58 |
| - | 3 | 75.69 | 1475 | 12879 | 1.711 | 1.610E-002 | 50.22 |
| - | 4 | 85.17 | 390 | 9361 | 1.359 | 4.253E-003 | 41.44 |
| - | 5 | 93.28 | 2552 | 9739 | 1.371 | 2.786E-002 | 37.31 |
| ⁴⁷ Sc | 6 | 160.16 | 1718 | 8763 | 1.439 | 1.876E-002 | 5.00 |
| ²²⁶ Ra | 7 | 186.44 | 1838 | 9891 | 1.477 | 2.007E-002 | 4.48 |
| ²¹² Pb | 8 | 239.31 | 900 | 6028 | 1.324 | 9.830E-003 | 30.07 |
| ²¹⁴ Pb | 9 | 352.55 | 453 | 2875 | 1.660 | 4.944E-003 | 10.63 |
| ¹³³ Ba | 10 | 356.57 | 431 | 4006 | 1.663 | 4.708E-003 | 10.81 |
| - | 11 | 511.43 | 4226 | 3486 | 3.158 | 4.614E-002 | 6.37 |
| ⁸² Br | 12 | 554.68 | 252 | 1756 | 1.540 | 2.747E-003 | 14.77 |
| ²⁰⁸ Tl | 13 | 583.63 | 390 | 1734 | 1.644 | 4.259E-003 | 10.06 |
| ¹³⁴ Cs | 14 | 605.03 | 491 | 1822 | 1.487 | 5.365E-003 | 17.22 |
| ²¹⁴ Bi | 15 | 609.69 | 677 | 2411 | 1.490 | 7.390E-003 | 15.40 |
| ^{110m} Ag | 16 | 658.01 | 1691 | 1771 | 1.580 | 1.846E-002 | 4.85 |
| - | 17 | 706.86 | 197 | 1382 | 1.246 | 2.150E-003 | 16.94 |
| - | 18 | 764.03 | 353 | 1881 | 1.716 | 3.859E-003 | 10.27 |
| ¹³⁴ Cs | 19 | 796.04 | 368 | 1241 | 1.510 | 4.022E-003 | 9.54 |
| - | 20 | 846.78 | 190 | 930 | 1.488 | 2.072E-003 | 17.08 |
| ^{110m} Ag | 21 | 884.83 | 1161 | 1863 | 1.825 | 1.268E-002 | 3.93 |
| ²²⁸ Ac | 22 | 911.64 | 453 | 1395 | 0.948 | 4.945E-003 | 21.75 |
| - | 23 | 937.63 | 459 | 1122 | 1.558 | 5.012E-003 | 7.70 |

D.1. Pinus Cembra Kern- und Splintholz

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 H |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ²²⁸ Ac | 24 | 969.23 | 242 | 1326 | 1.508 | 2.639E-003 | 12.76 |
| ^{234m} Pa | 25 | 1001.34 | 181 | 1282 | 1.815 | 1.974E-003 | 16.79 |
| ⁸⁶ Rb | 26 | 1076.97 | 743 | 1550 | 1.944 | 8.109E-003 | 14.44 |
| ⁶⁵ Zn | 27 | 1115.65 | 4832 | 927 | 1.943 | 5.275E-002 | 3.34 |
| ²¹⁴ Bi | 28 | 1120.53 | 381 | 957 | 1.945 | 4.159E-003 | 8.50 |
| ⁶⁰ Co | 29 | 1173.39 | 908 | 1408 | 1.941 | 9.916E-003 | 13.18 |
| ²¹⁴ Bi | 30 | 1238.16 | 195 | 1042 | 2.157 | 2.128E-003 | 14.74 |
| ⁴⁷ Ca | 31 | 1297.23 | 148 | 738 | 1.550 | 1.621E-003 | 17.34 |
| ⁶⁰ Co | 32 | 1332.73 | 707 | 751 | 2.113 | 7.715E-003 | 27.89 |
| ²¹⁴ Bi | 33 | 1377.98 | 164 | 455 | 1.845 | 1.786E-003 | 12.71 |
| - | 34 | 1384.58 | 287 | 479 | 1.848 | 3.129E-003 | 8.69 |
| ⁴⁰ K | 35 | 1461.12 | 6919 | 526 | 2.068 | 7.554E-002 | 2.34 |
| ²¹⁴ Bi | 36 | 1730.00 | 113 | 266 | 2.235 | 1.237E-003 | 15.32 |
| ²¹⁴ Bi | 37 | 1765.08 | 687 | 249 | 2.097 | 7.497E-003 | 4.31 |
| - | 38 | 2104.42 | 197 | 213 | 3.216 | 2.147E-003 | 9.47 |
| ²¹⁴ Bi | 39 | 2204.91 | 243 | 176 | 2.550 | 2.648E-003 | 8.05 |
| ²⁰⁸ Tl | 40 | 2615.54 | 1802 | 78 | 2.620 | 1.967E-002 | 4.38 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.8.: Analysenblatt Gammaskopmetrie Zirbe C Kernholz ohne Quarzglas, Messung 1H

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 I |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 05.06.07 09:36:31 | | | |
| Live Time: | | | | 96885 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 96900 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 06.06.2007 14:33:03 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 63.95 | 1138 | 8811 | 1.119 | 1.174E-002 | 19.87 |
| - | 2 | 75.90 | 1363 | 13885 | 0.847 | 1.406E-002 | 27.59 |
| - | 3 | 85.30 | 586 | 9516 | 1.442 | 6.048E-003 | 17.64 |
| - | 4 | 93.31 | 3189 | 13692 | 1.454 | 3.291E-002 | 12.02 |
| ¹⁵³ Sm | 5 | 103.78 | 1192 | 11912 | 1.386 | 1.230E-002 | 7.13 |
| ¹⁵² Eu | 6 | 122.53 | 1693 | 15889 | 1.596 | 1.747E-002 | 5.41 |
| - | 7 | 178.05 | 347 | 7737 | 1.244 | 3.580E-003 | 20.40 |
| ²²⁶ Ra | 8 | 186.33 | 1791 | 9800 | 1.253 | 1.848E-002 | 4.57 |
| - | 9 | 193.07 | 656 | 8584 | 1.260 | 6.771E-003 | 10.57 |
| - | 10 | 198.80 | 483 | 9031 | 1.267 | 4.985E-003 | 14.03 |
| ²¹² Pb | 11 | 239.37 | 950 | 8063 | 1.378 | 9.801E-003 | 7.31 |
| ¹⁷⁵ Yb | 12 | 283.11 | 387 | 7048 | 1.255 | 3.995E-003 | 14.43 |
| ⁵¹ Cr | 13 | 320.68 | 5255 | 6394 | 1.472 | 5.423E-002 | 6.27 |
| ¹⁵² Eu | 14 | 344.82 | 949 | 3737 | 1.387 | 9.790E-003 | 5.69 |
| ²¹⁴ Pb | 15 | 352.50 | 431 | 3577 | 1.393 | 4.445E-003 | 10.59 |
| - | 16 | 356.68 | 432 | 3490 | 1.396 | 4.455E-003 | 10.64 |
| ¹⁷⁵ Yb | 17 | 396.81 | 767 | 4453 | 1.483 | 7.916E-003 | 21.96 |
| ¹³¹ Ba | 18 | 496.89 | 255 | 2695 | 1.448 | 2.633E-003 | 15.74 |
| - | 19 | 511.43 | 3771 | 3598 | 2.766 | 3.891E-002 | 1.80 |
| ²⁰⁸ Tl | 20 | 583.48 | 489 | 1776 | 1.623 | 5.046E-003 | 8.31 |
| ²¹⁴ Bi | 21 | 609.63 | 674 | 2169 | 1.651 | 6.954E-003 | 28.42 |
| - | 22 | 779.29 | 264 | 1959 | 1.553 | 2.723E-003 | 13.42 |
| - | 23 | 846.85 | 252 | 1591 | 1.437 | 2.599E-003 | 13.81 |
| ⁴⁶ Sc | 24 | 889.35 | 1166 | 1736 | 1.664 | 1.204E-002 | 4.05 |
| ²²⁸ Ac | 25 | 911.38 | 588 | 2220 | 2.081 | 6.065E-003 | 21.70 |
| ¹⁵² Eu | 26 | 964.38 | 406 | 1230 | 1.641 | 4.189E-003 | 8.78 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 I |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ²²⁸ Ac | 27 | 969.06 | 283 | 1252 | 1.643 | 2.917E-003 | 11.39 |
| ^{234m} Pa | 28 | 1001.14 | 202 | 1167 | 1.482 | 2.084E-003 | 15.76 |
| - | 29 | 1085.92 | 228 | 1426 | 2.211 | 2.354E-003 | 14.44 |
| ⁵⁹ Fe | 30 | 1099.33 | 4771 | 1741 | 1.927 | 4.924E-002 | 3.78 |
| - | 31 | 1112.08 | 293 | 1103 | 1.941 | 3.024E-003 | 10.09 |
| ⁴⁶ Sc | 32 | 1120.62 | 1412 | 1130 | 1.945 | 1.457E-002 | 3.27 |
| ⁶⁰ Co | 33 | 1173.28 | 3020 | 1477 | 1.970 | 3.117E-002 | 104.48 |
| ²¹⁴ Bi | 34 | 1238.37 | 189 | 1045 | 1.836 | 1.952E-003 | 15.42 |
| ⁵⁹ Fe | 35 | 1291.81 | 3260 | 961 | 2.083 | 3.364E-002 | 1.87 |
| ⁶⁰ Co | 36 | 1332.69 | 2680 | 832 | 2.093 | 2.766E-002 | 2.07 |
| ²¹⁴ Bi | 37 | 1377.68 | 155 | 482 | 2.010 | 1.597E-003 | 14.84 |
| ¹⁵² Eu | 38 | 1408.34 | 405 | 659 | 2.023 | 4.178E-003 | 103.41 |
| ⁴⁰ K | 39 | 1461.11 | 7584 | 612 | 2.152 | 7.827E-002 | 2.18 |
| ²¹⁴ Bi | 40 | 1730.27 | 167 | 262 | 2.612 | 1.728E-003 | 11.23 |
| ²¹⁴ Bi | 41 | 1765.00 | 746 | 245 | 2.245 | 7.698E-003 | 4.08 |
| - | 42 | 2104.46 | 288 | 188 | 3.072 | 2.977E-003 | 20.99 |
| ²¹⁴ Bi | 43 | 2204.83 | 232 | 198 | 2.677 | 2.392E-003 | 8.47 |
| ²⁰⁸ Tl | 44 | 2615.56 | 1937 | 87 | 2.545 | 1.999E-002 | 2.54 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.9.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Quarzglas (aus Probe Zirbe C Splintholz), Messung 1I

| ANALYSENBLATT | | | | | | | 1 J |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 11.06.07 10:55:55 | | | |
| Live Time: | | | | 90984 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 91001 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 12.06.2007 13:28:48 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.56 | 1568 | 2675 | 1.001 | 1.724E-002 | 3.25 |
| - | 2 | 63.92 | 939 | 12664 | 1.283 | 1.032E-002 | 28.66 |
| - | 3 | 75.69 | 1458 | 17060 | 2.027 | 1.602E-002 | 50.51 |
| - | 4 | 93.21 | 2668 | 17270 | 1.293 | 2.932E-002 | 3.66 |
| ²²⁶ Ra | 5 | 186.39 | 1743 | 11675 | 1.260 | 1.916E-002 | 4.86 |
| ²¹² Pb | 6 | 239.35 | 955 | 9441 | 0.979 | 1.049E-002 | 24.09 |
| ²¹⁴ Pb | 7 | 352.35 | 809 | 4175 | 1.563 | 8.894E-003 | 24.00 |
| ¹³³ Ba | 8 | 356.13 | 456 | 4100 | 1.566 | 5.008E-003 | 25.01 |
| - | 9 | 511.23 | 4013 | 3537 | 2.906 | 4.410E-002 | 1.70 |
| ¹³⁴ Cs | 10 | 569.61 | 347 | 2575 | 1.566 | 3.818E-003 | 11.32 |
| ²⁰⁸ Tl | 11 | 583.34 | 428 | 1963 | 1.452 | 4.700E-003 | 9.33 |
| ¹³⁴ Cs | 12 | 604.82 | 2284 | 2104 | 1.628 | 2.509E-002 | 2.55 |
| ²¹⁴ Bi | 13 | 609.46 | 850 | 2009 | 1.631 | 9.338E-003 | 5.04 |
| ^{110m} Ag | 14 | 657.81 | 703 | 1509 | 1.662 | 7.727E-003 | 5.89 |
| ¹³⁷ Cs | 15 | 661.81 | 222 | 1610 | 1.665 | 2.442E-003 | 14.77 |
| ¹³⁴ Cs | 16 | 795.72 | 1906 | 1455 | 1.835 | 2.095E-002 | 2.77 |
| - | 17 | 846.69 | 287 | 1080 | 1.936 | 3.153E-003 | 11.91 |
| ^{110m} Ag | 18 | 884.54 | 471 | 1716 | 2.013 | 5.177E-003 | 39.21 |
| ²²⁸ Ac | 19 | 910.96 | 458 | 1144 | 1.958 | 5.034E-003 | 7.91 |
| ^{110m} Ag | 20 | 937.55 | 194 | 1360 | 1.746 | 2.130E-003 | 16.55 |
| ²²⁸ Ac | 21 | 968.80 | 246 | 1154 | 1.615 | 2.706E-003 | 13.06 |
| ^{234m} Pa | 22 | 1000.76 | 153 | 1211 | 1.262 | 1.680E-003 | 17.28 |
| ⁸⁶ Rb | 23 | 1076.54 | 3467 | 1357 | 1.997 | 3.810E-002 | 1.83 |
| ⁶⁵ Zn | 24 | 1115.30 | 3118 | 956 | 1.934 | 3.426E-002 | 4.45 |

D.1. *Pinus Cembra* Kern- und Splintholz

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | 1 J |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ²¹⁴ Bi | 25 | 1120.20 | 458 | 988 | 1.936 | 5.033E-003 | 7.72 |
| ⁶⁰ Co | 26 | 1173.01 | 455 | 969 | 1.743 | 4.998E-003 | 7.26 |
| ²¹⁴ Bi | 27 | 1237.87 | 155 | 869 | 1.499 | 1.698E-003 | 16.92 |
| ⁶⁰ Co | 28 | 1332.43 | 449 | 781 | 2.055 | 4.931E-003 | 6.57 |
| ²¹⁴ Bi | 29 | 1377.65 | 189 | 482 | 1.720 | 2.072E-003 | 39.16 |
| - | 30 | 1407.85 | 165 | 603 | 1.946 | 1.812E-003 | 13.50 |
| ⁴⁰ K | 31 | 1460.74 | 7362 | 554 | 2.169 | 8.090E-002 | 2.28 |
| ²¹⁴ Bi | 32 | 1729.81 | 161 | 194 | 2.644 | 1.766E-003 | 11.09 |
| ²¹⁴ Bi | 33 | 1764.63 | 796 | 285 | 2.291 | 8.751E-003 | 9.32 |
| ²¹⁴ Bi | 34 | 2204.51 | 222 | 152 | 2.201 | 2.439E-003 | 8.48 |
| ²⁰⁸ Tl | 35 | 2615.09 | 1810 | 88 | 2.607 | 1.989E-002 | 2.40 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.10.: *Analysenblatt Gammapektrometrie Zirbe C Splintholz ohne Quarzglas, Messung 1J*

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

Messdaten zu Abschnitt 7.2.

rotierende Aktivierung Standards

| ANALYSENBLATT | | | | | | | S1A |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 30.07.07 09:50:56 | | | | | |
| Live Time: | | 3587 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 3600 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 30.07.2007 11:59:35 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ¹⁵³ Sm | 1 | 103.89 | 4215 | 7327 | 1.314 | 1.171E+000 | 1.88 |
| ¹⁴⁰ La | 2 | 329.40 | 1820 | 4000 | 1.456 | 5.056E-001 | 6.12 |
| ¹⁴⁰ La | 3 | 487.51 | 3330 | 3282 | 1.560 | 9.250E-001 | 1.96 |
| - | 4 | 511.44 | 4434 | 3565 | 2.857 | 1.232E+000 | 6.81 |
| ¹⁴⁰ La | 5 | 816.05 | 1273 | 3468 | 1.755 | 3.535E-001 | 3.96 |
| ⁴⁶ Sc | 6 | 889.54 | 1833 | 3232 | 1.791 | 5.092E-001 | 3.14 |
| ⁵⁹ Fe | 7 | 1099.66 | 728 | 4029 | 1.621 | 2.022E-001 | 26.81 |
| ⁴⁶ Sc | 8 | 1120.83 | 1539 | 4478 | 1.882 | 4.274E-001 | 4.25 |
| ⁵⁹ Fe | 9 | 1291.94 | 427 | 1385 | 1.802 | 1.187E-001 | 8.42 |
| ²⁴ Na | 10 | 1369.09 | 92583 | 1535 | 2.077 | 2.572E+001 | 0.40 |
| - | 11 | 1461.55 | 347 | 834 | 2.087 | 9.640E-002 | 8.74 |
| ⁴² K | 12 | 1525.34 | 1235 | 1022 | 1.935 | 3.430E-001 | 9.39 |
| ¹⁴⁰ La | 13 | 1596.90 | 3255 | 1032 | 2.173 | 9.042E-001 | 1.88 |
| ²⁴ Na | 14 | 1732.78 | 4154 | 1328 | 2.214 | 1.154E+000 | 3.73 |
| ²⁴ Na | 15 | 2244.30 | 7991 | 2100 | 3.364 | 2.220E+000 | 3.07 |
| ²⁴ Na | 16 | 2755.71 | 52728 | 394 | 2.673 | 1.465E+001 | 0.66 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.11.: Analysenblatt Gammaskpektrometrie Standard SO-1 mit Quarzglas, Soil, Messung S1A

| ANALYSENBLATT | | | | | | | S2A |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 30.07.07 10:53:47 | | | | | |
| Live Time: | | 3599 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 3600 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 30.07.2007 13:02:53 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ¹⁵³ Sm | 1 | 103.87 | 1327 | 890 | 1.345 | 3.685E-001 | 10.67 |
| ¹⁴⁰ La | 2 | 329.44 | 707 | 375 | 1.360 | 1.965E-001 | 3.89 |
| ¹⁴⁰ La | 3 | 487.50 | 1299 | 209 | 1.624 | 3.607E-001 | 5.95 |
| ¹⁴⁰ La | 4 | 816.12 | 530 | 92 | 1.825 | 1.473E-001 | 4.39 |
| ¹⁴⁰ La | 5 | 925.55 | 132 | 106 | 1.600 | 3.669E-002 | 10.29 |
| ²⁴ Na | 6 | 1369.18 | 599 | 100 | 2.051 | 1.663E-001 | 4.24 |
| ⁴⁰ K | 7 | 1461.47 | 276 | 57 | 1.860 | 7.661E-002 | 6.52 |

D.2. *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | S2A |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁴² K | 8 | 1525.36 | 693 | 34 | 2.071 | 1.926E-001 | 3.83 |
| ¹⁴⁰ La | 9 | 1596.91 | 1269 | 34 | 2.099 | 3.526E-001 | 4.90 |
| ²⁴ Na | 10 | 2755.69 | 332 | 9 | 2.626 | 9.223E-002 | 9.72 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.12.: *Analysenblatt Gammaspektrometrie Standard NIST 1515, Apple Leaves, mit Quarzglas, Messung S2A*

| ANALYSENBLATT | | S3A |
|--------------------------|---------------------|-----|
| Acquisition Start Time: | 30.07.07 11:56:53 | |
| Live Time: | 3597 seconds | |
| Real Time: | 3600 seconds | |
| Peak Analysis Performed: | 30.07.2007 14:03:14 | |
| Analysis from channel: | 1 | |
| Analysis to channel: | 8192 | |

| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
|------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| - | 1 | 511.53 | 905 | 791 | 2.822 | 2.515E-001 | 16.69 |
| ⁸² Br | 2 | 554.79 | 1183 | 559 | 1.678 | 3.287E-001 | 7.78 |
| ⁷⁶ As | 3 | 559.62 | 265 | 598 | 1.681 | 7.375E-002 | 11.01 |
| ⁸² Br | 4 | 619.50 | 615 | 610 | 1.575 | 1.708E-001 | 4.70 |
| ⁸² Br | 5 | 698.73 | 363 | 443 | 1.566 | 1.008E-001 | 6.82 |
| ⁸² Br | 6 | 776.87 | 1070 | 539 | 1.725 | 2.972E-001 | 3.28 |
| ⁸² Br | 7 | 828.16 | 276 | 463 | 1.609 | 7.656E-002 | 8.49 |
| ⁸² Br | 8 | 1044.24 | 277 | 653 | 1.547 | 7.686E-002 | 27.73 |
| ⁶⁵ Zn | 9 | 1115.55 | 227 | 781 | 1.964 | 6.311E-002 | 11.46 |
| ⁸² Br | 10 | 1317.96 | 242 | 178 | 1.640 | 6.721E-002 | 24.17 |
| ²⁴ Na | 11 | 1369.10 | 14168 | 244 | 2.068 | 3.936E+000 | 0.80 |
| ⁴⁰ K | 12 | 1461.39 | 303 | 134 | 1.872 | 8.424E-002 | 6.60 |
| ⁸² Br | 13 | 1475.42 | 127 | 125 | 2.004 | 3.533E-002 | 33.41 |
| ⁴² K | 14 | 1525.36 | 310 | 150 | 1.979 | 8.604E-002 | 6.50 |
| ²⁴ Na | 15 | 1732.81 | 626 | 163 | 2.047 | 1.740E-001 | 4.37 |
| ²⁴ Na | 16 | 2244.27 | 1249 | 319 | 3.337 | 3.469E-001 | 7.61 |
| ²⁴ Na | 17 | 2755.70 | 8083 | 72 | 2.690 | 2.245E+000 | 1.58 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.13.: *Analysenblatt Gammaspektrometrie Standard NIST 1566b, Oyster Tissue, mit Quarzglas, Messung S3A*

| ANALYSENBLATT | | S4A |
|--------------------------|---------------------|-----|
| Acquisition Start Time: | 30.07.07 12:58:36 | |
| Live Time: | 3595 seconds | |
| Real Time: | 3600 seconds | |
| Peak Analysis Performed: | 30.07.2007 15:07:56 | |
| Analysis from channel: | 1 | |
| Analysis to channel: | 8192 | |

| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
|------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| - | 1 | 42.81 | 577 | 1037 | 1.019 | 1.603E-001 | 5.00 |
| - | 2 | 93.02 | 528 | 3708 | 1.098 | 1.466E-001 | 32.41 |
| ⁸² Br | 3 | 222.26 | 1316 | 5036 | 1.398 | 3.656E-001 | 4.14 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | S4A |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 4 | 274.33 | 243 | 2241 | 0.856 | 6.749E-002 | 52.82 |
| ⁸² Br | 5 | 554.79 | 23210 | 2424 | 1.644 | 6.447E+000 | 1.16 |
| ⁸² Br | 6 | 606.75 | 389 | 1719 | 1.460 | 1.080E-001 | 8.42 |
| ⁸² Br | 7 | 619.53 | 13155 | 1622 | 1.631 | 3.654E+000 | 0.84 |
| ⁸² Br | 8 | 698.75 | 7742 | 1128 | 1.689 | 2.151E+000 | 1.11 |
| ⁸² Br | 9 | 776.84 | 22007 | 1089 | 1.765 | 6.113E+000 | 1.10 |
| ⁸² Br | 10 | 828.12 | 6193 | 985 | 1.712 | 1.720E+000 | 2.89 |
| ⁸² Br | 11 | 1007.80 | 317 | 530 | 1.381 | 8.793E-002 | 22.87 |
| ⁸² Br | 12 | 1044.24 | 6122 | 590 | 1.873 | 1.700E+000 | 1.27 |
| ⁶⁰ Co | 13 | 1173.82 | 228 | 386 | 1.756 | 6.324E-002 | 9.47 |
| ⁸² Br | 14 | 1317.85 | 5390 | 254 | 2.020 | 1.497E+000 | 2.64 |
| ⁶⁰ Co | 15 | 1331.36 | 325 | 230 | 2.379 | 9.030E-002 | 6.32 |
| ²⁴ Na | 16 | 1369.15 | 590 | 140 | 2.063 | 1.638E-001 | 4.46 |
| - | 17 | 1396.09 | 97 | 103 | 1.884 | 2.704E-002 | 14.01 |
| - | 18 | 1461.44 | 360 | 117 | 1.959 | 9.990E-002 | 15.30 |
| ⁸² Br | 19 | 1475.47 | 2957 | 134 | 2.082 | 8.214E-001 | 2.94 |
| ⁴² K | 20 | 1525.37 | 975 | 101 | 2.135 | 2.707E-001 | 3.28 |
| ¹⁴⁰ La | 21 | 1596.99 | 95 | 84 | 1.838 | 2.634E-002 | 13.20 |
| - | 22 | 1605.11 | 106 | 74 | 1.841 | 2.953E-002 | 11.81 |
| - | 23 | 1650.99 | 99 | 64 | 1.888 | 2.762E-002 | 12.52 |
| - | 24 | 1872.73 | 167 | 29 | 2.220 | 4.651E-002 | 45.18 |
| - | 25 | 2095.41 | 131 | 20 | 2.385 | 3.636E-002 | 22.69 |
| ²⁴ Na | 26 | 2755.63 | 327 | 2 | 2.759 | 9.083E-002 | 11.32 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.14.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Standard NIST 1573a, Tomato Leaves, mit Quarzglas, Messung S4A

rotierende Aktivierung Holzproben

| ANALYSENBLATT | | | | | | | H1A |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 30.07.07 14:01:57 | | | | | |
| Live Time: | | 78116 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 78130 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 31.07.2007 12:51:25 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.50 | 1058 | 1937 | 0.832 | 1.354E-002 | 3.65 |
| - | 2 | 93.35 | 2623 | 8983 | 1.448 | 3.357E-002 | 2.90 |
| - | 3 | 186.52 | 1746 | 7957 | 1.361 | 2.235E-002 | 3.96 |
| ²¹² Pb | 4 | 239.38 | 701 | 6106 | 1.255 | 8.976E-003 | 8.11 |
| - | 5 | 511.63 | 3849 | 2925 | 2.461 | 4.926E-002 | 1.57 |
| ⁸² Br | 6 | 554.92 | 984 | 2300 | 2.042 | 1.259E-002 | 9.70 |
| - | 7 | 583.57 | 373 | 1906 | 1.576 | 4.769E-003 | 37.27 |
| - | 8 | 609.93 | 545 | 1781 | 1.574 | 6.972E-003 | 6.89 |
| ⁸² Br | 9 | 619.60 | 393 | 2114 | 1.694 | 5.030E-003 | 9.16 |
| ⁸² Br | 10 | 776.97 | 680 | 1392 | 1.864 | 8.699E-003 | 5.72 |
| ²²⁸ Ac | 11 | 911.60 | 573 | 1346 | 1.757 | 7.334E-003 | 22.05 |
| ²²⁸ Ac | 12 | 969.26 | 188 | 1109 | 1.310 | 2.406E-003 | 15.78 |
| ²¹⁴ Bi | 13 | 1120.76 | 356 | 1519 | 1.749 | 4.554E-003 | 9.72 |
| ⁶⁰ Co | 14 | 1173.61 | 259 | 1155 | 2.004 | 3.317E-003 | 12.21 |
| - | 15 | 1238.68 | 155 | 919 | 1.398 | 1.987E-003 | 17.58 |
| ⁸² Br | 16 | 1317.95 | 180 | 960 | 1.701 | 2.305E-003 | 13.85 |
| ⁶⁰ Co | 17 | 1333.18 | 218 | 539 | 1.934 | 2.789E-003 | 11.77 |
| ²⁴ Na | 18 | 1369.20 | 8199 | 777 | 2.065 | 1.049E-001 | 1.11 |
| - | 19 | 1408.77 | 117 | 371 | 1.565 | 1.496E-003 | 17.53 |
| ⁴⁰ K | 20 | 1461.51 | 7366 | 588 | 2.129 | 9.427E-002 | 2.27 |
| ⁴² K | 21 | 1525.42 | 2000 | 328 | 2.111 | 2.559E-002 | 5.59 |
| - | 22 | 1588.94 | 50 | 361 | 0.680 | 6.348E-004 | 61.41 |
| ²⁴ Na | 23 | 1732.43 | 465 | 379 | 3.211 | 5.945E-003 | 5.53 |
| - | 24 | 1765.54 | 702 | 363 | 2.200 | 8.986E-003 | 6.52 |
| - | 25 | 2205.53 | 243 | 306 | 2.716 | 3.107E-003 | 8.90 |
| ²⁴ Na | 26 | 2244.33 | 629 | 345 | 3.346 | 8.054E-003 | 4.65 |
| ²⁰⁸ Bi | 27 | 2616.28 | 1924 | 189 | 2.625 | 2.463E-002 | 4.59 |
| ²⁴ Na | 28 | 2755.84 | 4604 | 90 | 2.687 | 5.892E-002 | 2.13 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.15.: Analysenblatt Gammaspktrometrie *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 1 mit Quarzglas, Messung H1A

Aktivierung in Langsamer Rohrpost

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1A |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 01.08.07 10:43:02 | | | | | |
| Live Time: | | 091 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 300 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 01.08.2007 12:52:19 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 74.41 | 30989 | 305286 | 2.833 | 1.032E+002 | 16.00 |
| - | 2 | 510.63 | 75520 | 222416 | 3.141 | 2.516E+002 | 0.54 |
| - | 3 | 695.77 | 945 | 109726 | 0.920 | 3.150E+000 | 23.04 |
| ⁵⁶ Mn | 4 | 788.20 | 13202 | 69423 | 2.715 | 4.399E+001 | 1.64 |
| ⁵⁶ Mn | 5 | 846.20 | 4821399 | 324856 | 2.521 | 1.606E+004 | 0.04 |
| ²⁷ Mg | 6 | 1014.48 | 1712 | 46116 | 0.852 | 5.705E+000 | 2.63 |
| ⁵⁶ Mn | 7 | 1037.15 | 543 | 36219 | 0.682 | 1.810E+000 | 54.49 |
| ⁵⁶ Mn | 8 | 1090.29 | 12305 | 50992 | 2.888 | 4.100E+001 | 1.57 |
| - | 9 | 1118.49 | 678 | 40038 | 1.140 | 2.258E+000 | 19.24 |
| ⁵⁶ Mn | 10 | 1237.76 | 2905 | 37100 | 2.621 | 9.680E+000 | 5.41 |
| ⁴¹ Ar | 11 | 1293.15 | 156928 | 49764 | 3.031 | 5.228E+002 | 0.25 |
| ⁵⁶ Mn | 12 | 1298.97 | 26465 | 66744 | 3.034 | 8.817E+001 | 0.83 |
| ⁴² K | 13 | 1524.12 | 2748 | 46582 | 2.792 | 9.156E+000 | 7.36 |
| ⁵⁶ Mn | 14 | 1602.00 | 22493 | 55037 | 3.767 | 7.494E+001 | 1.01 |
| ³⁸ Cl | 15 | 1642.79 | 3793 | 30906 | 2.572 | 1.264E+001 | 4.57 |
| ⁵⁶ Mn (2x) | 16 | 1692.96 | 40010 | 74972 | 3.457 | 1.333E+002 | 2.29 |
| ⁵⁶ Mn | 17 | 1810.83 | 775788 | 59029 | 3.163 | 2.585E+003 | 0.11 |
| - | 18 | 2012.11 | 2405 | 14424 | 3.772 | 8.012E+000 | 4.47 |
| ⁵⁶ Mn | 19 | 2113.46 | 362146 | 23254 | 3.319 | 1.207E+003 | 0.16 |
| - | 20 | 2140.03 | 2226 | 10398 | 3.198 | 7.415E+000 | 19.03 |
| - | 21 | 2146.75 | 1694 | 11701 | 3.201 | 5.645E+000 | 18.21 |
| ³⁸ Cl | 22 | 2167.81 | 4639 | 14129 | 3.235 | 1.546E+001 | 2.23 |
| - | 23 | 2449.24 | 1430 | 6409 | 4.066 | 4.763E+000 | 5.45 |
| ⁵⁶ Mn | 24 | 2523.62 | 22036 | 6011 | 3.451 | 7.342E+001 | 0.72 |
| ⁵⁶ Mn | 25 | 2658.10 | 27680 | 6652 | 3.696 | 9.222E+001 | 1.71 |
| ²⁴ Na | 26 | 2754.69 | 1576 | 2988 | 3.773 | 5.250E+000 | 14.22 |
| - | 27 | 2859.46 | 917 | 2035 | 3.897 | 3.057E+000 | 20.75 |
| ⁵⁶ Mn | 28 | 2960.63 | 12228 | 3010 | 3.655 | 4.074E+001 | 2.52 |
| ⁴⁹ Ca | 29 | 3085.53 | 2394 | 4536 | 3.641 | 7.976E+000 | 2.49 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.16.: Analysenblatt Gammaspektrometrie *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1A, Aktivierung 6.3.1.1, Zählrate 120.000 cts/s beachten; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie, diese auf Boden des Tresors an Eisenziegel und linke Türe gerückt;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1B |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 01.08.07 10:49:37 | | | | | |
| Live Time: | | 1295 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 3600 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 01.08.2007 12:54:23 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 74.70 | 300339 | 3095864 | 2.570 | 8.343E+001 | 5.01 |

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1B |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 2 | 84.71 | 144577 | 3327699 | 2.650 | 4.016E+001 | 7.62 |
| - | 3 | 198.79 | 107463 | 5109774 | 1.767 | 2.985E+001 | 35.41 |
| - | 4 | 235.09 | 20855 | 4794888 | 2.099 | 5.793E+000 | 7.62 |
| - | 5 | 510.60 | 697363 | 2219738 | 3.550 | 1.937E+002 | 1.29 |
| - | 6 | 647.99 | 157727 | 2895568 | 4.544 | 4.381E+001 | 0.95 |
| ⁵⁶ Mn | 7 | 788.25 | 135013 | 757029 | 2.584 | 3.750E+001 | 0.51 |
| ⁵⁶ Mn | 8 | 846.30 | 50336280 | 2671025 | 2.495 | 1.398E+004 | 0.01 |
| - | 9 | 923.45 | 2268 | 337909 | 0.768 | 6.299E-001 | 40.65 |
| ⁵⁶ Mn | 10 | 1037.25 | 15114 | 501336 | 2.576 | 4.198E+000 | 14.95 |
| ⁵⁶ Mn | 11 | 1090.53 | 122724 | 484468 | 2.728 | 3.409E+001 | 0.49 |
| ⁵⁶ Mn | 12 | 1237.80 | 38500 | 412148 | 2.922 | 1.069E+001 | 1.31 |
| ⁴¹ Ar | 13 | 1293.22 | 1430103 | 480528 | 2.976 | 3.973E+002 | 0.08 |
| ⁵⁶ Mn | 14 | 1299.14 | 254175 | 618273 | 2.979 | 7.060E+001 | 0.27 |
| - | 15 | 1356.84 | 15303 | 425874 | 4.319 | 4.251E+000 | 3.49 |
| ²⁴ Na | 16 | 1368.33 | 19632 | 415253 | 2.659 | 5.453E+000 | 2.64 |
| - | 17 | 1500.30 | 12331 | 462644 | 3.092 | 3.425E+000 | 4.87 |
| ⁴² K | 18 | 1524.47 | 43907 | 562544 | 2.972 | 1.220E+001 | 1.42 |
| ⁵⁶ Mn | 19 | 1602.04 | 224064 | 542865 | 3.699 | 6.224E+001 | 0.32 |
| - | 20 | 1635.62 | 12807 | 426496 | 3.263 | 3.557E+000 | 9.09 |
| ³⁸ Cl | 21 | 1642.72 | 34213 | 567517 | 3.266 | 9.504E+000 | 7.37 |
| ⁵⁶ Mn (2x) | 22 | 1693.02 | 366883 | 391470 | 3.437 | 1.019E+002 | 0.77 |
| ⁵⁶ Mn | 23 | 1810.89 | 7994560 | 560583 | 3.125 | 2.221E+003 | 0.03 |
| - | 24 | 1916.92 | 1441 | 130777 | 0.769 | 4.003E-001 | 15.21 |
| - | 25 | 1937.90 | 7986 | 201784 | 2.817 | 2.218E+000 | 4.64 |
| - | 26 | 2012.21 | 26818 | 133578 | 3.833 | 7.450E+000 | 1.22 |
| ⁵⁶ Mn | 27 | 2113.52 | 3748937 | 200438 | 3.268 | 1.041E+003 | 0.05 |
| - | 28 | 2140.19 | 18863 | 109194 | 3.827 | 5.240E+000 | 1.47 |
| - | 29 | 2146.91 | 21601 | 124633 | 3.829 | 6.000E+000 | 1.28 |
| ³⁸ Cl | 30 | 2167.85 | 35530 | 81445 | 3.389 | 9.869E+000 | 3.39 |
| - | 31 | 2348.08 | 4487 | 55912 | 2.824 | 1.246E+000 | 5.01 |
| - | 32 | 2449.44 | 15868 | 59774 | 4.306 | 4.408E+000 | 6.61 |
| ⁵⁶ Mn | 33 | 2523.70 | 234874 | 48163 | 3.466 | 6.524E+001 | 0.22 |
| ⁵⁶ Mn | 34 | 2599.07 | 5317 | 30465 | 3.976 | 1.477E+000 | 3.03 |
| ⁵⁶ Mn | 35 | 2658.16 | 276061 | 52242 | 3.643 | 7.668E+001 | 0.50 |
| ²⁴ Na | 36 | 2755.02 | 14989 | 26956 | 3.597 | 4.164E+000 | 4.12 |
| - | 37 | 2859.60 | 9275 | 16516 | 4.307 | 2.576E+000 | 1.57 |
| ⁵⁶ Mn | 38 | 2960.72 | 121068 | 23685 | 3.762 | 3.363E+001 | 0.77 |
| ⁴⁹ Ca | 39 | 3085.49 | 4574 | 11852 | 3.551 | 1.270E+000 | 8.05 |
| - | 40 | 3104.81 | 2473 | 12742 | 3.434 | 6.870E-001 | 15.25 |
| - | 41 | 3162.59 | 2926 | 3246 | 0.933 | 8.129E-001 | 0.51 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.17.: Analysenblatt Gammaskpektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1B, Aktivierung 6.3.1.1, Zählrate 120.000 cts/s beachten; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie, diese auf Boden des Tresors an Eisenziegel und linke Türe gerückt;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1C |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 01.08.07 11:50:31 | | | |
| Live Time: | | | | 62244 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 71851 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 02.08.2007 08:52:21 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 73.17 | 434279 | 9837402 | 1.749 | 6.044E+000 | 1.87 |
| - | 2 | 75.32 | 902226 | 12730305 | 1.753 | 1.256E+001 | 1.31 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1C |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 3 | 85.11 | 541046 | 10716497 | 1.875 | 7.530E+000 | 2.36 |
| - | 4 | 87.53 | 208342 | 15482141 | 1.880 | 2.900E+000 | 2.17 |
| - | 5 | 198.69 | 460695 | 15499918 | 4.184 | 6.412E+000 | 1.16 |
| - | 6 | 303.51 | 63857 | 9766580 | 2.562 | 8.887E-001 | 3.61 |
| ⁴² K | 7 | 313.99 | 41873 | 5818222 | 2.745 | 5.828E-001 | 5.02 |
| ¹⁹⁸ Au | 8 | 410.24 | 9930 | 4534810 | 1.261 | 1.382E-001 | 14.44 |
| - | 9 | 511.12 | 2403859 | 6384206 | 3.289 | 3.346E+001 | 0.58 |
| ⁸² Br | 10 | 554.64 | 42194 | 5614268 | 1.696 | 5.872E-001 | 3.94 |
| ⁸² Br | 11 | 619.69 | 19413 | 6593612 | 0.552 | 2.702E-001 | 2.17 |
| - | 12 | 647.85 | 486390 | 8676324 | 4.791 | 6.769E+000 | 0.60 |
| ⁸² Br | 13 | 699.72 | 33943 | 4146830 | 3.039 | 4.724E-001 | 4.48 |
| ⁸² Br | 14 | 776.73 | 43597 | 1805490 | 1.846 | 6.068E-001 | 9.30 |
| ⁵⁶ Mn | 15 | 788.69 | 442892 | 1960774 | 2.349 | 6.164E+000 | 1.09 |
| ⁸² Br | 16 | 827.77 | 10813 | 1309679 | 1.911 | 1.505E-001 | 8.35 |
| ⁵⁶ Mn | 17 | 846.70 | 166097040 | 3937746 | 2.399 | 2.312E+003 | 0.01 |
| - | 18 | 875.05 | 7126 | 1187209 | 1.942 | 9.917E-002 | 10.26 |
| ⁵⁶ Mn | 19 | 1037.73 | 54446 | 1055068 | 2.219 | 7.578E-001 | 5.43 |
| ⁸² Br | 20 | 1044.29 | 13724 | 1282275 | 2.223 | 1.910E-001 | 6.99 |
| ⁵⁶ Mn | 21 | 1091.00 | 406401 | 1155762 | 2.478 | 5.656E+000 | 0.89 |
| ⁵⁶ Mn | 22 | 1238.29 | 121642 | 1117195 | 2.476 | 1.693E+000 | 2.75 |
| ⁴¹ Ar | 23 | 1293.53 | 2138459 | 1192145 | 2.832 | 2.976E+001 | 0.22 |
| ⁵⁶ Mn | 24 | 1299.76 | 733899 | 1332717 | 2.835 | 1.021E+001 | 0.26 |
| ⁸² Br | 25 | 1317.74 | 12914 | 936389 | 2.637 | 1.797E-001 | 25.80 |
| ²⁴ Na | 26 | 1369.03 | 321136 | 1324055 | 2.354 | 4.469E+000 | 1.10 |
| ⁸² Br | 27 | 1475.78 | 7355 | 1142026 | 2.161 | 1.024E-001 | 12.15 |
| - | 28 | 1501.17 | 41608 | 1415474 | 2.480 | 5.791E-001 | 2.30 |
| ⁴² K | 29 | 1525.28 | 529283 | 1642326 | 2.413 | 7.366E+000 | 0.75 |
| - | 30 | 1583.98 | 91601 | 1950537 | 6.442 | 1.275E+000 | 1.32 |
| ⁵⁶ Mn | 31 | 1602.47 | 728828 | 1560263 | 3.426 | 1.014E+001 | 0.17 |
| - | 32 | 1635.85 | 36936 | 1079247 | 2.729 | 5.141E-001 | 2.32 |
| ³⁸ Cl | 33 | 1642.77 | 15981 | 1308910 | 2.732 | 2.224E-001 | 4.88 |
| ⁵⁶ Mn (2x) | 34 | 1693.39 | 507182 | 984907 | 3.039 | 7.059E+000 | 0.74 |
| ²⁴ Na | 35 | 1732.65 | 15066 | 592527 | 2.419 | 2.097E-001 | 17.47 |
| ⁵⁶ Mn | 36 | 1811.32 | 25566486 | 1127141 | 2.821 | 3.558E+002 | 0.04 |
| - | 37 | 1884.29 | 25008 | 830854 | 5.034 | 3.481E-001 | 2.99 |
| - | 38 | 1938.51 | 23516 | 450469 | 3.196 | 3.273E-001 | 2.55 |
| - | 39 | 2012.68 | 87758 | 280621 | 3.663 | 1.221E+000 | 2.48 |
| ⁵⁶ Mn | 40 | 2113.95 | 11928312 | 314945 | 2.954 | 1.660E+002 | 0.05 |
| - | 41 | 2140.54 | 13112 | 188246 | 3.575 | 1.825E-001 | 2.57 |
| - | 42 | 2147.37 | 65742 | 205029 | 3.578 | 9.150E-001 | 0.63 |
| ³⁸ Cl | 43 | 2168.07 | 16994 | 158346 | 3.035 | 2.365E-001 | 9.27 |
| ²⁴ Na | 44 | 2244.29 | 26693 | 155928 | 3.532 | 3.715E-001 | 1.36 |
| - | 45 | 2348.64 | 15697 | 145623 | 3.299 | 2.185E-001 | 8.44 |
| - | 46 | 2449.93 | 42089 | 118129 | 3.916 | 5.858E-001 | 0.81 |
| ⁵⁶ Mn | 47 | 2524.14 | 741253 | 86642 | 3.094 | 1.032E+001 | 0.25 |
| ⁵⁶ Mn | 48 | 2599.75 | 13907 | 52637 | 3.075 | 1.936E-001 | 1.60 |
| ²⁰⁸ Bi | 49 | 2616.35 | 2114 | 38954 | 3.836 | 2.942E-002 | 9.00 |
| ⁵⁶ Mn | 50 | 2658.70 | 676718 | 79762 | 3.219 | 9.418E+000 | 0.28 |
| ²⁴ Na | 51 | 2755.72 | 177609 | 42013 | 2.948 | 2.472E+000 | 0.59 |
| - | 52 | 2860.05 | 28165 | 23522 | 3.966 | 3.920E-001 | 2.37 |
| ⁵⁶ Mn | 53 | 2961.25 | 292105 | 31063 | 3.348 | 4.065E+000 | 0.42 |
| - | 54 | 3104.86 | 2086 | 17848 | 3.459 | 2.904E-002 | 97.99 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.18.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1C, Aktivierung 6.3.1.1, Zählrate von 90.000 cts/s zu Beginn der Messung beachten; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie, diese auf Boden des Tresors an Eisenziegel und linke Tür gerückt;

D.2. *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| A N A L Y S E N B L A T T | | | | | | | LH1D |
|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 02.08.07 08:40:41 | | | | | |
| Live Time: | | 81890 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 82161 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 03.08.2007 08:33:20 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 75.84 | 2947 | 114563 | 0.914 | 3.587E-002 | 8.68 |
| - | 2 | 93.06 | 4564 | 189414 | 1.277 | 5.556E-002 | 6.24 |
| ⁸² Br | 3 | 222.19 | 8345 | 222458 | 1.543 | 1.016E-001 | 3.69 |
| ⁸² Br | 4 | 274.22 | 1866 | 92267 | 1.129 | 2.271E-002 | 12.43 |
| ⁴² K | 5 | 313.41 | 31620 | 128094 | 1.505 | 3.849E-001 | 3.50 |
| ¹⁹⁸ Au | 6 | 412.42 | 2232 | 100761 | 1.056 | 2.717E-002 | 30.78 |
| ^{69m} Zn | 7 | 439.16 | 25102 | 96317 | 1.555 | 3.055E-001 | 1.03 |
| ¹⁸⁷ W | 8 | 479.92 | 1192 | 100127 | 1.010 | 1.451E-002 | 16.62 |
| - | 9 | 503.20 | 3263 | 87381 | 1.328 | 3.971E-002 | 6.60 |
| - | 10 | 511.44 | 245574 | 124062 | 2.868 | 2.989E+000 | 0.87 |
| ⁸² Br | 11 | 554.79 | 130856 | 109620 | 1.617 | 1.593E+000 | 0.31 |
| ⁷⁶ As | 12 | 559.45 | 1865 | 109816 | 1.621 | 2.270E-002 | 11.17 |
| ¹²² Sb | 13 | 564.50 | 13789 | 109938 | 1.625 | 1.678E-001 | 1.73 |
| ⁸² Br | 14 | 606.74 | 1260 | 83859 | 1.073 | 1.533E-002 | 53.34 |
| ⁸² Br | 15 | 619.48 | 73840 | 150838 | 1.701 | 8.987E-001 | 1.67 |
| ¹⁸⁷ W | 16 | 686.29 | 1925 | 71424 | 1.593 | 2.342E-002 | 10.11 |
| ⁸² Br | 17 | 698.73 | 42628 | 79833 | 1.740 | 5.188E-001 | 0.63 |
| ⁸² Br | 18 | 776.83 | 119885 | 58030 | 1.754 | 1.459E+000 | 0.30 |
| ⁵⁶ Mn | 19 | 788.99 | 5776 | 51033 | 1.824 | 7.030E-002 | 2.94 |
| ⁸² Br | 20 | 828.10 | 33392 | 49863 | 1.802 | 4.064E-001 | 2.08 |
| ⁵⁶ Mn | 21 | 847.03 | 2178845 | 51709 | 1.829 | 2.652E+001 | 0.09 |
| (⁴² K) | 22 | 899.73 | 2641 | 45129 | 1.711 | 3.214E-002 | 20.25 |
| ⁸² Br | 23 | 1007.68 | 1788 | 49100 | 2.597 | 2.177E-002 | 8.68 |
| - | 24 | 1013.93 | 6555 | 63817 | 2.601 | 7.978E-002 | 2.67 |
| - | 25 | 1022.89 | 1341 | 57725 | 2.605 | 1.632E-002 | 11.75 |
| ⁸² Br | 26 | 1044.26 | 32642 | 42639 | 1.876 | 3.973E-001 | 0.72 |
| ⁵⁶ Mn | 27 | 1091.31 | 5149 | 44236 | 1.973 | 6.267E-002 | 3.49 |
| - | 28 | 1115.81 | 1854 | 49672 | 1.501 | 2.256E-002 | 30.21 |
| ⁶⁰ Co | 29 | 1173.72 | 1754 | 43712 | 1.998 | 2.134E-002 | 39.78 |
| ⁵⁶ Mn | 30 | 1238.35 | 1306 | 27663 | 1.456 | 1.590E-002 | 11.91 |
| ⁵⁶ Mn | 31 | 1300.20 | 10253 | 58629 | 2.949 | 1.248E-001 | 1.95 |
| ⁸² Br | 32 | 1317.90 | 27700 | 39872 | 2.039 | 3.371E-001 | 0.80 |
| - | 33 | 1346.39 | 1724 | 31624 | 2.229 | 2.098E-002 | 34.37 |
| ²⁴ Na | 34 | 1369.08 | 503735 | 36450 | 2.093 | 6.131E+000 | 0.24 |
| ⁴⁰ K | 35 | 1461.42 | 6943 | 24831 | 2.131 | 8.451E-002 | 6.72 |
| ⁸² Br | 36 | 1475.45 | 15583 | 25846 | 2.097 | 1.897E-001 | 4.35 |
| ⁴² K | 37 | 1525.34 | 630846 | 28793 | 2.169 | 7.678E+000 | 0.21 |
| ⁵⁶ Mn | 38 | 1602.88 | 9135 | 22202 | 3.239 | 1.112E-001 | 1.62 |
| ²⁴ Na | 39 | 1732.73 | 23098 | 15288 | 2.373 | 2.811E-001 | 0.77 |
| ²¹⁴ Bi | 40 | 1765.52 | 659 | 12910 | 1.388 | 8.016E-003 | 34.40 |
| ⁵⁶ Mn | 41 | 1811.63 | 323234 | 17772 | 2.309 | 3.934E+000 | 0.31 |
| - | 42 | 1872.73 | 881 | 17283 | 2.497 | 1.072E-002 | 12.09 |
| ⁴² K | 43 | 1923.15 | 1138 | 12417 | 2.546 | 1.385E-002 | 8.58 |
| - | 44 | 2012.87 | 851 | 10467 | 2.715 | 1.035E-002 | 10.49 |
| - | 45 | 2094.93 | 400 | 6675 | 1.905 | 4.868E-003 | 19.19 |
| ⁵⁶ Mn | 46 | 2114.25 | 151882 | 11477 | 2.446 | 1.849E+000 | 0.48 |
| ²⁴ Na | 47 | 2244.26 | 41841 | 13107 | 3.423 | 5.093E-001 | 1.39 |
| ⁵⁶ Mn | 48 | 2524.47 | 8932 | 14670 | 2.571 | 1.087E-001 | 1.55 |
| ²⁰⁸ Bi | 49 | 2616.25 | 1825 | 7229 | 2.367 | 2.221E-002 | 13.62 |
| ⁵⁶ Mn | 50 | 2659.12 | 9804 | 3413 | 2.666 | 1.193E-001 | 1.12 |
| ²⁴ Na | 51 | 2755.71 | 277927 | 2055 | 2.690 | 3.383E+000 | 0.27 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1D |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 52 | 2860.67 | 327 | 660 | 2.460 | 3.981E-003 | 33.26 |
| ⁵⁶ Mn | 53 | 2961.62 | 4091 | 699 | 2.672 | 4.979E-002 | 3.63 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.19.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1D, Aktivierung 6.3.1.1, Zählrate zu Beginn der Messung: 1.400 cts/s; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1E |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 03.08.07 07:31:09 | | | |
| Live Time: | | | | 5994 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 6000 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 03.08.2007 10:16:48 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.49 | 536 | 1040 | 0.834 | 8.937E-002 | 5.47 |
| ⁸² Br | 2 | 222.26 | 525 | 3903 | 1.357 | 8.752E-002 | 8.86 |
| ⁴² K | 3 | 313.49 | 990 | 3087 | 1.305 | 1.649E-001 | 4.53 |
| ^{69m} Zn | 4 | 439.17 | 960 | 2102 | 1.603 | 1.600E-001 | 1208.1 |
| - | 5 | 511.52 | 8546 | 2180 | 2.858 | 1.424E+000 | 3.70 |
| ⁸² Br | 6 | 554.85 | 7339 | 1703 | 1.644 | 1.223E+000 | 2.92 |
| ¹²² Sb | 7 | 564.59 | 755 | 1720 | 1.466 | 1.258E-001 | 5.10 |
| ⁸² Br | 8 | 619.56 | 4154 | 1559 | 1.648 | 6.924E-001 | 4.19 |
| ⁸² Br | 9 | 698.83 | 2299 | 1504 | 1.677 | 3.831E-001 | 2.26 |
| ⁸² Br | 10 | 776.91 | 6877 | 1326 | 1.761 | 1.146E+000 | 0.98 |
| ⁸² Br | 11 | 828.20 | 1872 | 1251 | 1.846 | 3.120E-001 | 7.49 |
| ⁵⁶ Mn | 12 | 847.21 | 1773 | 1068 | 2.026 | 2.955E-001 | 2.59 |
| ⁸² Br | 13 | 1044.29 | 1822 | 1416 | 1.828 | 3.036E-001 | 2.74 |
| ⁸² Br | 14 | 1318.01 | 1626 | 1100 | 1.997 | 2.710E-001 | 2.87 |
| ²⁴ Na | 15 | 1369.21 | 20002 | 871 | 2.064 | 3.334E+000 | 1.17 |
| ⁴⁰ K | 16 | 1461.47 | 504 | 378 | 2.033 | 8.403E-002 | 14.73 |
| ⁸² Br | 17 | 1475.64 | 877 | 353 | 2.055 | 1.461E-001 | 3.74 |
| ⁴² K | 18 | 1525.49 | 21542 | 308 | 2.147 | 3.590E+000 | 0.95 |
| ²⁴ Na | 19 | 1732.96 | 891 | 215 | 2.401 | 1.484E-001 | 9.08 |
| ⁵⁶ Mn | 20 | 1812.06 | 294 | 261 | 2.305 | 4.903E-002 | 22.49 |
| ⁵⁶ Mn | 21 | 2114.36 | 109 | 252 | 1.756 | 1.822E-002 | 15.43 |
| ²⁴ Na | 22 | 2244.44 | 1674 | 420 | 3.474 | 2.790E-001 | 6.77 |
| ²⁴ Na | 23 | 2755.92 | 11113 | 89 | 2.687 | 1.852E+000 | 1.47 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.20.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1E, Aktivierung 6.3.1.1; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENB L A T T | | | | | | | LH1F |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 03.08.07 13:56:09 | | | | | |
| Live Time: | | 208951 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 209043 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 06.08.2007 08:40:32 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.37 | 6360 | 12097 | 0.685 | 3.043E-002 | 1.68 |
| - | 2 | 64.16 | 1906 | 47848 | 0.978 | 9.116E-003 | 34.37 |
| - | 3 | 73.13 | 998 | 42553 | 0.874 | 4.775E-003 | 13.55 |
| - | 4 | 75.69 | 1708 | 47861 | 0.879 | 8.171E-003 | 8.79 |
| ⁸² Br | 5 | 93.19 | 9854 | 70018 | 1.468 | 4.714E-002 | 8.88 |
| ⁴⁷ Sc | 6 | 160.23 | 3015 | 62167 | 1.407 | 1.443E-002 | 5.62 |
| ²²⁶ Ra | 7 | 186.58 | 4454 | 61284 | 1.299 | 2.131E-002 | 3.87 |
| ⁸² Br | 8 | 222.24 | 8353 | 68809 | 1.509 | 3.996E-002 | 8.73 |
| ²¹² Pb | 9 | 239.32 | 2031 | 49543 | 1.443 | 9.716E-003 | 7.60 |
| ⁸² Br | 10 | 274.35 | 2373 | 45236 | 1.327 | 1.135E-002 | 5.94 |
| ⁴² K | 11 | 313.48 | 8366 | 44367 | 1.464 | 4.002E-002 | 7.59 |
| - | 12 | 337.00 | 3921 | 44828 | 1.623 | 1.876E-002 | 15.18 |
| - | 13 | 352.62 | 1143 | 28322 | 1.072 | 5.469E-003 | 10.52 |
| - | 14 | 356.57 | 638 | 25429 | 1.076 | 3.052E-003 | 17.52 |
| ¹⁹⁸ Au | 15 | 412.42 | 3721 | 32810 | 1.475 | 1.780E-002 | 14.01 |
| ^{69m} Zn | 16 | 439.26 | 7994 | 27850 | 1.607 | 3.824E-002 | 1.72 |
| ¹⁸⁷ W | 17 | 480.03 | 1124 | 28500 | 1.734 | 5.379E-003 | 38.29 |
| - | 18 | 511.64 | 73051 | 29783 | 2.513 | 3.495E-001 | 0.35 |
| - | 19 | 528.48 | 1561 | 22272 | 1.601 | 7.467E-003 | 6.91 |
| ⁸² Br | 20 | 554.88 | 136829 | 20850 | 1.644 | 6.546E-001 | 0.57 |
| ⁷⁶ As | 21 | 559.72 | 1835 | 20514 | 1.647 | 8.777E-003 | 6.11 |
| ¹²² Sb | 22 | 564.60 | 20997 | 20397 | 1.651 | 1.004E-001 | 1.00 |
| ²⁰⁸ Tl | 23 | 583.72 | 1027 | 18946 | 1.519 | 4.912E-003 | 9.97 |
| ⁸² Br | 24 | 606.77 | 1270 | 17810 | 1.439 | 6.074E-003 | 7.74 |
| ²¹⁴ Bi | 25 | 609.90 | 1331 | 18065 | 1.441 | 6.365E-003 | 7.28 |
| ⁸² Br | 26 | 619.60 | 77156 | 21025 | 1.651 | 3.691E-001 | 0.36 |
| ^{110m} Ag | 27 | 658.18 | 2993 | 14440 | 1.617 | 1.432E-002 | 3.39 |
| ¹³⁷ Cs | 28 | 662.23 | 897 | 16022 | 1.620 | 4.291E-003 | 9.60 |
| ¹⁸⁷ W | 29 | 686.32 | 1356 | 12632 | 1.731 | 6.489E-003 | 7.19 |
| ¹²² Sb | 30 | 693.43 | 1086 | 14482 | 1.735 | 5.193E-003 | 8.60 |
| ⁸² Br | 31 | 698.83 | 45314 | 14293 | 1.739 | 2.168E-001 | 1.64 |
| ⁸² Br | 32 | 776.96 | 126652 | 17461 | 1.727 | 6.059E-001 | 0.28 |
| ⁸² Br | 33 | 828.22 | 35303 | 14920 | 1.788 | 1.689E-001 | 1.78 |
| ⁵⁶ Mn | 34 | 847.29 | 1168 | 14358 | 1.514 | 5.589E-003 | 29.64 |
| ^{110m} Ag | 35 | 885.13 | 1967 | 13951 | 1.829 | 9.410E-003 | 23.04 |
| ²²⁸ Ac | 36 | 911.46 | 1105 | 16183 | 1.907 | 5.287E-003 | 34.06 |
| ^{110m} Ag | 37 | 937.96 | 941 | 11133 | 2.013 | 4.502E-003 | 9.70 |
| ⁸² Br | 38 | 1008.07 | 1522 | 16054 | 2.044 | 7.280E-003 | 6.22 |
| - | 39 | 1014.06 | 1487 | 15894 | 2.047 | 7.111E-003 | 6.34 |
| ⁸² Br | 40 | 1044.37 | 34168 | 15994 | 1.915 | 1.634E-001 | 0.59 |
| ⁸⁶ Rb | 41 | 1076.97 | 1344 | 14733 | 1.596 | 6.431E-003 | 7.55 |
| ⁶⁵ Zn | 42 | 1115.99 | 4807 | 15186 | 1.833 | 2.299E-002 | 2.51 |
| ²¹⁴ Bi | 43 | 1120.87 | 940 | 17241 | 1.835 | 4.495E-003 | 10.08 |
| ⁶⁰ Co | 44 | 1173.79 | 2212 | 14794 | 1.923 | 1.058E-002 | 18.08 |
| - | 45 | 1253.38 | 990 | 11725 | 3.002 | 4.738E-003 | 9.84 |
| ⁴⁷ Ca | 46 | 1297.56 | 1234 | 10708 | 2.167 | 5.905E-003 | 7.53 |
| ⁸² Br | 47 | 1318.06 | 29920 | 9862 | 2.063 | 1.431E-001 | 0.62 |
| ⁶⁰ Co | 48 | 1332.19 | 2360 | 9190 | 3.118 | 1.129E-002 | 3.73 |
| ²⁴ Na | 49 | 1369.25 | 185973 | 8459 | 2.087 | 8.896E-001 | 0.37 |
| - | 50 | 1396.13 | 461 | 4607 | 1.854 | 2.205E-003 | 13.01 |
| ⁴⁰ K | 51 | 1461.59 | 19345 | 4046 | 2.120 | 9.254E-002 | 1.74 |
| ⁸² Br | 52 | 1475.65 | 16473 | 4088 | 2.158 | 7.880E-002 | 1.91 |
| ⁴² K | 53 | 1525.51 | 162574 | 3778 | 2.166 | 7.777E-001 | 0.36 |
| - | 54 | 1589.21 | 275 | 2007 | 1.643 | 1.314E-003 | 39.94 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1F |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ¹⁴⁰ La | 55 | 1597.01 | 489 | 4655 | 1.647 | 2.338E-003 | 19.38 |
| - | 56 | 1605.65 | 444 | 4595 | 1.651 | 2.125E-003 | 18.63 |
| ⁸² Br | 57 | 1651.27 | 714 | 2971 | 2.464 | 3.415E-003 | 6.71 |
| ²⁴ Na | 58 | 1732.88 | 8719 | 3263 | 2.412 | 4.171E-002 | 2.84 |
| ²¹⁴ Bi | 59 | 1765.63 | 1874 | 2433 | 2.241 | 8.964E-003 | 3.22 |
| - | 60 | 1821.63 | 492 | 2802 | 2.474 | 2.351E-003 | 50.16 |
| - | 61 | 1872.93 | 716 | 3288 | 2.046 | 3.426E-003 | 7.00 |
| - | 62 | 2095.47 | 440 | 2670 | 2.088 | 2.105E-003 | 10.74 |
| - | 63 | 2105.03 | 444 | 2647 | 2.092 | 2.125E-003 | 10.66 |
| ²¹⁴ Bi | 64 | 2205.65 | 676 | 4085 | 2.590 | 3.236E-003 | 8.05 |
| ²⁴ Na | 65 | 2244.51 | 15334 | 4571 | 3.404 | 7.335E-002 | 2.25 |
| ²⁰⁸ Tl | 66 | 2616.45 | 4822 | 2601 | 2.593 | 2.307E-002 | 1.68 |
| ²⁴ Na | 67 | 2755.96 | 102368 | 796 | 2.698 | 4.897E-001 | 0.47 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.21.: Analysenblatt Gammaspektrometrie *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1F, Aktivierung 6.3.1.1; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1G |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 06.08.07 07:31:00 | | | |
| Live Time: | | | | 88031 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 88050 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 07.08.2007 09:09:13 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 75.82 | 1212 | 12017 | 1.011 | 1.377E-002 | 49.89 |
| - | 2 | 93.27 | 2797 | 13860 | 1.300 | 3.176E-002 | 3.15 |
| ⁴⁷ Sc | 3 | 160.12 | 1535 | 12054 | 1.444 | 1.743E-002 | 5.45 |
| ²²⁶ Ra | 4 | 186.47 | 2062 | 15308 | 1.411 | 2.342E-002 | 18.12 |
| ⁸² Br | 5 | 222.17 | 1159 | 11827 | 1.371 | 1.317E-002 | 6.44 |
| ²¹² Pb | 6 | 239.38 | 616 | 10232 | 1.269 | 6.998E-003 | 46.60 |
| ¹¹⁵ Cd | 7 | 336.93 | 996 | 7443 | 1.935 | 1.131E-002 | 30.14 |
| - | 8 | 352.60 | 688 | 4996 | 1.398 | 7.813E-003 | 8.18 |
| - | 9 | 356.64 | 357 | 6356 | 1.402 | 4.053E-003 | 14.77 |
| ¹⁹⁸ Au | 10 | 412.36 | 1083 | 5513 | 1.729 | 1.229E-002 | 128.39 |
| ^{69m} Zn | 11 | 439.39 | 207 | 2966 | 0.955 | 2.350E-003 | 21.72 |
| - | 12 | 511.49 | 4990 | 5206 | 2.866 | 5.667E-002 | 7.12 |
| ⁸² Br | 13 | 554.80 | 21062 | 4587 | 1.670 | 2.392E-001 | 1.46 |
| ¹²² Sb | 14 | 564.55 | 5199 | 4154 | 1.603 | 5.905E-002 | 1.54 |
| ²⁰⁸ Tl | 15 | 583.67 | 559 | 3085 | 1.581 | 6.350E-003 | 32.57 |
| ²¹⁴ Bi | 16 | 609.70 | 500 | 2992 | 1.216 | 5.674E-003 | 9.19 |
| ⁸² Br | 17 | 619.51 | 11732 | 3712 | 1.687 | 1.332E-001 | 2.53 |
| ^{110m} Ag | 18 | 658.09 | 1029 | 3328 | 1.504 | 1.168E-002 | 4.79 |
| ¹²² Sb | 19 | 693.02 | 265 | 2549 | 1.657 | 3.007E-003 | 14.20 |
| ⁸² Br | 20 | 698.76 | 7000 | 2654 | 1.661 | 7.950E-002 | 1.25 |
| ⁸² Br | 21 | 776.87 | 19650 | 2893 | 1.733 | 2.232E-001 | 0.70 |
| ⁸² Br | 22 | 828.13 | 5652 | 2583 | 1.860 | 6.419E-002 | 3.60 |
| ^{110m} Ag | 23 | 885.07 | 708 | 1531 | 1.703 | 8.042E-003 | 5.95 |
| ²²⁸ Ac | 24 | 911.47 | 553 | 1999 | 2.132 | 6.284E-003 | 15.81 |
| ^{110m} Ag | 25 | 938.01 | 294 | 1027 | 1.485 | 3.343E-003 | 11.98 |
| ⁸² Br | 26 | 1044.25 | 5340 | 1978 | 1.913 | 6.065E-002 | 3.69 |
| ⁸⁶ Rb | 27 | 1076.95 | 699 | 1652 | 1.661 | 7.943E-003 | 5.93 |
| ⁶⁵ Zn | 28 | 1115.79 | 2207 | 1701 | 1.971 | 2.507E-002 | 2.51 |
| ²¹⁴ Bi | 29 | 1120.66 | 522 | 1687 | 1.973 | 5.930E-003 | 6.91 |

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1G |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁶⁰ Co | 30 | 1173.69 | 682 | 1798 | 2.259 | 7.744E-003 | 24.69 |
| ⁴⁷ Ca | 31 | 1297.39 | 363 | 1441 | 1.892 | 4.121E-003 | 8.85 |
| ⁸² Br | 32 | 1317.92 | 4465 | 1067 | 2.078 | 5.071E-002 | 3.83 |
| ⁶⁰ Co | 33 | 1332.65 | 737 | 973 | 2.581 | 8.370E-003 | 17.18 |
| ²⁴ Na | 34 | 1369.12 | 6402 | 863 | 2.121 | 7.271E-002 | 2.61 |
| ⁴⁰ K | 35 | 1461.43 | 8337 | 676 | 2.146 | 9.468E-002 | 2.19 |
| ⁸² Br | 36 | 1475.53 | 2592 | 481 | 2.176 | 2.944E-002 | 4.73 |
| ⁴² K | 37 | 1525.37 | 3149 | 480 | 2.213 | 3.577E-002 | 4.05 |
| - | 38 | 1589.10 | 86 | 398 | 1.318 | 9.713E-004 | 39.51 |
| ²⁴ Na | 39 | 1731.91 | 477 | 354 | 3.989 | 5.413E-003 | 5.18 |
| ²¹⁴ Bi | 40 | 1765.47 | 769 | 288 | 2.031 | 8.734E-003 | 4.15 |
| - | 41 | 1848.53 | 80 | 269 | 1.152 | 9.134E-004 | 17.71 |
| - | 42 | 1872.72 | 135 | 216 | 2.140 | 1.531E-003 | 13.25 |
| ²¹⁴ Bi | 43 | 2205.55 | 305 | 298 | 2.675 | 3.468E-003 | 7.46 |
| ²⁴ Na | 44 | 2244.29 | 514 | 364 | 3.112 | 5.833E-003 | 16.20 |
| ²⁰⁸ Tl | 45 | 2616.28 | 2134 | 158 | 2.714 | 2.424E-002 | 4.45 |
| ²⁴ Na | 46 | 2755.78 | 3560 | 67 | 2.740 | 4.043E-002 | 2.75 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.22.: Analysenblatt Gammaskpektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1G, Aktivierung 6.3.1.1; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1H |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 07.08.07 08:00:27 | | | |
| Live Time: | | | | 107229 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 107251 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 08.08.2007 14:55:27 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.51 | 1592 | 3148 | 0.828 | 1.485E-002 | 2.95 |
| - | 2 | 63.97 | 1196 | 10090 | 1.264 | 1.115E-002 | 25.49 |
| - | 3 | 75.93 | 1251 | 11866 | 0.588 | 1.166E-002 | 44.88 |
| - | 4 | 93.33 | 3734 | 14613 | 1.361 | 3.482E-002 | 2.52 |
| ⁴⁷ Sc | 5 | 160.07 | 1925 | 17713 | 1.418 | 1.795E-002 | 4.70 |
| ²²⁶ Ra | 6 | 186.56 | 2480 | 15018 | 1.353 | 2.312E-002 | 3.57 |
| ⁸² Br | 7 | 222.28 | 969 | 11339 | 1.463 | 9.034E-003 | 7.69 |
| ²¹² Pb | 8 | 239.43 | 1105 | 12092 | 1.343 | 1.030E-002 | 25.85 |
| ¹¹⁵ Cd | 9 | 336.93 | 747 | 6498 | 1.731 | 6.967E-003 | 7.98 |
| ²¹⁴ Pb | 10 | 352.61 | 871 | 6294 | 1.446 | 8.118E-003 | 6.64 |
| - | 11 | 356.63 | 564 | 6526 | 1.449 | 5.255E-003 | 9.58 |
| ¹⁹⁸ Au | 12 | 412.42 | 886 | 5283 | 1.483 | 8.258E-003 | 24.41 |
| - | 13 | 511.50 | 4836 | 4949 | 2.914 | 4.509E-002 | 7.29 |
| ⁸² Br | 14 | 554.79 | 15159 | 4047 | 1.600 | 1.413E-001 | 0.81 |
| ¹²² Sb | 15 | 564.55 | 4842 | 3984 | 1.591 | 4.514E-002 | 1.60 |
| ²⁰⁸ Tl | 16 | 583.61 | 467 | 4071 | 1.525 | 4.354E-003 | 41.54 |
| ¹²⁴ Sb | 17 | 603.72 | 742 | 3377 | 2.012 | 6.923E-003 | 16.47 |
| ²¹⁴ Bi | 18 | 609.81 | 1128 | 4805 | 2.017 | 1.051E-002 | 14.49 |
| ⁸² Br | 19 | 619.50 | 8527 | 3169 | 1.654 | 7.951E-002 | 1.11 |
| ^{110m} Ag | 20 | 658.07 | 1348 | 3276 | 1.499 | 1.257E-002 | 13.19 |
| ⁸² Br | 21 | 698.76 | 4661 | 2802 | 1.618 | 4.346E-002 | 1.61 |
| ^{110m} Ag | 22 | 764.20 | 303 | 2651 | 1.432 | 2.827E-003 | 12.69 |
| ⁸² Br | 23 | 776.85 | 13794 | 2889 | 1.733 | 1.286E-001 | 0.85 |
| ¹⁴³ Cs | 24 | 796.14 | 327 | 2285 | 1.373 | 3.053E-003 | 11.52 |
| ⁸² Br | 25 | 828.13 | 3888 | 2580 | 1.776 | 3.626E-002 | 5.69 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1H |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 26 | 846.98 | 293 | 1735 | 1.583 | 2.735E-003 | 42.21 |
| ^{110m} Ag | 27 | 884.97 | 905 | 1777 | 1.757 | 8.437E-003 | 4.90 |
| ²²⁸ Ac | 28 | 911.66 | 624 | 2330 | 1.950 | 5.816E-003 | 6.47 |
| ^{110m} Ag | 29 | 937.83 | 490 | 1835 | 1.752 | 4.570E-003 | 27.55 |
| ²²⁸ Ac | 30 | 969.39 | 384 | 1566 | 1.681 | 3.581E-003 | 9.72 |
| - | 31 | 1001.43 | 283 | 1387 | 1.790 | 2.641E-003 | 44.69 |
| ⁸² Br | 32 | 1044.25 | 3910 | 2010 | 1.940 | 3.645E-002 | 4.81 |
| ⁸⁶ Rb | 33 | 1077.01 | 878 | 1258 | 1.876 | 8.183E-003 | 4.94 |
| ⁶⁵ Zn | 34 | 1115.85 | 2681 | 1755 | 2.020 | 2.500E-002 | 6.99 |
| ²¹⁴ Bi | 35 | 1120.62 | 670 | 1658 | 2.023 | 6.252E-003 | 8.69 |
| ⁶⁰ Co | 36 | 1173.68 | 663 | 1764 | 2.087 | 6.178E-003 | 5.87 |
| ²¹⁴ Bi | 37 | 1238.74 | 319 | 1277 | 2.119 | 2.974E-003 | 10.66 |
| ⁴⁷ Ca | 38 | 1297.47 | 306 | 878 | 1.786 | 2.852E-003 | 10.45 |
| ⁸² Br | 39 | 1317.89 | 3226 | 1191 | 2.030 | 3.008E-002 | 4.75 |
| ⁶⁰ Co | 40 | 1332.76 | 662 | 1042 | 2.586 | 6.171E-003 | 19.54 |
| ²⁴ Na | 41 | 1369.13 | 2373 | 813 | 2.132 | 2.213E-002 | 5.76 |
| ²¹⁴ Bi | 42 | 1378.36 | 251 | 832 | 2.136 | 2.339E-003 | 11.22 |
| ^{110m} Ag | 43 | 1384.88 | 290 | 822 | 2.139 | 2.706E-003 | 10.28 |
| ⁴⁰ K | 44 | 1461.46 | 10159 | 705 | 2.132 | 9.472E-002 | 1.79 |
| ⁸² Br | 45 | 1475.52 | 1899 | 486 | 2.197 | 1.770E-002 | 5.35 |
| ⁴² K | 46 | 1525.40 | 886 | 535 | 2.087 | 8.260E-003 | 10.10 |
| ¹²⁴ Sb | 47 | 1691.83 | 166 | 344 | 2.043 | 1.548E-003 | 11.92 |
| ²¹⁴ Bi | 48 | 1765.43 | 1036 | 288 | 2.331 | 9.658E-003 | 8.07 |
| - | 49 | 2104.71 | 313 | 322 | 3.267 | 2.916E-003 | 7.16 |
| ²¹⁴ Bi | 50 | 2205.45 | 352 | 266 | 2.305 | 3.283E-003 | 6.71 |
| - | 51 | 2449.01 | 95 | 165 | 1.951 | 8.858E-004 | 15.82 |
| ²⁰⁸ Tl | 52 | 2616.26 | 2542 | 155 | 2.619 | 2.370E-002 | 3.97 |
| ²⁴ Na | 53 | 2755.77 | 1297 | 69 | 2.723 | 1.210E-002 | 3.39 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.23.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1H, Aktivierung 6.3.1.1; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH1K |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 14.08.07 13:23:06 | | | | | |
| Live Time: | | 506423 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 506510 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 20.08.2007 11:09:45 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.33 | 3625 | 6877 | 0.627 | 7.157E-003 | 2.52 |
| - | 2 | 64.04 | 5597 | 36634 | 1.189 | 1.105E-002 | 2.47 |
| - | 3 | 73.43 | 2258 | 40140 | 1.321 | 4.459E-003 | 18.32 |
| - | 4 | 75.68 | 4961 | 50705 | 1.325 | 9.795E-003 | 14.84 |
| - | 5 | 85.25 | 863 | 41277 | 1.279 | 1.703E-003 | 34.38 |
| - | 6 | 93.32 | 15783 | 49076 | 1.324 | 3.116E-002 | 1.14 |
| - | 7 | 144.39 | 1986 | 52438 | 1.413 | 3.921E-003 | 42.08 |
| ⁴⁷ Sc | 8 | 160.14 | 3765 | 49819 | 1.343 | 7.434E-003 | 4.23 |
| ²²⁶ Ra | 9 | 186.48 | 10951 | 50624 | 1.342 | 2.162E-002 | 1.54 |
| ²¹² Pb | 10 | 239.30 | 4035 | 24984 | 1.262 | 7.966E-003 | 3.30 |
| ²¹⁴ Pb | 11 | 295.87 | 2631 | 27987 | 1.506 | 5.195E-003 | 22.64 |
| ²¹⁴ Pb | 12 | 352.49 | 5041 | 19783 | 1.501 | 9.953E-003 | 8.25 |
| - | 13 | 356.52 | 2319 | 20767 | 1.504 | 4.578E-003 | 9.08 |
| - | 14 | 511.41 | 20329 | 16241 | 2.913 | 4.014E-002 | 2.99 |

D.2. *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH1K |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁸² Br | 15 | 554.78 | 1040 | 9336 | 1.413 | 2.054E-003 | 7.56 |
| ¹²² Sb | 16 | 564.28 | 2407 | 13796 | 1.604 | 4.751E-003 | 12.95 |
| ²⁰⁸ Tl | 17 | 583.63 | 2781 | 13581 | 1.655 | 5.490E-003 | 11.75 |
| ¹²⁴ Sb | 18 | 603.46 | 3158 | 12287 | 1.852 | 6.235E-003 | 7.07 |
| ²¹⁴ Bi | 19 | 609.68 | 5442 | 12072 | 1.857 | 1.074E-002 | 6.58 |
| ^{110m} Ag | 20 | 658.10 | 7168 | 9638 | 1.656 | 1.415E-002 | 5.35 |
| ¹³⁷ Cs | 21 | 661.97 | 1237 | 10380 | 1.659 | 2.442E-003 | 7.83 |
| ^{110m} Ag | 22 | 678.09 | 588 | 6201 | 1.440 | 1.162E-003 | 12.12 |
| ^{110m} Ag | 23 | 707.07 | 1326 | 8435 | 1.584 | 2.618E-003 | 27.38 |
| ²¹² Bi | 24 | 727.52 | 607 | 9368 | 1.512 | 1.199E-003 | 11.75 |
| ^{110m} Ag | 25 | 764.27 | 1108 | 11344 | 1.610 | 2.187E-003 | 6.91 |
| ⁸² Br | 26 | 776.73 | 897 | 7122 | 1.436 | 1.771E-003 | 7.95 |
| ¹³⁴ Cs | 27 | 795.91 | 1641 | 7703 | 2.017 | 3.240E-003 | 4.67 |
| ^{110m} Ag | 28 | 818.23 | 390 | 6651 | 1.234 | 7.690E-004 | 51.98 |
| ⁵⁶ Mn | 29 | 847.12 | 1187 | 6068 | 1.668 | 2.343E-003 | 6.16 |
| ²⁰⁸ Tl | 30 | 860.83 | 361 | 5877 | 1.189 | 7.128E-004 | 17.35 |
| ^{110m} Ag | 31 | 884.89 | 4319 | 6792 | 1.737 | 8.528E-003 | 2.11 |
| ²²⁸ Ac | 32 | 911.41 | 3008 | 7474 | 1.892 | 5.939E-003 | 11.11 |
| ^{110m} Ag | 33 | 937.69 | 1450 | 6985 | 1.487 | 2.863E-003 | 5.10 |
| ²²⁸ Ac | 34 | 964.83 | 877 | 7284 | 1.907 | 1.732E-003 | 7.24 |
| ²²⁸ Ac | 35 | 969.19 | 1939 | 7287 | 1.910 | 3.828E-003 | 3.81 |
| ^{234m} Pa | 36 | 1001.32 | 1160 | 5010 | 1.984 | 2.289E-003 | 5.91 |
| ⁸⁶ Rb | 37 | 1077.01 | 3159 | 7563 | 1.989 | 6.238E-003 | 2.55 |
| ⁶⁵ Zn | 38 | 1115.78 | 11901 | 6163 | 1.946 | 2.350E-002 | 2.51 |
| ²¹⁴ Bi | 39 | 1120.57 | 3075 | 6029 | 1.948 | 6.071E-003 | 3.43 |
| ⁶⁰ Co | 40 | 1173.49 | 2728 | 6429 | 2.001 | 5.385E-003 | 11.04 |
| ²¹⁴ Bi | 41 | 1238.44 | 1735 | 5274 | 2.168 | 3.426E-003 | 1994.1 |
| ⁴⁷ Ca | 42 | 1297.48 | 421 | 3625 | 1.837 | 8.303E-004 | 12.92 |
| ⁶⁰ Co | 43 | 1332.84 | 2303 | 3948 | 1.992 | 4.546E-003 | 9.60 |
| ²¹⁴ Bi | 44 | 1378.24 | 1000 | 3149 | 2.141 | 1.974E-003 | 15.58 |
| ^{110m} Ag | 45 | 1384.92 | 1312 | 3129 | 2.144 | 2.590E-003 | 15.07 |
| - | 46 | 1401.84 | 387 | 2579 | 2.089 | 7.638E-004 | 16.12 |
| ²¹⁴ Bi | 47 | 1408.54 | 921 | 3170 | 2.092 | 1.819E-003 | 12.19 |
| ⁴⁰ K | 48 | 1461.35 | 46967 | 3132 | 2.128 | 9.273E-002 | 0.87 |
| ^{110m} Ag | 49 | 1505.59 | 332 | 1647 | 1.570 | 6.559E-004 | 11.18 |
| ²¹⁴ Bi | 50 | 1509.86 | 409 | 1576 | 1.572 | 8.079E-004 | 9.46 |
| ²²⁸ Ac | 51 | 1588.84 | 563 | 1727 | 1.918 | 1.112E-003 | 7.14 |
| - | 52 | 1593.32 | 681 | 1558 | 1.920 | 1.345E-003 | 6.03 |
| ²¹² Bi | 53 | 1621.46 | 389 | 1428 | 2.134 | 7.670E-004 | 9.25 |
| - | 54 | 1631.23 | 453 | 1391 | 2.138 | 8.949E-004 | 8.05 |
| ¹²⁴ Sb | 55 | 1691.77 | 582 | 1546 | 2.193 | 1.149E-003 | 12.50 |
| ²¹⁴ Bi | 56 | 1730.36 | 760 | 1341 | 2.247 | 1.500E-003 | 5.51 |
| ²¹⁴ Bi | 57 | 1765.33 | 4691 | 1349 | 2.273 | 9.261E-003 | 1.58 |
| ²¹⁴ Bi | 58 | 1848.37 | 593 | 1277 | 2.175 | 1.171E-003 | 6.40 |
| - | 59 | 2104.66 | 1580 | 1377 | 3.349 | 3.120E-003 | 3.04 |
| ²¹⁴ Bi | 60 | 2119.73 | 338 | 1215 | 1.903 | 6.665E-004 | 9.44 |
| ²¹⁴ Bi | 61 | 2205.24 | 1642 | 1115 | 2.341 | 3.243E-003 | 7.81 |
| ²¹⁴ Bi | 62 | 2449.02 | 453 | 643 | 2.312 | 8.942E-004 | 6.99 |
| ²⁰⁸ Tl | 63 | 2616.08 | 12063 | 415 | 2.691 | 2.382E-002 | 1.46 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.24.: Analysenblatt *Gamma*spektrometrie *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 20, Messung LH1K, Aktivierung 6.3.1.1; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

D. Gammaspektren

| A N A L Y S E N B L A T T | | | | | | | LH2A |
|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 03.08.07 10:42:34 | | | | | |
| Live Time: | | 267 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 300 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 03.08.2007 11:51:47 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.50 | 3321 | 6552 | 0.805 | 1.106E+001 | 2.04 |
| - | 2 | 511.33 | 9148 | 20611 | 2.802 | 3.047E+001 | 6.23 |
| ⁵⁶ Mn | 3 | 788.84 | 1330 | 7277 | 1.912 | 4.428E+000 | 19.26 |
| ⁵⁶ Mn | 4 | 846.91 | 552070 | 8103 | 1.988 | 1.839E+003 | 0.22 |
| ²⁷ Mg | 5 | 1014.40 | 1006 | 3188 | 1.936 | 3.351E+000 | 5.56 |
| ⁵⁶ Mn | 6 | 1091.17 | 1084 | 3939 | 1.828 | 3.611E+000 | 18.69 |
| ⁴¹ Ar | 7 | 1293.84 | 39275 | 3221 | 2.205 | 1.308E+002 | 1.00 |
| ⁵⁶ Mn | 8 | 1300.06 | 2047 | 3323 | 2.208 | 6.819E+000 | 3.11 |
| ²⁴ Na | 9 | 1368.86 | 485 | 3027 | 2.470 | 1.616E+000 | 10.18 |
| ⁵⁶ Mn | 10 | 1602.69 | 2384 | 4689 | 3.312 | 7.938E+000 | 11.10 |
| ³⁸ Cl | 11 | 1643.35 | 1233 | 4101 | 2.457 | 4.105E+000 | 15.66 |
| - | 12 | 1694.03 | 317 | 1899 | 1.733 | 1.056E+000 | 12.91 |
| ²⁸ Al | 13 | 1779.77 | 4662 | 2551 | 2.421 | 1.553E+001 | 4.81 |
| ⁵⁶ Mn | 14 | 1811.55 | 81701 | 2814 | 2.449 | 2.721E+002 | 0.59 |
| - | 15 | 2063.35 | 191 | 687 | 2.144 | 6.345E-001 | 10.06 |
| ⁵⁶ Mn | 16 | 2114.20 | 38539 | 740 | 2.591 | 1.284E+002 | 0.79 |
| ³⁸ Cl | 17 | 2168.53 | 1172 | 514 | 2.620 | 3.904E+000 | 9.73 |
| ⁵⁶ Mn | 18 | 2524.34 | 2420 | 273 | 2.778 | 8.060E+000 | 4.08 |
| - | 19 | 2574.65 | 389 | 184 | 3.189 | 1.296E+000 | 17.50 |
| ⁵⁶ Mn | 20 | 2659.11 | 2642 | 221 | 2.627 | 8.798E+000 | 4.19 |
| ²⁴ Na | 21 | 2755.47 | 169 | 183 | 2.851 | 5.630E-001 | 10.98 |
| ⁵⁶ Mn | 22 | 2961.55 | 1015 | 71 | 2.883 | 3.379E+000 | 6.47 |
| ⁴⁹ Ca | 23 | 3086.14 | 1747 | 43 | 3.059 | 5.818E+000 | 4.09 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.25.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 19, Messung LH2A, Aktivierung 6.3.1.2; Zählrate zu Beginn der Messung: 13.600 cts/s; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

| A N A L Y S E N B L A T T | | | | | | | LH2B |
|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 03.08.07 10:48:30 | | | | | |
| Live Time: | | 1076 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 1200 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 03.08.2007 12:12:19 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 511.27 | 20740 | 77354 | 2.960 | 1.728E+001 | 5.75 |
| ⁵⁶ Mn | 2 | 788.88 | 5112 | 25015 | 2.003 | 4.260E+000 | 12.36 |
| ⁵⁶ Mn | 3 | 846.92 | 2067358 | 29119 | 1.975 | 1.723E+003 | 0.11 |
| ²⁷ Mg | 4 | 1014.57 | 1591 | 11897 | 1.788 | 1.326E+000 | 5.92 |
| - | 5 | 1038.34 | 822 | 9739 | 1.874 | 6.848E-001 | 49.66 |
| ⁵⁶ Mn | 6 | 1091.16 | 4643 | 12582 | 2.115 | 3.869E+000 | 2.34 |
| ⁵⁶ Mn | 7 | 1238.35 | 1460 | 12806 | 2.000 | 1.216E+000 | 20.88 |
| ⁴¹ Ar | 8 | 1293.86 | 140459 | 11477 | 2.228 | 1.170E+002 | 0.47 |
| ⁵⁶ Mn | 9 | 1299.96 | 7741 | 11589 | 2.231 | 6.449E+000 | 1.58 |
| ²⁴ Na | 10 | 1369.15 | 1661 | 11978 | 1.870 | 1.384E+000 | 19.28 |
| ⁴² K | 11 | 1525.21 | 1579 | 20613 | 2.391 | 1.316E+000 | 25.42 |

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | LH2B |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁵⁶ Mn | 12 | 1602.66 | 8797 | 17290 | 3.206 | 7.330E+000 | 6.13 |
| ³⁸ Cl | 13 | 1643.31 | 3416 | 11674 | 2.275 | 2.846E+000 | 11.35 |
| - | 14 | 1693.74 | 1530 | 8188 | 2.431 | 1.275E+000 | 15.23 |
| ²⁸ Al | 15 | 1779.68 | 1036 | 7373 | 2.383 | 8.631E-001 | 13.74 |
| ⁵⁶ Mn | 16 | 1811.55 | 310797 | 10586 | 2.436 | 2.590E+002 | 0.30 |
| - | 17 | 2013.11 | 835 | 2943 | 2.930 | 6.956E-001 | 6.44 |
| ⁵⁶ Mn | 18 | 2114.19 | 145622 | 2569 | 2.562 | 1.213E+002 | 0.40 |
| - | 19 | 2147.78 | 680 | 1965 | 2.926 | 5.667E-001 | 6.45 |
| ³⁸ Cl | 20 | 2168.58 | 3630 | 1783 | 2.430 | 3.024E+000 | 4.80 |
| - | 21 | 2450.09 | 361 | 1176 | 2.647 | 3.007E-001 | 10.10 |
| ⁵⁶ Mn | 22 | 2524.41 | 9088 | 959 | 2.699 | 7.573E+000 | 2.13 |
| - | 23 | 2574.53 | 490 | 717 | 3.666 | 4.084E-001 | 21.94 |
| ⁵⁶ Mn | 24 | 2659.07 | 9818 | 652 | 2.769 | 8.180E+000 | 2.07 |
| ²⁴ Na | 25 | 2755.48 | 807 | 589 | 2.708 | 6.728E-001 | 11.60 |
| - | 26 | 2860.56 | 323 | 318 | 3.489 | 2.691E-001 | 25.54 |
| ⁵⁶ Mn | 27 | 2961.58 | 3925 | 258 | 2.852 | 3.270E+000 | 3.15 |
| ⁴⁹ Ca | 28 | 3086.12 | 2620 | 180 | 3.003 | 2.183E+000 | 2.00 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.26.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 19, Messung LH2B, Aktivierung 6.3.1.2; Zählrate zu Beginn der Messung: 12.800 cts/s; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | LH2C |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|--------------------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 03.08.07 11:09:31 | | | |
| Live Time: | | | | 6750 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 7300 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 03.08.2007 03.08.2007 14:16:12 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 73.29 | 5015 | 317916 | 1.252 | 6.870E-001 | 8.83 |
| - | 2 | 75.44 | 8326 | 451752 | 1.256 | 1.140E+000 | 8.76 |
| - | 3 | 511.33 | 50223 | 336608 | 2.910 | 6.880E+000 | 4.89 |
| ⁵⁶ Mn | 4 | 788.87 | 23298 | 101202 | 1.865 | 3.191E+000 | 1.12 |
| ⁵⁶ Mn | 5 | 846.93 | 9206111 | 110916 | 1.936 | 1.261E+003 | 0.05 |
| - | 6 | 1037.97 | 2587 | 44452 | 1.887 | 3.543E-001 | 6.99 |
| ⁵⁶ Mn | 7 | 1091.18 | 21426 | 52841 | 2.082 | 2.935E+000 | 1.04 |
| ⁵⁶ Mn | 8 | 1238.55 | 6276 | 44550 | 2.132 | 8.597E-001 | 2.87 |
| ⁴¹ Ar | 9 | 1293.87 | 447764 | 48839 | 2.179 | 6.133E+001 | 0.29 |
| ⁵⁶ Mn | 10 | 1300.00 | 35077 | 48837 | 2.182 | 4.805E+000 | 0.74 |
| ²⁴ Na | 11 | 1369.00 | 7346 | 50531 | 1.971 | 1.006E+000 | 2.66 |
| - | 12 | 1501.42 | 2439 | 57330 | 1.915 | 3.341E-001 | 32.56 |
| ⁴² K | 13 | 1525.25 | 7596 | 80521 | 2.148 | 1.040E+000 | 3.04 |
| ⁵⁶ Mn | 14 | 1602.70 | 38891 | 80885 | 3.195 | 5.327E+000 | 2.70 |
| - | 15 | 1636.00 | 2359 | 57840 | 2.266 | 3.231E-001 | 11.30 |
| ³⁸ Cl | 16 | 1643.32 | 7141 | 70397 | 2.269 | 9.781E-001 | 9.11 |
| - | 17 | 1693.79 | 4604 | 31940 | 2.345 | 6.306E-001 | 3.79 |
| ⁵⁶ Mn | 18 | 1811.57 | 1381878 | 45795 | 2.400 | 1.893E+002 | 0.14 |
| - | 19 | 1938.57 | 1348 | 20613 | 2.481 | 1.846E-001 | 9.70 |
| - | 20 | 2012.88 | 4915 | 13904 | 3.272 | 6.732E-001 | 9.65 |
| ⁵⁶ Mn | 21 | 2114.21 | 648505 | 10193 | 2.536 | 8.883E+001 | 0.19 |
| - | 22 | 2141.11 | 407 | 6781 | 3.309 | 5.570E-002 | 21.74 |
| - | 23 | 2147.64 | 3732 | 9510 | 3.311 | 5.112E-001 | 10.08 |
| ³⁸ Cl | 24 | 2168.61 | 7284 | 7142 | 2.579 | 9.978E-001 | 1.47 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | LH2C | |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 25 | 2349.05 | 1072 | 5780 | 2.248 | 1.468E-001 | 33.99 |
| - | 26 | 2450.19 | 2490 | 5997 | 3.479 | 3.411E-001 | 3.18 |
| ⁵⁶ Mn | 27 | 2524.40 | 40157 | 3747 | 2.692 | 5.501E+000 | 0.98 |
| - | 28 | 2600.06 | 769 | 2252 | 2.750 | 1.054E-001 | 6.25 |
| ⁵⁶ Mn | 29 | 2659.05 | 42137 | 2716 | 2.746 | 5.772E+000 | 0.90 |
| ²⁴ Na | 30 | 2755.70 | 4738 | 1760 | 2.671 | 6.490E-001 | 4.10 |
| - | 31 | 2860.39 | 1586 | 829 | 3.625 | 2.173E-001 | 2.92 |
| ⁵⁶ Mn | 32 | 2961.63 | 17597 | 731 | 2.815 | 2.410E+000 | 1.40 |
| ⁴⁹ Ca | 33 | 3086.31 | 656 | 481 | 3.333 | 8.989E-002 | 4.94 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.27.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 19, Messung LH2C, Aktivierung 6.3.1.2; Zählrate zu Beginn der Messung: 11.500 cts/s; Messgeometrie: in OnTop-Geometrie auf Detektor;

Aktivierung im Zentralen Bestrahlungsrohr

| ANALYSENBLATT | | | | | | | ZH1A |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 20.08.07 11:18:07 | | | | | |
| Live Time: | | 10192 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 10200 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 20.08.2007 15:15:36 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ¹⁸¹ Hf | 1 | 133.75 | 1186 | 10741 | 1.240 | 1.162E-001 | 6.86 |
| ⁴⁷ Sc | 2 | 160.11 | 5296 | 11457 | 1.355 | 5.192E-001 | 1.76 |
| ⁵¹ Cr | 3 | 320.82 | 537 | 3582 | 1.382 | 5.262E-002 | 27.70 |
| ¹⁹⁸ Au | 4 | 412.44 | 1914 | 2924 | 1.474 | 1.876E-001 | 8.71 |
| ¹⁸¹ Hf | 5 | 482.76 | 1615 | 2084 | 1.695 | 1.583E-001 | 10.27 |
| ¹⁴⁰ La | 6 | 487.67 | 323 | 2346 | 1.698 | 3.164E-002 | 14.14 |
| - | 7 | 511.60 | 1542 | 2349 | 3.030 | 1.512E-001 | 16.30 |
| ⁸² Br | 8 | 554.83 | 3630 | 2047 | 1.608 | 3.559E-001 | 4.74 |
| ¹²² Sb | 9 | 564.55 | 3387 | 1575 | 1.642 | 3.321E-001 | 1.81 |
| ¹³⁴ Cs | 10 | 569.91 | 543 | 1855 | 1.646 | 5.324E-002 | 6.42 |
| ¹³⁴ Cs | 11 | 605.19 | 4990 | 1853 | 1.630 | 4.892E-001 | 6.56 |
| ⁸² Br | 12 | 619.57 | 2140 | 1516 | 1.603 | 2.098E-001 | 2.37 |
| ^{110m} Ag | 13 | 658.18 | 2315 | 1318 | 1.609 | 2.270E-001 | 2.27 |
| ⁸² Br | 14 | 698.78 | 1205 | 998 | 1.727 | 1.182E-001 | 3.40 |
| ^{110m} Ag | 15 | 707.29 | 429 | 1211 | 1.733 | 4.207E-002 | 7.02 |
| ^{110m} Ag | 16 | 764.35 | 466 | 1440 | 1.701 | 4.565E-002 | 6.96 |
| ⁸² Br | 17 | 776.92 | 3368 | 1437 | 1.732 | 3.301E-001 | 6.15 |
| ¹³⁴ Cs | 18 | 796.22 | 2580 | 1199 | 1.724 | 2.529E-001 | 2.12 |
| ⁸² Br | 19 | 828.23 | 927 | 1164 | 1.710 | 9.085E-002 | 14.68 |
| ^{110m} Ag | 20 | 885.07 | 1554 | 1227 | 1.806 | 1.524E-001 | 7.36 |
| ⁴⁶ Sc | 21 | 889.59 | 1492 | 1216 | 1.809 | 1.463E-001 | 7.15 |
| ^{110m} Ag | 22 | 937.85 | 757 | 756 | 1.928 | 7.419E-002 | 4.40 |
| ⁸² Br | 23 | 1044.34 | 920 | 554 | 1.928 | 9.024E-002 | 3.73 |
| ⁸⁶ Rb | 24 | 1077.13 | 8578 | 560 | 1.890 | 8.409E-001 | 1.06 |
| ⁵⁹ Fe | 25 | 1099.65 | 340 | 435 | 1.815 | 3.332E-002 | 20.44 |
| ⁶⁵ Zn | 26 | 1115.92 | 11145 | 373 | 1.920 | 1.093E+000 | 1.64 |
| ⁴⁶ Sc | 27 | 1120.93 | 1305 | 340 | 1.922 | 1.279E-001 | 3.23 |
| ⁶⁰ Co | 28 | 1173.67 | 1254 | 393 | 1.918 | 1.229E-001 | 7.29 |
| ⁵⁹ Fe | 29 | 1292.06 | 281 | 168 | 2.166 | 2.754E-002 | 6.75 |
| ⁴⁷ Ca | 30 | 1297.56 | 858 | 153 | 2.168 | 8.410E-002 | 3.51 |
| ⁸² Br | 31 | 1318.03 | 789 | 191 | 2.126 | 7.738E-002 | 3.71 |
| ⁶⁰ Co | 32 | 1333.08 | 1237 | 187 | 2.119 | 1.213E-001 | 6.71 |
| ²⁴ Na | 33 | 1369.05 | 121 | 183 | 1.747 | 1.182E-002 | 13.45 |
| ^{110m} Ag | 34 | 1384.90 | 391 | 146 | 1.987 | 3.834E-002 | 5.53 |
| ⁴⁰ K | 35 | 1461.52 | 1077 | 102 | 2.059 | 1.056E-001 | 3.12 |
| ⁸² Br | 36 | 1475.69 | 501 | 103 | 2.173 | 4.908E-002 | 4.69 |
| ^{110m} Ag | 37 | 1505.66 | 203 | 81 | 2.079 | 1.989E-002 | 7.98 |
| ¹⁴⁰ La | 38 | 1596.95 | 232 | 68 | 2.145 | 2.273E-002 | 7.21 |
| ¹²⁴ Sb | 39 | 1691.92 | 433 | 49 | 2.021 | 4.245E-002 | 10.47 |
| ²¹⁴ Bi | 40 | 1765.59 | 89 | 31 | 1.904 | 8.689E-003 | 12.33 |
| ²⁰⁸ Tl | 41 | 2616.41 | 245 | 13 | 2.512 | 2.405E-002 | 6.54 |
| ²⁴ Na | 42 | 2755.78 | 76 | 6 | 2.247 | 7.494E-003 | 12.10 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.28.: Analysenblatt Gammasspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 2 mit Quarzglas, Messung ZH1A, Aktivierung 6.4.1, Zählrate circa 100 cts/s, Messgeometrie: in zylindrischer Geometrie direkt an Detektor gerückt;

D. Gammaspektren

| ANALYSENB L A T T | | | | | | ZH1B | |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 20.08.07 14:12:07 | | | | | |
| Live Time: | | 25180 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 25200 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 21.08.2007 10:02:16 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 42.52 | 3935 | 8234 | 0.799 | 1.561E-001 | 1.90 |
| ¹⁸¹ Hf | 2 | 133.78 | 3588 | 36369 | 1.309 | 1.424E-001 | 9.67 |
| ⁷⁵ Se | 3 | 136.81 | 1348 | 35513 | 1.314 | 5.348E-002 | 12.72 |
| ⁴⁷ Sc | 4 | 160.11 | 12490 | 27843 | 1.446 | 4.956E-001 | 5.92 |
| ⁷⁵ Se | 5 | 265.48 | 908 | 8643 | 1.481 | 3.601E-002 | 8.15 |
| ⁵¹ Cr | 6 | 320.80 | 1109 | 8167 | 1.400 | 4.402E-002 | 6.08 |
| - | 7 | 329.57 | 489 | 5885 | 1.553 | 1.941E-002 | 12.67 |
| ¹¹⁵ Cd | 8 | 336.92 | 783 | 9720 | 1.560 | 3.106E-002 | 8.30 |
| - | 9 | 346.64 | 279 | 6021 | 1.461 | 1.108E-002 | 39.93 |
| ¹⁹⁸ Au | 10 | 412.40 | 4390 | 7317 | 1.498 | 1.742E-001 | 1.83 |
| ¹⁸¹ Hf | 11 | 482.68 | 3490 | 5292 | 1.560 | 1.385E-001 | 7.09 |
| ¹³¹ Ba | 12 | 496.73 | 654 | 4836 | 1.408 | 2.594E-002 | 7.95 |
| - | 13 | 511.54 | 3532 | 5907 | 2.592 | 1.402E-001 | 2.08 |
| ⁸² Br | 14 | 554.82 | 8401 | 4667 | 1.662 | 3.334E-001 | 3.06 |
| ¹²² Sb | 15 | 564.53 | 7946 | 4390 | 1.665 | 3.153E-001 | 3.51 |
| ¹³⁴ Cs | 16 | 569.84 | 1365 | 4504 | 1.669 | 5.415E-002 | 5.18 |
| ¹²⁴ Sb | 17 | 603.20 | 3987 | 3307 | 1.657 | 1.582E-001 | 2.35 |
| ¹³⁴ Cs | 18 | 605.17 | 8857 | 4143 | 1.659 | 3.515E-001 | 1.25 |
| ⁸² Br | 19 | 619.56 | 4757 | 3341 | 1.679 | 1.888E-001 | 1.61 |
| ^{110m} Ag | 20 | 658.19 | 6156 | 3208 | 1.665 | 2.443E-001 | 1.36 |
| ^{110m} Ag | 21 | 678.15 | 625 | 3254 | 1.617 | 2.480E-002 | 7.36 |
| ^{110m} Ag | 22 | 687.24 | 368 | 3215 | 1.598 | 1.462E-002 | 11.19 |
| ¹²² Sb | 23 | 693.26 | 199 | 2977 | 1.602 | 7.904E-003 | 19.28 |
| ⁸² Br | 24 | 698.76 | 2676 | 2933 | 1.605 | 1.062E-001 | 2.34 |
| ^{110m} Ag | 25 | 707.14 | 1017 | 2864 | 1.611 | 4.037E-002 | 4.73 |
| ¹²⁴ Sb | 26 | 723.52 | 538 | 2503 | 2.196 | 2.133E-002 | 8.23 |
| ^{110m} Ag | 27 | 764.32 | 1365 | 3368 | 1.772 | 5.415E-002 | 3.80 |
| ⁸² Br | 28 | 776.88 | 7560 | 3393 | 1.719 | 3.000E-001 | 1.21 |
| ¹³⁴ Cs | 29 | 796.21 | 6610 | 3004 | 1.750 | 2.623E-001 | 1.32 |
| ¹³⁴ Cs | 30 | 802.36 | 512 | 2969 | 1.754 | 2.030E-002 | 8.45 |
| ⁸² Br | 31 | 828.15 | 2176 | 2610 | 1.780 | 8.635E-002 | 2.75 |
| - | 32 | 835.14 | 576 | 2937 | 1.784 | 2.288E-002 | 7.60 |
| ^{110m} Ag | 33 | 885.00 | 3876 | 2923 | 1.774 | 1.538E-001 | 1.85 |
| ⁴⁶ Sc | 34 | 889.59 | 3773 | 2737 | 1.776 | 1.497E-001 | 1.86 |
| ^{110m} Ag | 35 | 937.83 | 1864 | 2298 | 1.738 | 7.396E-002 | 8.88 |
| ⁸² Br | 36 | 1044.32 | 2148 | 1385 | 1.899 | 8.524E-002 | 2.41 |
| ⁸⁶ Rb | 37 | 1077.10 | 20834 | 1243 | 1.902 | 8.267E-001 | 0.68 |
| ⁵⁹ Fe | 38 | 1099.63 | 966 | 930 | 1.941 | 3.832E-002 | 4.02 |
| ⁶⁵ Zn | 39 | 1115.90 | 27181 | 950 | 1.919 | 1.079E+000 | 0.59 |
| ⁴⁶ Sc | 40 | 1120.91 | 3353 | 862 | 1.922 | 1.331E-001 | 1.81 |
| ⁶⁰ Co | 41 | 1173.61 | 2920 | 803 | 1.895 | 1.159E-001 | 1.96 |
| ⁵⁹ Fe | 42 | 1292.03 | 569 | 441 | 2.035 | 2.258E-002 | 7.02 |
| ⁴⁷ Ca | 43 | 1297.49 | 2016 | 447 | 2.037 | 7.999E-002 | 5.26 |
| ⁸² Br | 44 | 1318.00 | 1813 | 452 | 2.005 | 7.196E-002 | 2.47 |
| ⁶⁰ Co | 45 | 1332.96 | 2717 | 554 | 2.026 | 1.078E-001 | 1.98 |
| ^{110m} Ag | 46 | 1384.87 | 984 | 318 | 2.142 | 3.903E-002 | 3.46 |
| ⁴⁰ K | 47 | 1461.50 | 2548 | 269 | 2.102 | 1.011E-001 | 3.80 |
| ⁸² Br | 48 | 1475.68 | 1051 | 239 | 2.229 | 4.171E-002 | 3.29 |
| ^{110m} Ag | 49 | 1505.84 | 531 | 256 | 2.186 | 2.105E-002 | 12.66 |
| ¹⁴⁰ La | 50 | 1596.92 | 532 | 209 | 2.152 | 2.113E-002 | 12.38 |
| ¹²⁴ Sb | 51 | 1691.87 | 939 | 105 | 2.171 | 3.727E-002 | 3.36 |
| ²¹⁴ Bi | 52 | 1765.56 | 245 | 93 | 2.194 | 9.707E-003 | 7.26 |
| ¹²⁴ Sb | 53 | 2091.72 | 62 | 109 | 1.629 | 2.466E-003 | 20.03 |
| ²¹⁴ Bi | 54 | 2205.50 | 96 | 48 | 2.209 | 3.805E-003 | 12.12 |

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | ZH1B |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ²⁰⁸ Tl | 55 | 2616.23 | 604 | 43 | 2.478 | 2.395E-002 | 4.18 |
| ²⁴ Na | 56 | 2755.80 | 184 | 13 | 2.451 | 7.318E-003 | 15.68 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.29.: Analysenblatt Gammasspektrometrie Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 2 mit Quarzglas, Messung ZH1B, Aktivierung 6.4.1, Zählrate circa 100 cts/s, Messgeometrie: in zylindrischer Geometrie direkt an Detektor gerückt;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | ZH1c |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 21.08.07 08:41:02 | | | |
| Live Time: | | | | 82940 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 83000 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 22.08.2007 08:56:18 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 75.81 | 7295 | 154316 | 1.041 | 8.789E-002 | 50.27 |
| ¹⁸¹ Hf | 2 | 133.80 | 10900 | 95834 | 1.324 | 1.313E-001 | 2.07 |
| ⁷⁵ Se | 3 | 136.87 | 5002 | 126371 | 1.328 | 6.027E-002 | 4.13 |
| ¹⁴¹ Ce | 4 | 146.26 | 2151 | 99977 | 1.324 | 2.592E-002 | 38.77 |
| ⁴⁷ Sc | 5 | 160.12 | 36426 | 86388 | 1.428 | 4.389E-001 | 2.76 |
| ²²⁶ Ra | 6 | 186.58 | 1786 | 48149 | 1.162 | 2.152E-002 | 37.66 |
| ⁷⁵ Se | 7 | 265.50 | 2893 | 34750 | 1.485 | 3.485E-002 | 4.56 |
| - | 8 | 279.91 | 1838 | 36457 | 1.698 | 2.215E-002 | 39.41 |
| - | 9 | 312.46 | 1263 | 27798 | 1.540 | 1.522E-002 | 8.98 |
| ⁵¹ Cr | 10 | 320.75 | 4016 | 30063 | 1.633 | 4.839E-002 | 12.89 |
| ¹¹⁵ Cd | 11 | 336.95 | 1845 | 24686 | 1.441 | 2.223E-002 | 5.74 |
| ¹⁵² Eu | 12 | 344.18 | 2091 | 25643 | 1.448 | 2.519E-002 | 5.03 |
| ¹⁸¹ Hf | 13 | 346.56 | 2702 | 27009 | 1.451 | 3.256E-002 | 4.06 |
| - | 14 | 374.04 | 916 | 16685 | 0.865 | 1.104E-002 | 28.13 |
| ¹⁹⁸ Au | 15 | 412.36 | 10607 | 19561 | 1.515 | 1.278E-001 | 5.14 |
| ^{110m} Ag | 16 | 447.23 | 1350 | 19664 | 1.813 | 1.626E-002 | 29.60 |
| ¹⁸¹ Hf | 17 | 482.69 | 10902 | 14717 | 1.480 | 1.313E-001 | 1.18 |
| ¹⁴⁰ La | 18 | 487.42 | 538 | 14235 | 1.484 | 6.480E-003 | 15.62 |
| ¹³¹ Ba | 19 | 496.86 | 2380 | 12374 | 1.521 | 2.867E-002 | 3.85 |
| - | 20 | 511.63 | 12304 | 17439 | 2.712 | 1.482E-001 | 1.05 |
| ¹¹⁵ Cd | 21 | 528.31 | 710 | 12592 | 1.429 | 8.549E-003 | 43.41 |
| ⁸² Br | 22 | 554.85 | 16352 | 13888 | 1.597 | 1.970E-001 | 0.87 |
| ¹²² Sb | 23 | 564.49 | 20849 | 12653 | 1.729 | 2.512E-001 | 2.22 |
| ¹³⁴ Cs | 24 | 569.82 | 4907 | 13968 | 1.733 | 5.912E-002 | 2.87 |
| ¹²⁴ Sb | 25 | 603.17 | 13627 | 10641 | 1.704 | 1.642E-001 | 3.31 |
| ¹³⁴ Cs | 26 | 605.17 | 30217 | 10536 | 1.705 | 3.641E-001 | 2.34 |
| ²¹⁴ Bi | 27 | 609.74 | 1007 | 10369 | 1.709 | 1.214E-002 | 8.11 |
| ⁸² Br | 28 | 619.63 | 9118 | 11171 | 1.653 | 1.099E-001 | 1.26 |
| ¹²⁴ Sb | 29 | 646.45 | 685 | 8982 | 0.885 | 8.250E-003 | 33.68 |
| ^{110m} Ag | 30 | 658.18 | 20393 | 11543 | 1.657 | 2.457E-001 | 0.75 |
| ^{110m} Ag | 31 | 678.03 | 2067 | 10347 | 1.540 | 2.490E-002 | 13.20 |
| ^{110m} Ag | 32 | 687.31 | 1521 | 8948 | 1.645 | 1.833E-002 | 4.88 |
| ¹²² Sb | 33 | 693.14 | 695 | 9488 | 1.648 | 8.378E-003 | 9.67 |
| ⁸² Br | 34 | 698.78 | 5298 | 9421 | 1.652 | 6.383E-002 | 1.81 |
| ^{110m} Ag | 35 | 707.11 | 3162 | 9326 | 1.657 | 3.809E-002 | 2.68 |
| ¹²⁴ Sb | 36 | 723.59 | 1870 | 10764 | 2.369 | 2.253E-002 | 18.25 |
| ^{110m} Ag | 37 | 744.74 | 923 | 10097 | 1.529 | 1.112E-002 | 27.71 |
| ⁹⁵ Zr | 38 | 757.08 | 751 | 7817 | 1.788 | 9.053E-003 | 9.26 |
| ^{110m} Ag | 39 | 764.35 | 4305 | 9037 | 1.792 | 5.186E-002 | 5.15 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | ZH1C |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ⁸² Br | 40 | 776.90 | 15329 | 9251 | 1.761 | 1.847E-001 | 0.88 |
| ¹³⁴ Cs | 41 | 796.21 | 21842 | 9028 | 1.749 | 2.632E-001 | 0.72 |
| ¹³⁴ Cs | 42 | 802.27 | 2004 | 9066 | 1.752 | 2.415E-002 | 3.84 |
| ^{166m} Ho | 43 | 811.05 | 1095 | 9659 | 1.758 | 1.319E-002 | 6.53 |
| ^{110m} Ag | 44 | 818.25 | 1249 | 9681 | 1.762 | 1.505E-002 | 5.88 |
| ⁸² Br | 45 | 828.12 | 4239 | 9372 | 1.736 | 5.108E-002 | 2.21 |
| ⁵⁴ Mn | 46 | 835.22 | 1736 | 9542 | 1.740 | 2.092E-002 | 4.52 |
| ^{110m} Ag | 47 | 885.00 | 12613 | 9552 | 1.786 | 1.520E-001 | 1.02 |
| ⁴⁶ Sc | 48 | 889.60 | 12027 | 9324 | 1.789 | 1.449E-001 | 1.05 |
| ^{110m} Ag | 49 | 937.79 | 5766 | 7604 | 1.807 | 6.947E-002 | 1.63 |
| ⁸² Br | 50 | 1044.37 | 4121 | 3836 | 1.879 | 4.965E-002 | 1.89 |
| ⁸⁶ Rb | 51 | 1077.10 | 66246 | 4288 | 1.923 | 7.981E-001 | 0.61 |
| ⁵⁹ Fe | 52 | 1099.61 | 2935 | 3362 | 1.904 | 3.536E-002 | 6.58 |
| ⁶⁵ Zn | 53 | 1115.90 | 89369 | 2622 | 1.953 | 1.077E+000 | 0.53 |
| ⁴⁶ Sc | 54 | 1120.89 | 11156 | 2175 | 1.955 | 1.344E-001 | 1.08 |
| ¹³⁴ Cs | 55 | 1168.28 | 405 | 1807 | 1.970 | 4.885E-003 | 9.70 |
| ⁶⁰ Co | 56 | 1173.62 | 10199 | 2159 | 1.972 | 1.229E-001 | 2.28 |
| ⁵⁹ Fe | 57 | 1292.06 | 1881 | 1298 | 1.996 | 2.266E-002 | 2.73 |
| ⁴⁷ Ca | 58 | 1297.48 | 5535 | 1379 | 1.998 | 6.669E-002 | 1.41 |
| ⁸² Br | 59 | 1317.99 | 3574 | 1295 | 2.027 | 4.305E-002 | 4.82 |
| ⁶⁰ Co | 60 | 1332.97 | 9433 | 1482 | 2.092 | 1.137E-001 | 2.20 |
| ¹³⁴ Cs | 61 | 1365.76 | 686 | 1100 | 1.994 | 8.264E-003 | 16.33 |
| ¹²⁴ Sb | 62 | 1369.11 | 453 | 1186 | 1.996 | 5.460E-003 | 15.65 |
| ^{110m} Ag | 63 | 1384.87 | 3392 | 1115 | 2.077 | 4.087E-002 | 1.84 |
| - | 64 | 1401.40 | 352 | 883 | 1.906 | 4.245E-003 | 8.71 |
| ¹⁵² Eu | 65 | 1408.56 | 174 | 762 | 1.909 | 2.095E-003 | 14.76 |
| ⁴⁰ K | 66 | 1461.50 | 8487 | 902 | 2.110 | 1.023E-001 | 2.02 |
| ⁸² Br | 67 | 1475.73 | 2548 | 741 | 2.255 | 3.070E-002 | 5.46 |
| ^{110m} Ag | 68 | 1505.75 | 1531 | 689 | 2.042 | 1.844E-002 | 2.91 |
| - | 69 | 1543.31 | 153 | 552 | 1.494 | 1.839E-003 | 14.02 |
| ¹⁴⁰ La | 70 | 1596.94 | 1299 | 610 | 2.166 | 1.565E-002 | 8.81 |
| ¹²⁴ Sb | 71 | 1691.91 | 3281 | 459 | 2.214 | 3.953E-002 | 1.80 |
| ²¹⁴ Bi | 72 | 1730.27 | 92 | 261 | 1.212 | 1.108E-003 | 17.66 |
| ²¹⁴ Bi | 73 | 1765.45 | 774 | 366 | 2.318 | 9.323E-003 | 10.56 |
| ²¹⁴ Bi | 74 | 1848.42 | 103 | 258 | 1.751 | 1.237E-003 | 16.25 |
| ¹²⁴ Sb | 75 | 2092.19 | 366 | 236 | 2.573 | 4.414E-003 | 16.18 |
| ²¹⁴ Bi | 76 | 2205.42 | 292 | 240 | 2.171 | 3.524E-003 | 20.00 |
| - | 77 | 2507.38 | 113 | 98 | 2.438 | 1.358E-003 | 12.09 |
| ²⁰⁸ Tl | 78 | 2616.30 | 2125 | 68 | 2.704 | 2.561E-002 | 3.74 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.30.: Analysenblatt Gammaspektrometrie *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 2 mit Quarzglas, Messung ZH1C, Aktivierung 6.4.1, Zählrate circa 100 cts/s, Messgeometrie: in zylindrischer Geometrie direkt an Detektor gerückt;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | ZQ1A |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 28.08.07 14:15:30 | | | |
| Live Time: | | | | 157581 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 157611 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 30.08.2007 11:11:14 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 58.16 | 1487 | 15799 | 1.313 | 9.438E-003 | 25.21 |
| - | 2 | 64.00 | 994 | 12733 | 1.066 | 6.309E-003 | 8.48 |

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | ZQ1A |
|--------------------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 3 | 75.96 | 2330 | 17374 | 0.776 | 1.478E-002 | 52.32 |
| - | 4 | 93.28 | 5320 | 20941 | 1.542 | 3.376E-002 | 9.58 |
| ¹⁸¹ Hf | 5 | 133.77 | 17867 | 23408 | 1.381 | 1.134E-001 | 3.07 |
| ¹⁸¹ Hf | 6 | 137.06 | 2601 | 22697 | 1.386 | 1.650E-002 | 5.27 |
| ¹⁴¹ Ce | 7 | 146.17 | 3568 | 23365 | 1.398 | 2.264E-002 | 11.43 |
| ²²⁶ Ra | 8 | 186.46 | 3442 | 17053 | 1.310 | 2.184E-002 | 2.90 |
| ²¹² Pb | 9 | 239.38 | 1258 | 14150 | 1.263 | 7.978E-003 | 6.56 |
| - | 10 | 312.40 | 1642 | 11684 | 1.446 | 1.042E-002 | 4.61 |
| ⁵¹ Cr | 11 | 320.72 | 3496 | 10101 | 1.428 | 2.218E-002 | 2.37 |
| ¹⁵² Eu | 12 | 344.04 | 3172 | 6862 | 1.479 | 2.013E-002 | 2.53 |
| ¹⁸¹ Hf | 13 | 346.51 | 4373 | 9743 | 1.482 | 2.774E-002 | 1.95 |
| ²¹⁴ Pb | 14 | 352.58 | 1063 | 8601 | 1.487 | 6.745E-003 | 5.95 |
| - | 15 | 356.63 | 810 | 8863 | 1.491 | 5.139E-003 | 7.59 |
| ¹⁸¹ Hf | 16 | 482.63 | 18987 | 6637 | 1.525 | 1.205E-001 | 0.73 |
| ¹³¹ Ba | 17 | 496.72 | 625 | 4782 | 1.409 | 3.966E-003 | 8.69 |
| - | 18 | 511.39 | 6833 | 6571 | 2.778 | 4.335E-002 | 5.53 |
| ¹²² Sb | 19 | 564.44 | 935 | 5301 | 1.439 | 5.930E-003 | 24.14 |
| ²⁰⁸ Tl | 20 | 583.52 | 945 | 4454 | 1.963 | 5.998E-003 | 5.82 |
| ¹²⁴ Sb | 21 | 603.13 | 5077 | 4466 | 1.709 | 3.221E-002 | 1.62 |
| ²¹⁴ Bi | 22 | 609.66 | 1334 | 5363 | 1.713 | 8.462E-003 | 4.34 |
| ¹³⁷ Cs | 23 | 662.13 | 233 | 3687 | 1.094 | 1.477E-003 | 20.36 |
| ¹²⁴ Sb | 24 | 724.21 | 1334 | 4047 | 2.072 | 8.462E-003 | 4.37 |
| ⁹⁵ Zr | 25 | 756.96 | 1226 | 3828 | 1.676 | 7.777E-003 | 4.53 |
| ²¹⁴ Bi | 26 | 766.20 | 1113 | 3818 | 1.913 | 7.061E-003 | 23.81 |
| ⁵⁸ Co | 27 | 811.01 | 517 | 3362 | 1.524 | 3.282E-003 | 37.27 |
| ⁵⁴ Mn | 28 | 835.03 | 518 | 2603 | 1.790 | 3.283E-003 | 9.42 |
| ⁴⁶ Sc | 29 | 889.47 | 20026 | 4269 | 1.806 | 1.271E-001 | 0.71 |
| ²²⁸ Ac | 30 | 911.35 | 1047 | 3154 | 2.050 | 6.644E-003 | 19.78 |
| ²²⁸ Ac | 31 | 969.23 | 529 | 2134 | 1.799 | 3.359E-003 | 8.73 |
| ^{234m} Pa | 32 | 1001.36 | 449 | 3137 | 2.218 | 2.846E-003 | 9.67 |
| ⁵⁹ Fe | 33 | 1099.39 | 2510 | 2495 | 1.895 | 1.593E-002 | 2.44 |
| ⁶⁵ Zn | 34 | 1115.78 | 363 | 1993 | 1.921 | 2.305E-003 | 11.39 |
| ⁴⁶ Sc / ²¹⁴ Bi | 35 | 1120.74 | 18310 | 2522 | 1.923 | 1.162E-001 | 0.75 |
| ⁶⁰ Co | 36 | 1173.41 | 2551 | 2610 | 2.005 | 1.618E-002 | 6.93 |
| ²¹⁴ Bi | 37 | 1238.44 | 445 | 1526 | 1.765 | 2.823E-003 | 8.84 |
| ⁵⁹ Fe | 38 | 1291.91 | 1695 | 1418 | 1.944 | 1.075E-002 | 2.98 |
| ⁶⁰ Co | 39 | 1332.83 | 2454 | 1380 | 2.033 | 1.557E-002 | 6.35 |
| ²¹⁴ Bi | 40 | 1378.03 | 294 | 1180 | 2.178 | 1.867E-003 | 10.81 |
| ¹⁵² Eu | 41 | 1408.43 | 379 | 1007 | 2.121 | 2.406E-003 | 8.58 |
| ⁴⁰ K | 42 | 1461.28 | 15292 | 1053 | 2.129 | 9.702E-002 | 0.81 |
| ²¹⁴ Bi | 43 | 1509.68 | 143 | 523 | 1.203 | 9.065E-004 | 46.13 |
| ²²⁸ Ac | 44 | 1588.67 | 160 | 531 | 1.570 | 1.013E-003 | 14.44 |
| - | 45 | 1592.91 | 130 | 606 | 1.572 | 8.231E-004 | 17.09 |
| ²¹² Bi | 46 | 1621.32 | 142 | 333 | 1.692 | 8.978E-004 | 14.05 |
| - | 47 | 1631.06 | 152 | 407 | 1.696 | 9.621E-004 | 13.67 |
| ¹²⁴ Sb | 48 | 1691.67 | 1300 | 566 | 2.374 | 8.251E-003 | 3.09 |
| ²¹⁴ Bi | 49 | 1730.36 | 241 | 494 | 2.015 | 1.526E-003 | 9.71 |
| ²¹⁴ Bi | 50 | 1765.25 | 1531 | 467 | 2.288 | 9.715E-003 | 6.67 |
| - | 51 | 2010.87 | 278 | 408 | 3.035 | 1.766E-003 | 15.15 |
| ¹²⁴ Sb | 52 | 2091.78 | 125 | 249 | 1.669 | 7.954E-004 | 14.51 |
| - | 53 | 2104.47 | 512 | 418 | 3.358 | 3.250E-003 | 17.05 |
| ²¹⁴ Bi | 54 | 2119.40 | 169 | 314 | 2.507 | 1.070E-003 | 42.57 |
| ²¹⁴ Bi | 55 | 2205.23 | 519 | 284 | 2.389 | 3.295E-003 | 5.34 |
| ²¹⁴ Bi | 56 | 2449.12 | 182 | 247 | 2.435 | 1.155E-003 | 33.89 |
| ²⁰⁸ Tl | 57 | 2615.95 | 3880 | 128 | 2.654 | 2.462E-002 | 2.55 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.31.: Analysenblatt Gammaskpektrometrie Quarzglas Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 2, Messung ZQ1A, Quarzglas nach Entfernen der Holzprobe einmal mit Aceton gespült, Aktivierung 6.4.1, Zählrate circa 70 cts/s, Messgeometrie: in zylindrischer Geometrie direkt an Detektor gerückt;

D. Gammaspektren

| ANALYSENB L A T T | | | | | | ZH1K | |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 30.08.07 10:07:29 | | | | | |
| Live Time: | | 337845 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 338000 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 03.09.2007 09:05:34 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 73.51 | 6518 | 302398 | 1.271 | 1.928E-002 | 15.22 |
| - | 2 | 75.72 | 14826 | 432567 | 1.275 | 4.386E-002 | 11.52 |
| - | 3 | 85.46 | 6711 | 318099 | 1.390 | 1.986E-002 | 5.71 |
| - | 4 | 93.38 | 10259 | 283621 | 1.302 | 3.035E-002 | 3.54 |
| ⁷⁵ Se | 5 | 121.97 | 3944 | 219337 | 1.318 | 1.167E-002 | 8.05 |
| ¹³¹ Ba | 6 | 124.62 | 4898 | 323505 | 1.323 | 1.449E-002 | 6.81 |
| ⁷⁵ Se | 7 | 136.81 | 10685 | 211940 | 1.277 | 3.161E-002 | 2.96 |
| ⁴⁷ Sc | 8 | 160.18 | 36575 | 201119 | 1.356 | 1.082E-001 | 0.91 |
| ²²⁶ Ra | 9 | 186.56 | 7378 | 163131 | 1.359 | 2.183E-002 | 3.67 |
| ¹³¹ Ba | 10 | 216.85 | 3012 | 131412 | 1.484 | 8.910E-003 | 40.00 |
| ²¹² Pb | 11 | 239.37 | 2902 | 96932 | 1.155 | 8.586E-003 | 7.19 |
| ⁷⁵ Se | 12 | 265.41 | 9609 | 89530 | 1.427 | 2.843E-002 | 2.19 |
| ⁷⁵ Se | 13 | 280.08 | 5787 | 92355 | 1.599 | 1.712E-002 | 14.11 |
| ⁵¹ Cr | 14 | 320.79 | 2420 | 64487 | 1.345 | 7.158E-003 | 6.94 |
| ²¹⁴ Pb | 15 | 352.59 | 2210 | 39471 | 1.529 | 6.537E-003 | 7.09 |
| - | 16 | 356.78 | 1745 | 62299 | 1.533 | 5.162E-003 | 8.92 |
| ¹³¹ Ba | 17 | 373.96 | 1295 | 51380 | 1.364 | 3.831E-003 | 43.01 |
| ⁷⁵ Se | 18 | 401.27 | 2028 | 40302 | 1.593 | 5.999E-003 | 7.42 |
| ^{110m} Ag | 19 | 447.39 | 3683 | 45196 | 1.532 | 1.090E-002 | 15.38 |
| ¹³⁴ Cs | 20 | 475.93 | 2059 | 38464 | 1.916 | 6.092E-003 | 21.57 |
| ⁴⁷ Ca | 21 | 489.70 | 731 | 24700 | 1.396 | 2.163E-003 | 16.60 |
| ¹³¹ Ba | 22 | 496.72 | 2957 | 31482 | 1.402 | 8.749E-003 | 4.61 |
| - | 23 | 511.49 | 40427 | 47984 | 2.927 | 1.196E-001 | 3.06 |
| ¹³⁴ Cs | 24 | 563.94 | 12529 | 32616 | 1.749 | 3.707E-002 | 3.36 |
| ¹³⁴ Cs | 25 | 569.81 | 17325 | 32496 | 1.754 | 5.126E-002 | 3.22 |
| ²⁰⁸ Tl | 26 | 583.73 | 1722 | 36004 | 1.716 | 5.094E-003 | 30.48 |
| ¹³⁴ Cs | 27 | 605.17 | 137072 | 31110 | 1.684 | 4.055E-001 | 0.94 |
| ²¹⁴ Bi | 28 | 609.94 | 3183 | 55057 | 1.687 | 9.418E-003 | 3.66 |
| ^{110m} Ag | 29 | 620.76 | 2501 | 28624 | 1.965 | 7.401E-003 | 25.82 |
| ¹²⁴ Sb | 30 | 646.26 | 2518 | 25764 | 1.738 | 7.451E-003 | 20.47 |
| ^{110m} Ag | 31 | 658.19 | 72600 | 33146 | 1.702 | 2.148E-001 | 0.98 |
| ^{110m} Ag | 32 | 678.06 | 8021 | 27642 | 1.731 | 2.373E-002 | 1.75 |
| ^{110m} Ag | 33 | 687.42 | 4960 | 28736 | 1.731 | 1.467E-002 | 2.62 |
| ^{110m} Ag | 34 | 707.12 | 12119 | 29674 | 1.739 | 3.586E-002 | 5.59 |
| ¹²⁴ Sb | 35 | 723.18 | 3134 | 23311 | 1.764 | 9.272E-003 | 8.35 |
| ^{110m} Ag | 36 | 744.66 | 2912 | 24608 | 1.592 | 8.614E-003 | 4.17 |
| ^{110m} Ag | 37 | 764.32 | 15821 | 24568 | 1.763 | 4.681E-002 | 1.03 |
| ¹³⁴ Cs | 38 | 796.23 | 78125 | 25802 | 1.735 | 2.311E-001 | 0.37 |
| ¹³⁴ Cs | 39 | 802.29 | 6981 | 25849 | 1.739 | 2.065E-002 | 1.93 |
| ⁵⁸ Co | 40 | 811.08 | 2341 | 25876 | 1.745 | 6.925E-003 | 5.00 |
| ^{110m} Ag | 41 | 818.37 | 4317 | 27516 | 1.749 | 1.277E-002 | 2.96 |
| ⁵⁴ Mn | 42 | 835.22 | 5633 | 29244 | 1.692 | 1.667E-002 | 8.49 |
| ^{110m} Ag | 43 | 885.00 | 45646 | 29883 | 1.808 | 1.350E-001 | 1.95 |
| ²²⁸ Ac | 44 | 911.63 | 1712 | 19503 | 1.586 | 5.066E-003 | 6.64 |
| ^{110m} Ag | 45 | 937.82 | 21309 | 18576 | 1.852 | 6.304E-002 | 0.81 |
| ²²⁸ Ac | 46 | 969.23 | 1555 | 14960 | 1.671 | 4.600E-003 | 6.26 |
| ^{234m} Pa | 47 | 1001.48 | 629 | 7865 | 1.495 | 1.860E-003 | 13.17 |
| ¹³⁴ Cs | 48 | 1039.04 | 751 | 7124 | 1.289 | 2.221E-003 | 42.24 |
| ⁸⁶ Rb | 49 | 1077.10 | 163494 | 11968 | 1.936 | 4.837E-001 | 0.41 |
| ⁵⁹ Fe | 50 | 1099.58 | 3298 | 7747 | 1.930 | 9.756E-003 | 2.75 |
| ⁶⁵ Zn | 51 | 1115.89 | 309365 | 7356 | 1.950 | 9.153E-001 | 0.26 |
| ²¹⁴ Bi | 52 | 1120.75 | 2503 | 6829 | 1.953 | 7.406E-003 | 3.16 |
| ¹³⁴ Cs | 53 | 1168.28 | 1350 | 6103 | 1.978 | 3.993E-003 | 5.07 |
| ⁶⁰ Co | 54 | 1173.60 | 32208 | 6613 | 1.981 | 9.529E-002 | 0.57 |

D.2. Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | ZH1K |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ²¹⁴ Bi | 55 | 1238.59 | 1022 | 5668 | 2.109 | 3.025E-003 | 6.32 |
| ⁵⁹ Fe | 56 | 1292.08 | 2359 | 4278 | 1.997 | 6.979E-003 | 5.60 |
| ⁴⁷ Ca | 57 | 1297.46 | 3944 | 4212 | 1.999 | 1.167E-002 | 5.13 |
| - | 58 | 1326.23 | 383 | 3086 | 2.066 | 1.133E-003 | 12.63 |
| ⁶⁰ Co | 59 | 1333.00 | 29508 | 3636 | 2.069 | 8.730E-002 | 1.16 |
| ¹³⁴ Cs | 60 | 1365.70 | 2404 | 3386 | 2.231 | 7.112E-003 | 2.74 |
| ²¹⁴ Bi | 61 | 1378.26 | 727 | 2878 | 2.103 | 2.151E-003 | 6.92 |
| ^{110m} Ag | 62 | 1384.85 | 12251 | 2830 | 2.106 | 3.624E-002 | 2.31 |
| ²¹⁴ Bi | 63 | 1401.27 | 1572 | 2802 | 2.432 | 4.650E-003 | 3.65 |
| ²¹⁴ Bi | 64 | 1408.41 | 786 | 3248 | 2.435 | 2.326E-003 | 6.09 |
| ⁴⁰ K | 65 | 1461.47 | 32594 | 2797 | 2.104 | 9.643E-002 | 0.56 |
| ^{110m} Ag | 66 | 1476.43 | 2059 | 1952 | 2.252 | 6.092E-003 | 2.73 |
| ^{110m} Ag | 67 | 1505.69 | 5788 | 2606 | 2.041 | 1.712E-002 | 3.64 |
| ^{110m} Ag | 68 | 1563.15 | 583 | 1234 | 1.758 | 1.724E-003 | 6.67 |
| ²²⁸ Ac | 69 | 1588.86 | 155 | 1427 | 1.573 | 4.583E-004 | 38.12 |
| ²¹² Bi | 70 | 1621.63 | 394 | 1363 | 1.827 | 1.167E-003 | 23.27 |
| - | 71 | 1631.62 | 288 | 1977 | 1.832 | 8.523E-004 | 20.88 |
| ²²⁴ Sb | 72 | 1691.82 | 8552 | 1405 | 2.239 | 2.530E-002 | 1.12 |
| ²¹⁴ Bi | 73 | 1730.56 | 583 | 1076 | 2.223 | 1.724E-003 | 9.97 |
| ²¹⁴ Bi | 74 | 1765.47 | 3134 | 1285 | 2.293 | 9.273E-003 | 5.85 |
| - | 75 | 1823.15 | 225 | 1098 | 2.230 | 6.671E-004 | 13.70 |
| ²¹⁴ Bi | 76 | 1848.38 | 414 | 1039 | 2.075 | 1.224E-003 | 8.00 |
| ¹²⁴ Sb | 77 | 2092.25 | 891 | 881 | 2.517 | 2.637E-003 | 4.36 |
| - | 78 | 2104.87 | 1145 | 995 | 3.275 | 3.387E-003 | 11.91 |
| ²¹⁴ Bi | 79 | 2119.84 | 284 | 891 | 2.806 | 8.405E-004 | 10.29 |
| ²¹⁴ Bi | 80 | 2205.34 | 1068 | 832 | 2.403 | 3.159E-003 | 10.90 |
| - | 81 | 2295.15 | 219 | 688 | 1.944 | 6.466E-004 | 35.91 |
| ²¹⁴ Bi | 82 | 2449.23 | 386 | 541 | 2.577 | 1.141E-003 | 7.17 |
| - | 83 | 2507.20 | 348 | 339 | 2.586 | 1.031E-003 | 6.93 |
| ²⁰⁸ Tl | 84 | 2616.22 | 8427 | 336 | 2.657 | 2.493E-002 | 1.95 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.32.: Analysenblatt *Gamma*spektrometrie *Pinus Cembra* Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 2 ohne Quarzglas, Messung ZH1K, Aktivierung 6.4.1, Zählrate circa 50 cts/s, Messgeometrie: in zylindrischer Geometrie direkt an Detektor gerückt;

| ANALYSENBLATT | | | | | | | ZQ1B |
|--------------------------|----------|--------------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | | | 03.09.07 09:03:09 | | | |
| Live Time: | | | | 86585 seconds | | | |
| Real Time: | | | | 86600 seconds | | | |
| Peak Analysis Performed: | | | | 04.09.2007 10:10:51 | | | |
| Analysis from channel: | | | | 1 | | | |
| Analysis to channel: | | | | 8192 | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 1 | 58.20 | 1092 | 8604 | 1.397 | 1.261E-002 | 30.32 |
| - | 2 | 64.10 | 868 | 6761 | 1.089 | 1.002E-002 | 6.99 |
| - | 3 | 75.87 | 1201 | 9190 | 0.880 | 1.386E-002 | 45.57 |
| - | 4 | 93.30 | 2743 | 11116 | 1.384 | 3.167E-002 | 2.98 |
| ¹⁸¹ Hf | 5 | 133.84 | 11692 | 10487 | 1.291 | 1.350E-001 | 1.01 |
| ¹⁸¹ Hf | 6 | 137.13 | 1506 | 13094 | 1.296 | 1.739E-002 | 4.90 |
| ¹⁴¹ Ce | 7 | 146.16 | 2129 | 12602 | 1.447 | 2.458E-002 | 14.92 |
| ²²⁶ Ra | 8 | 186.50 | 1727 | 9126 | 1.216 | 1.995E-002 | 17.70 |
| ²¹² Pb | 9 | 239.38 | 674 | 7013 | 1.165 | 7.788E-003 | 35.53 |
| - | 10 | 312.57 | 1015 | 4501 | 1.491 | 1.172E-002 | 5.37 |
| ⁵¹ Cr | 11 | 320.80 | 2091 | 5093 | 1.408 | 2.415E-002 | 2.97 |

D. Gammaspektren

| ANALYSENBLATT - FORTSETZUNG | | | | | | | ZQ1B |
|-----------------------------|----------|--------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| ¹⁵² Eu | 12 | 344.12 | 2125 | 4444 | 1.531 | 2.454E-002 | 11.69 |
| ¹⁸¹ Hf | 13 | 346.60 | 2635 | 4723 | 1.533 | 3.043E-002 | 10.15 |
| ²¹⁴ Pb | 14 | 352.56 | 535 | 4610 | 1.539 | 6.175E-003 | 13.89 |
| ¹⁸¹ Hf | 15 | 482.73 | 11538 | 3543 | 1.532 | 1.332E-001 | 0.93 |
| - | 16 | 511.65 | 3918 | 3647 | 2.692 | 4.525E-002 | 1.70 |
| ²⁰⁸ Tl | 17 | 583.63 | 333 | 2676 | 1.380 | 3.851E-003 | 11.55 |
| ¹²⁴ Sb | 18 | 603.26 | 2994 | 2467 | 1.683 | 3.458E-002 | 2.09 |
| ²¹⁴ Bi | 19 | 609.80 | 678 | 2854 | 1.688 | 7.826E-003 | 6.31 |
| ¹²⁴ Sb | 20 | 724.56 | 834 | 2774 | 1.631 | 9.628E-003 | 20.22 |
| ⁹⁵ Zr | 21 | 757.10 | 728 | 2100 | 1.679 | 8.401E-003 | 20.15 |
| ²¹⁴ Bi | 22 | 766.22 | 549 | 2236 | 1.476 | 6.338E-003 | 24.62 |
| ⁵⁸ Co | 23 | 811.12 | 383 | 1948 | 1.870 | 4.426E-003 | 13.97 |
| ⁵⁴ Mn | 24 | 835.21 | 426 | 1520 | 1.710 | 4.914E-003 | 9.03 |
| ⁴⁶ Sc | 25 | 889.61 | 12659 | 2209 | 1.787 | 1.462E-001 | 0.89 |
| ²²⁸ Ac | 26 | 911.64 | 565 | 2243 | 2.375 | 6.523E-003 | 30.00 |
| ²²⁸ Ac | 27 | 969.41 | 324 | 1327 | 1.695 | 3.736E-003 | 10.92 |
| ⁵⁹ Fe | 28 | 1099.64 | 1637 | 1587 | 2.080 | 1.891E-002 | 8.94 |
| ⁶⁵ Zn | 29 | 1115.80 | 199 | 1163 | 1.910 | 2.296E-003 | 15.68 |
| ⁴⁶ Sc | 30 | 1120.92 | 11397 | 1336 | 1.913 | 1.316E-001 | 0.94 |
| ⁶⁰ Co | 31 | 1173.59 | 1489 | 1208 | 1.895 | 1.720E-002 | 3.13 |
| ²¹⁴ Bi | 32 | 1238.63 | 272 | 1020 | 2.198 | 3.145E-003 | 11.19 |
| ⁵⁹ Fe | 33 | 1292.15 | 1029 | 897 | 2.235 | 1.189E-002 | 3.77 |
| ⁶⁰ Co | 34 | 1333.01 | 1436 | 687 | 2.031 | 1.659E-002 | 3.03 |
| ²¹⁴ Bi | 35 | 1378.34 | 148 | 444 | 1.590 | 1.715E-003 | 45.77 |
| ⁴⁰ K | 36 | 1461.50 | 8544 | 555 | 2.120 | 9.866E-002 | 2.05 |
| ¹²⁴ Sb | 37 | 1691.94 | 652 | 289 | 2.195 | 7.524E-003 | 4.54 |
| ²¹⁴ Bi | 38 | 1730.45 | 165 | 244 | 2.184 | 1.905E-003 | 21.82 |
| ²¹⁴ Bi | 39 | 1765.49 | 852 | 247 | 2.116 | 9.838E-003 | 3.77 |
| - | 40 | 1848.65 | 109 | 213 | 1.946 | 1.256E-003 | 15.00 |
| - | 41 | 2011.13 | 149 | 190 | 1.288 | 1.723E-003 | 46.44 |
| - | 42 | 2104.71 | 290 | 211 | 3.322 | 3.352E-003 | 21.74 |
| ²¹⁴ Bi | 43 | 2205.46 | 301 | 187 | 2.605 | 3.476E-003 | 19.25 |
| ²⁰⁸ Tl | 44 | 2616.18 | 2206 | 89 | 2.610 | 2.547E-002 | 2.16 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.33.: Analysenblatt Gammaspektrometrie Quarzglas Pinus Cembra Zirbe C (1778 - 2007) 1906 - 2007, Probe 2, Messung ZQ1B, Quarzglas nach Entfernen der Holzprobe einmal mit Aceton gespült und jeweils 20 min sauer und mild alkalisch ultraschallgereinigt, Aktivierung 6.4.1, Messgeometrie: in zylindrischer Geometrie direkt an Detektor gerückt;

D.3. Leerwertmessungen

| ANALYSENBLATT | | | | | | | L 1 |
|--------------------------|----------|---------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Acquisition Start Time: | | 25.05.07 11:48:44 | | | | | |
| Live Time: | | 411106 seconds | | | | | |
| Real Time: | | 411177 seconds | | | | | |
| Peak Analysis Performed: | | 05.06.2007 12:37:29 | | | | | |
| Analysis from channel: | | 1 | | | | | |
| Analysis to channel: | | 8192 | | | | | |
| Nuklid | Peak No. | Energy (keV) | Net Peak Area (cts) | Bkgnd (cts) | FWHM (keV) | Counts/sec | Error (%) |
| - | 6 | 81.70 | 1474 | 52040 | 1.553 | 3.585E-003 | 9.29 |
| - | 7 | 85.28 | 3624 | 51387 | 1.558 | 8.813E-003 | 5.35 |
| - | 8 | 93.24 | 14007 | 59624 | 1.571 | 3.406E-002 | 4.08 |
| - | 9 | 144.31 | 1391 | 48477 | 1.134 | 3.384E-003 | 11.14 |
| ²²⁶ Ra | 10 | 186.32 | 8549 | 45147 | 1.414 | 2.079E-002 | 1.95 |
| - | 11 | 206.09 | 695 | 35063 | 0.841 | 1.690E-003 | 48.16 |
| ²¹² Pb | 12 | 239.12 | 3341 | 25174 | 1.282 | 8.125E-003 | 4.08 |
| ²¹⁴ Pb | 13 | 295.73 | 1781 | 20452 | 1.669 | 4.332E-003 | 25.10 |
| - | 14 | 303.38 | 932 | 21971 | 1.675 | 2.267E-003 | 26.26 |
| ²²⁸ Ac | 15 | 338.98 | 544 | 12815 | 1.508 | 1.323E-003 | 18.74 |
| - | 16 | 344.51 | 558 | 18095 | 1.513 | 1.356E-003 | 17.61 |
| ²¹⁴ Pb | 17 | 352.34 | 3327 | 17221 | 1.519 | 8.092E-003 | 10.10 |
| - | 18 | 356.40 | 1959 | 16690 | 1.522 | 4.764E-003 | 10.52 |
| - | 19 | 511.17 | 18607 | 15056 | 2.985 | 4.525E-002 | 2.59 |
| ²⁰⁸ Tl | 20 | 583.30 | 2258 | 8329 | 1.649 | 5.491E-003 | 3.70 |
| ²¹⁴ Bi | 21 | 609.43 | 3823 | 8290 | 1.679 | 9.299E-003 | 2.42 |
| ¹³⁷ Cs | 22 | 661.55 | 785 | 6470 | 1.684 | 1.908E-003 | 9.26 |
| ²¹² Bi | 23 | 727.15 | 619 | 6777 | 1.901 | 1.506E-003 | 11.37 |
| - | 24 | 846.70 | 919 | 5567 | 1.706 | 2.234E-003 | 7.55 |
| ²⁰⁸ Tl | 25 | 860.53 | 477 | 4855 | 1.823 | 1.160E-003 | 13.66 |
| ²²⁸ Ac | 26 | 911.08 | 2564 | 6232 | 1.828 | 6.236E-003 | 3.05 |
| ²¹⁴ Bi | 27 | 933.97 | 377 | 5558 | 1.446 | 9.165E-004 | 15.72 |
| ²²⁸ Ac | 28 | 964.33 | 638 | 5809 | 1.734 | 1.552E-003 | 16.22 |
| ²²⁸ Ac | 29 | 968.80 | 1666 | 5939 | 1.736 | 4.051E-003 | 13.94 |
| ^{234m} Pa | 30 | 1000.79 | 769 | 6250 | 1.513 | 1.871E-003 | 8.11 |
| ²¹⁴ Bi | 31 | 1120.09 | 2262 | 6169 | 1.827 | 5.502E-003 | 3.27 |
| ⁶⁰ Co | 32 | 1173.07 | 1358 | 5106 | 1.894 | 3.302E-003 | 16.62 |
| ²¹⁴ Bi | 33 | 1238.01 | 1114 | 5587 | 2.003 | 2.709E-003 | 5.88 |
| ⁶⁰ Co | 34 | 1332.33 | 1180 | 3596 | 2.087 | 2.870E-003 | 6.76 |
| ²¹⁴ Bi | 35 | 1377.61 | 720 | 2691 | 1.800 | 1.750E-003 | 6.85 |
| - | 36 | 1401.37 | 193 | 2199 | 1.924 | 4.697E-004 | 20.14 |
| ²¹⁴ Bi | 37 | 1407.96 | 593 | 2494 | 1.927 | 1.441E-003 | 8.13 |
| ⁴⁰ K | 38 | 1460.76 | 39635 | 2672 | 2.143 | 9.639E-002 | 0.95 |
| ²¹⁴ Bi | 39 | 1509.15 | 484 | 1995 | 2.021 | 1.178E-003 | 8.22 |
| ²²⁸ Ac | 40 | 1588.27 | 519 | 1441 | 1.970 | 1.262E-003 | 7.34 |
| - | 41 | 1592.58 | 639 | 1295 | 1.971 | 1.555E-003 | 6.13 |
| ²¹² Bi | 42 | 1620.76 | 318 | 1583 | 2.112 | 7.734E-004 | 22.48 |
| - | 43 | 1630.81 | 432 | 1978 | 2.116 | 1.050E-003 | 20.45 |
| - | 44 | 1661.09 | 281 | 1362 | 1.993 | 6.829E-004 | 37.34 |
| ²¹⁴ Bi | 45 | 1729.76 | 661 | 1412 | 2.050 | 1.609E-003 | 5.95 |
| ²¹⁴ Bi | 46 | 1764.67 | 3951 | 1445 | 2.232 | 9.610E-003 | 4.50 |
| ²¹⁴ Bi | 47 | 1847.72 | 544 | 1111 | 2.338 | 1.324E-003 | 6.68 |
| - | 48 | 2103.93 | 1300 | 1218 | 2.936 | 3.161E-003 | 10.74 |
| ²¹⁴ Bi | 49 | 2118.84 | 291 | 819 | 1.917 | 7.076E-004 | 10.27 |
| ²¹⁴ Bi | 50 | 2204.49 | 1391 | 1278 | 2.432 | 3.383E-003 | 8.92 |
| ²¹⁴ Bi | 51 | 2448.27 | 449 | 729 | 2.440 | 1.092E-003 | 6.93 |
| ²⁰⁸ Tl | 52 | 2615.15 | 10224 | 459 | 2.620 | 2.486E-002 | 1.76 |

Errors quoted at 1.00 sigma

Tabelle D.34.: Analysenblatt Gammaskpektrometrie Leerwert Pfingsten 2007, Messung L1