

Die Vergleichsmessungen 1999 und 2000 für Radongasmessgeräte am PSI

Christoph Schuler und Gernot Butterweck

Abteilung Strahlenschutz, Sicherheit und Entsorgung
Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI

Oktober 2000

Zusammenfassung

Im Referenzlabor für Radongas-Konzentrationsmessungen des PSI, welches der Eichstelle für Strahlenschutzmessgeräte des PSI angegliedert und seit 1997 vom Eidgenössischen Amt für Messwesen akkreditiert ist, werden zur Überprüfung von Rückverfolgbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messresultaten Vergleichsmessungen durchgeführt. Kandidaten für die Teilnahme an diesen Vergleichsmessungen sind Firmen, Institutionen oder Privatpersonen, welche die Anerkennung des Bundesamtes für Gesundheit als Radongasmessstelle besitzen und deshalb nachweisen müssen, dass die geforderte Rückverfolgbarkeit der Messresultate auf national oder international anerkannte Normale und eine genügende Reproduzierbarkeit gewährleistet sind.

Die Resultate von Messungen mit Elektret-Ionisationskammern, Kernspurdetektoren und Messinstrumenten für Radongas-Konzentrationen bei der Vergleichsmessung 1999 vom 29. Sept. bis 6. Okt. 1999 und bei der Vergleichsmessung 2000 vom 21. bis 28. März 2000 belegen den schon in früheren Vergleichsmessungen festgestellten hohen Qualitätsstand mit ausgezeichneter Rückverfolgbarkeit und Reproduzierbarkeit der Resultate.

Ausreisserresultate bei den Elektret-Ionisationskammermessungen bei der Vergleichsmessung 1999 mit einer hohen Luftfeuchte während der Exposition deuten auf einen unter Umständen gravierenden Einfluss dieses Umweltparameters auf das Messresultat von Elektret-Ionisationskammern hin.

Bei der Vergleichsmessung 2000 zeigten sich bei älteren Geräten eines bestimmten elektronischen Messgerätetyps Mängel in der Kalibrierung, welche bei hohen Radongas-Konzentrationen Unterschätzungen der Konzentration zur Folge haben. Das Messresultat eines neueren Geräts dieses Typs mit ausgezeichneter Rückverfolgbarkeit demonstriert die erfolgreiche Korrektur der Kalibrierung.

Abstract

This report describes the results of two radon intercomparison exercises performed by the Reference Laboratory for Radon Gas Activity Concentration Measurements at Paul Scherrer Institut during Sep 29th to Oct 6th, 1999, and during March 21st to 28th, 2000.

Radon gas detectors and instruments were exposed in the PSI Radon Chamber in reference atmospheres to 1060 kBqhm⁻³ radon gas exposure at an average radon gas concentration of 6400 Bqm⁻³ and to 2050 kBqhm⁻³ radon gas exposure at an average radon gas concentration of 12500 Bqm⁻³, respectively.

These intercomparison exercises determined the performance of electret ionisation chambers, track etch detectors and measuring instruments at high humidity (1999 Intercomparison Exercise) and at a high radon gas exposure (2000 Intercomparison Exercise).

In the 1999 Intercomparison Exercise, electret ionisation chambers revealed an influence on high humidity. This effect may be due to impurities on a microscopic scale on the electrets of these detectors.

With few exceptions, in both the 1999 and the 2000 Radon Intercomparison Exercise the deviations of the measurement results to the reference radon gas concentration values were less than 15% (traceability criterion) and the standard deviation of the results of five detectors less than 15% (reproducibility criterion).

INHALT

1	EINLEITUNG	1
2	REFERENZ-MESSINSTRUMENTE	1
2.1	Kalibrierung der Referenz-Messinstrumente für Radongas.....	1
3	EXPOSITIONSPARAMETER.....	2
3.1	Dauer von Expositions- und Ausgasungsperiode	2
3.2	Umweltbedingungen in den Vorbereitungsräumen.....	2
3.3	Umweltbedingungen in der Radonkammer	2
3.4	Aerosolbedingungen in der Radonkammer	2
3.5	Resultate der Radongas-Referenzmessungen.....	2
4	VERWENDETE DETEKTOR- UND MESSINSTRUMENTARTEN DER TEILNEHMER	3
5	RESULTATE DER VERGLEICHSMESSUNGEN.....	3
6	DISKUSSION DER RESULTATE DER VERGLEICHSMESSUNGEN	4
6.1	Radongas-Referenzmessungen	4
6.2	Teilnehmerresultate der Vergleichsmessung 1999	4
6.2.1	Elektret-Ionisationskammern	4
6.2.2	Kernspurdetektoren	5
6.2.3	Messgeräte	5
6.3	Teilnehmerresultate der Vergleichsmessung 2000	5
6.3.1	Elektret-Ionisationskammern	5
6.3.2	Reproduzierbarkeit der Spannungsbestimmung von Elektret- Ionisationskammern	5
6.3.3	Kernspurdetektoren	6
6.3.4	Messgeräte	6
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	7
7.1	Vergleichsmessung 1999	7
7.2	Vergleichsmessung 2000	7
8	LITERATUR.....	8

TABELLEN

Tabelle 1: Vergleichsmessung 1999 - Liste der Teilnehmer.....	9
Tabelle 2: Vergleichsmessung 2000 - Liste der Teilnehmer.....	10
Tabelle 3: Vergleichsmessung 1999 - Daten.....	11
Tabelle 4: Vergleichsmessung 2000 - Daten.....	12
Tabelle 5: Vergleichsmessung 1999 - Expositionsparameter in der Radon- kammer 29.09.99 13:30 - 06.10.99 11:05	13
Tabelle 6: Vergleichsmessung 2000 - Expositionsparameter in der Radon- kammer 21.03.00 13:35 – 28.03.00 9:43.....	13
Tabelle 7: Vergleichsmessung 1999 - Unsicherheitsabschätzung zu den Resultaten der Radongas-Referenzmessungen in Bqm^{-3}	14
Tabelle 8: Vergleichsmessung 2000 - Unsicherheitsabschätzung zu den Resultaten der Radongas-Referenzmessungen in Bqm^{-3}	14
Tabelle 9: Vergleichsmessung 1999 - Verwendete Detektoren und Messinstrumente	15
Tabelle 10: Vergleichsmessung 2000 - Verwendete Detektoren und Messinstrumente	17
Tabelle 11: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Elektret-Ionisations- kammern.....	19
Tabelle 12: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Elektret- Ionisationskammern	21
Tabelle 13: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Kernspur- detektoren.....	23
Tabelle 14: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Kernspur- detektoren.....	25
Tabelle 15: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Messgeräte	27
Tabelle 16: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Messgeräte	28
Tabelle 17: Vergleichsmessung 2000 – Vergleich von Spannungsablesungen von Elektreten.....	29

FIGUREN

Figur 1: Vergleichsmessung 1999 – Lufttemperatur und relative Luftfeuchte ..	30
Figur 2: Vergleichsmessung 2000 – Lufttemperatur und relative Luftfeuchte ..	31
Figur 3: Vergleichsmessung 1999 – Radonkonzentration in der Kammer.....	32
Figur 4: Vergleichsmessung 2000 – Radonkonzentration in der Kammer.....	33
Figur 5: Vergleichsmessung 1999 – Resultate Elektret-Ionisationskammern...	34
Figur 6: Vergleichsmessung 2000 – Resultate Elektret-Ionisationskammern...	35
Figur 7: Vergleichsmessung 1999 – Resultate Kernspurdetektoren.....	36
Figur 8: Vergleichsmessung 2000 – Resultate Kernspurdetektoren.....	37
Figur 9: Vergleichsmessung 1999 – Mittelwerte Elektret-Ionisations- kammern.....	38
Figur 10: Vergleichsmessung 2000 – Mittelwerte Elektret-Ionisations- kammern.....	39
Figur 11: Vergleichsmessung 1999 – Mittelwerte Kernspurdetektoren	40
Figur 12: Vergleichsmessung 2000 – Mittelwerte Kernspurdetektoren	41
Figur 13: Vergleichsmessung 1999 – Resultate Messgeräte	42
Figur 14: Vergleichsmessung 2000 – Resultate Messgeräte	43

1 EINLEITUNG

Gemäss den vom Eidgenössischen Amt für Messwesen (EAM) am 6. Mai 1996 erlassenen „Weisungen über die Rückführbarkeit (Traceability) von Radongas-Konzentrationsmessungen“ (EAM 1996) führt das Referenzlabor für Radongas-Konzentrationsmessungen am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen jährlich eine Vergleichsmessung von Radon-Detektoren und -Messgeräten durch, um die Rückverfolgbarkeit der Messsysteme, welche die vom Bundesamt für Gesundheit (BAG) anerkannten Messstellen verwenden, auf nationale und internationale Normale zu überprüfen.

Die Vergleichsmessung 1999 für Radongasdetektoren und -messgeräte in der Radonkammer des Referenzlabors fand vom 29. Sept. bis 6. Okt. 1999 statt. Sechzehn Privatpersonen, Firmen oder Institutionen (Tab. 1) mit total 119 Detektoren und 7 Messgeräten nahmen teil. Die 16 Teilnehmer der vom 21. bis 28. März 2000 durchgeführten Vergleichsmessung 2000 (Tab. 2) beteiligten sich mit total 136 Detektoren und 9 Messgeräten.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse dieser Vergleichsmessungen.

2 REFERENZ-MESSINSTRUMENTE

Als Referenzmessinstrumente zur punktwisen Bestimmung der Radongas-Aktivitätskonzentration in der Radonkammer werden Szintillationszellen (Lucaszellen) verwendet (Model 300A, Pylon Electronic Development, Ottawa (CAN)). Eine solche Zelle verbunden mit einem Szintillationszähler bildet ein sogenanntes Transfornormal I. Für die automatisierte Probenahme der Radonkammer-Atmosphäre kommen am PSI-Referenzlabor drei Transfornormale I zum Einsatz. Für die Punktmessung der Radongas-Konzentration mit diesen Transfornormalen wird eine 20-minütige Füllung der Szintillationszelle eines Transfornormals zeitlich versetzt im Abstandszyklus 100, 100, 120, 100, 100, 120,... Minuten vorgenommen. Auf diese Weise resultierten für die beiden Vergleichsmessungen je total 93 Punktmessungen.

Der Radongas-Pegel in der Radonkammer wird zusätzlich mit einer Durchflussionisationskammer registriert (ATMOS-12 DPX, Gammadata Mättechnik, Uppsala (S)).

2.1 Kalibrierung der Referenz-Messinstrumente für Radongas

Um die Rückverfolgbarkeit der Referenzatmosphäre in der Radonkammer während der beiden Vergleichsmessungen auf international anerkannte Normale zu gewährleisten, wurden die Szintillationszellen mit einem Radongas-Standard der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), D, kalibriert (Schuler 1998). Die Qualität dieser Kalibrierung wurde mit einer zweiten Kalibrierung mit einer Ra-Lösung (NIST SRM 4965) bestätigt.

Die Durchflussionisationskammer wurde indirekt über Vergleichsmessungen mit den Szintillationszellen kalibriert.

3 EXPOSITIONSPARAMETER

3.1 Dauer von Expositions- und Ausgasungsperiode

Beginn und Ende von Expositions- und Ausgasungsperiode sind für die Vergleichsmessung 1999 in Tab. 3 und für die Vergleichsmessung 2000 in Tab. 4 festgehalten. Eine Ausgasungsdauer von ungefähr 24 Stunden im Anschluss an die Exposition in der Radonkammer verhindert, dass die exponierten Detektoren nachträglich eine zusätzliche Exposition registrieren, wie das bei Einschluss der Detektoren in die Verpackungsbeutel unmittelbar nach der Exposition geschehen würde.

3.2 Umweltbedingungen in den Vorbereitungsräumen

Die für die Exposition vorgesehenen Detektoren wurden im Raum A997 gelagert. Die Vorbereitung für die Exposition (Registrierung der Detektornummer und Kennzeichnung der Plazierungsstelle auf dem Tisch in der Radonkammer während der Exposition) erfolgte in den Räumen A997 und 104. Für beide Räume erscheinen in den Tabellen 3 und 4 die Daten von Radonkonzentrations-, Temperatur- und Feuchtemessungen. Die Resultate der für die Korrektur der Messdaten von Elektret-Ionisationskammern notwendigen Messungen der γ -Dosisleistung sind ebenfalls in den Tabellen 3 und 4 angegeben.

3.3 Umweltbedingungen in der Radonkammer

Die Tabellen 5 und 6 führen die Ergebnisse der Messungen der Umweltparameter in der Radonkammer während der jeweiligen Exposition auf. Den Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf während der Vergleichsmessung 1999 bzw. 2000 zeigt Fig. 1 bzw. Fig. 2.

3.4 Aerosolbedingungen in der Radonkammer

Bei den Vergleichsmessungen 1999 und 2000 wurden wie schon in früheren Jahren Detektoren vom Typ „Kernspurdetektor offen“ (siehe Anhang 2 des BAG-Gesuchs zur Anerkennung von Radongas-Messstellen) eingesetzt (Code 9 in Tab. 9 bzw. Code 3 in Tab. 10). Diese Detektoren funktionieren nur ab einer bestimmten Partikelkonzentration und werden aus diesem Grunde in teilchenhaltigen Referenzatmosphären kalibriert. In der PSI-Kammer wurde deshalb bei beiden Vergleichsmessungen ein Kerzen-Aerosol erzeugt mit dem Zweck, die üblicherweise vorhandene, extrem an Zerfallsprodukten abgereicherte Atmosphäre in der Kammer durch eine mit luftgetragenen Zerfallsprodukten in genügender Anzahl zu ersetzen.

3.5 Resultate der Radongas-Referenzmessungen

Der Referenzwerte für die Radongas-Konzentration in der Radonkammer während der Vergleichsmessung 1999 (Tab. 5) und 2000 (Tab. 6) basieren auf dem gewichteten Durchschnittswert von je 93 Punktbestimmungen mit je drei Transfernormalen I (Tab. 7 und Tab. 8). Aus dem Radongas-Konzentrationswert wur-

de der entsprechende Expositionswert abgeleitet. In Fig. 3 sind die Resultate der Radongas-Referenzmessungen während der Vergleichsmessung 1999 dargestellt. Die Resultate der Radongas-Referenzmessungen während der Vergleichsmessung 2000 sind in Fig. 4 abgebildet.

Die 93 Konzentrationsbestimmungen pro Vergleichsmessung wurden als unabhängige Einzelbestimmungen betrachtet, welche in einem Durchschnittswert zusammengefasst werden können. Die Unsicherheit dieses Durchschnitts wird dann durch Gauss'sche Fehlerfortpflanzung der Unsicherheiten der Einzelwerte erhalten (Schuler 1998). Angaben zur Unsicherheitsabschätzung der Resultate der Radongas-Konzentrationsbestimmungen erscheinen für 1999 in Tab. 7 und für 2000 in Tab. 8.

4 VERWENDETE DETEKTOR- UND MESSINSTRUMENTARTEN DER TEILNEHMER

Den Teilnehmern der Vergleichsmessung wurden wie üblich je nach Anzahl der exponierten Detektorgruppen oder Messgeräte ein oder mehrere Codes zugeteilt. Diese Codes sowie der verwendete Detektor- bzw. Messgerättyp sind in Tab. 9 für die Vergleichsmessung 1999 und in Tab. 10 für die Vergleichsmessung 2000 aufgeführt. Gemäss Auflage der Verfügung für die Anerkennung einer Radongas-Messstelle durch das BAG enthalten die Tabellen 9 und 10 auch die Namen der Messstellen, welche zum Zeitpunkt der Teilnahme an der Vergleichsmessung vom BAG anerkannt waren, sowie Produkt und Hersteller des Messsystems, für das die Anerkennung Gültigkeit hat.

5 RESULTATE DER VERGLEICHSMESSUNGEN

Die Tabellen 11, 13 und 15 für 1999 bzw. die Tabellen 12, 14 und 16 für 2000 führen die Teilnehmerresultate für Elektret-Ionisationskammern, Kernspurdetektoren und Messgeräte auf. In den Tabellen 11 - 14 sind die gemeldeten Einzelresultate nach Detektorbezeichnung aufsteigend in alphanumerischer Reihenfolge geordnet angegeben und zusätzlich noch mit einem Detektorcode versehen. Die Tabellen 11 - 16 enthalten auch das Verhältnis Messwert/Referenzwert pro Detektor oder Messgerät sowie Mittelwert und Standardabweichung dieser Verhältnisse. In den Figuren 5 - 8 sind die Einzelverhältnismittelwerte und in den Figuren 9 - 14 die Verhältnismittelwerte sowie deren Standardabweichung pro Teilnehmercode dargestellt.

Gemäss Formular „Anerkennung als Radonmessstelle“ des BAG ist die Rückverfolgbarkeit von Messresultaten erfüllt, wenn der Mittelwert der Detektorresultate bei Teilnahme an einer Vergleichsmessung in der PSI-Radonkammer nicht mehr als $\pm 15\%$ vom Referenzwert abweicht. In den Figuren 5 - 14 wurden deshalb zur Illustration dieser Grenzen bei $+ 17\%$ und bei $- 17\%$ Linien eingetragen ($\pm 2\%$ für den 1σ -Bereich der Unsicherheit des Referenzwertes [siehe Tab. 7 und Tab. 8] plus $\pm 15\%$).

6 DISKUSSION DER RESULTATE DER VERGLEICHSMESSUNGEN

6.1 Radongas-Referenzmessungen

Die Figuren 3 und 4 zeigen den Verlauf des Radongas-Konzentrationspegels während der Expositionsperiode der jeweiligen Vergleichsmessung. Da die Problematik der zeitweise ausfallenden PC-Steuerung des Radongaspegels in der Radonkammer (Butterweck und Schuler 1995) mittels einer grundlegenden Revision der Software eliminiert werden konnte, traten keine starken Schwankungen des Pegels wie bei den Vergleichsmessungen 1997 (Schuler und Butterweck-Dempewolf 1998) und 1998 (Schuler und Butterweck-Dempewolf 1999) mehr auf.

6.2 Teilnehmerresultate der Vergleichsmessung 1999

6.2.1 Elektret-Ionisationskammern

Achtzehn Prozent der Einzelmessresultate liegen in Fig. 5 ausserhalb des $\pm 17\%$ -Bereichs um den Sollwert. Drei Messresultate (Code 3 und Code 6) mit Messwert/Sollwert-Faktoren > 1.4 müssen dabei als „Ausreisser“ bezeichnet werden. Eine Interpretation dieser Datenpunkte ist schwierig. Die Ursache für das Zustandekommen der stark überhöhten Messresultate kann aber möglicherweise im Zusammentreffen von zwei Umständen liegen.

Es ist bekannt, dass die Leitfähigkeit von Elektret-Verschmutzungen in Form feinsten Schmutzfilme oder Faserkomponenten von der relativen Luftfeuchte abhängt (Genrich 1995). So wirken sich derartige Verschmutzungen bei niedriger Luftfeuchte gar nicht oder nur sehr gering aus. Liegt aber die relative Luftfeuchtigkeit wie bei der Vergleichsmessung 1999 fast durchgehend über 80%, so können sich Verschmutzungen auf das Messresultat auswirken. Das Vorhandensein von (makroskopisch nicht feststellbaren) Verschmutzungen und die hohe Luftfeuchtigkeit während der Exposition kann also die anormale Oberflächenentladung der Elektrete bewirkt haben.

Ein Widerspruch für diese Hypothese mag allerdings in der Tatsache liegen, dass die Elektret-Ionisationskammer-Messresultate der übrigen Teilnehmer solche ausgeprägte Effekte nicht zeigen. Die Einzelmessresultate von Code 22 fallen sogar durch eine ausserordentlich geringe Streuung auf.

Aus Fig. 9 ist ersichtlich, dass die Mittelwerte der Elektret-Detektorresultate mit Ausnahme von Code 3 und Code 6 das Rückverfolgbarkeitskriterium (Abschnitt 5) erfüllen.

Wird wie üblich für die PSI-Vergleichsmessungen die Standardabweichung des Mittelwerts als Mass für die Reproduzierbarkeit von Einzelmessresultaten angesehen (DIN 1989), so erfüllen 6 der 8 Resultate der Elektret-Ionisationskammern das Reproduzierbarkeitskriterium. Die Standardabweichung dieser Detektorresultate liegt mit Werten zwischen 1% und 9% (Tab. 11) unterhalb der vom BAG verlangten 15%.

6.2.2 Kernspurdetektoren

Bei den Einzelmessresultaten der Kernspurdetektoren (Fig. 7) ist der Anteil der Resultate, welche ausserhalb des $\pm 17\%$ -Bereichs liegen, mit 9% gering. Für die ausgeprägte Abweichung eines Einzelmessresultats von Code 18 liegt weder von Hersteller- noch von Messstellenseite eine Erklärung vor.

Damit wird das Rückverfolgbarkeitskriterium (Abschnitt 5) von allen Messstellen, welche sich mit Kernspurdetektoren an der Vergleichsmessung 1999 beteiligten, erfüllt (Fig. 11), das Reproduzierbarkeitskriterium (Streuung der Einzelmesswerte $< 15\%$) aber von einem Teilnehmerresultat nicht erfüllt (Code 18 in Fig. 11).

6.2.3 Messgeräte

Die Resultate der Messgeräte erscheinen in Tab. 15 und Fig. 13. An Stelle der Standardabweichung des Expositionsmittelwerts wurde wie üblich die „systematische“ Unsicherheit (u_B) des Messresultats eingesetzt (Tab. 15 und Fig. 13), welche die Kalibrierunsicherheit eines Messinstruments einbezieht. Es ist wie schon bei früheren Vergleichsmessungen keine signifikante Abweichung der Messresultate der elektronischen Messgeräte vom Referenzwert zu verzeichnen.

6.3 Teilnehmerresultate der Vergleichsmessung 2000

6.3.1 Elektret-Ionisationskammern

Wie Fig. 6 illustriert, liegt bei den Einzelmessresultaten der Elektret-Ionisationskammern nur ein Resultat ausserhalb des $\pm 17\%$ -Bereichs um den Sollwert. Bei diesem Resultat handelt es sich jedoch um dasjenige einer Ionisationskammer mit Kurzzeitelektret (ST). Obwohl laut Mitteilung des Teilnehmers die Kurzzeitelektrets seiner Detektoren (Code 20) infolge der hohen Exposition bei der Vergleichsmessung 2000 vollständig entladen waren und deshalb nur „Minimalwerte“ gemeldet werden konnten, zeigt Fig. 10, dass der Mittelwert der Detektoren noch innerhalb des akzeptablen Bereichs um den Sollwert liegt.

Die Streuung der Einzelmessresultate ist mit 2% bis 6% sehr gering (Tab. 12 und Fig. 10). Damit erfüllen alle Teilnehmer mit Elektret-Ionisationskammern sowohl das Rückverfolgbarkeits- als auch das Reproduzierbarkeitskriterium (Streuung der Einzelmesswerte $< 15\%$).

6.3.2 Reproduzierbarkeit der Spannungsbestimmung von Elektret-Ionisationskammern

Infolge eines Fehlers des PSI (Adressenverwechslung durch CS) bei der Versendung der Detektoren an die Teilnehmer nach der Vergleichsmessung 2000 gelangten die 7 Detektoren eines Teilnehmers (Code 27) zu einer falschen Messstelle. Diese nahm in der Folge im Glauben, es handle sich um die eigenen retournierten Detektoren, eine Spannungsbestimmung vor. Anschliessend wurde der Irrtum bemerkt und die Detektoren dem Eigentümerlabor zuge-

stellt, welches seinerseits eine Spannungsablesung durchführte. Die Resultate dieser Spannungsbestimmungen sind in Tab. 17 aufgeführt.

Tab. 17 zeigt, dass die Differenz in den Endspannungsablesungen der beiden Messstellen nur maximal 2 Volt beträgt. Offensichtlich hatte die vorgängige Ableseung durch die Messstelle Y keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Endablesung durch die Messstelle mit Code 27. In Anbetracht dieses Befundes konnten die Messresultate des betroffenen Teilnehmers trotz der zweifachen Endablesung als für die Vergleichsmessung 2000 gültig betrachtet werden.

In positiver Hinsicht lässt sich die Folge dieser Verwechslung dahingehend deuten, dass die Reproduzierbarkeit von Spannungsablesungen von Elektreten auch bei Ableseung mit verschiedenen Lesegeräten und durch verschiedene OperatorInnen sehr gut ist.

6.3.3 Kernspurdetektoren

Bei den Einzelmessresultaten der Kernspurdetektoren liegt nur ein Resultat ausserhalb des $\pm 17\%$ -Bereichs um den Sollwert (Fig. 8). Sowohl Rückverfolgbarkeits- als auch Reproduzierbarkeitskriterium werden durch die Resultate der Kernspurdetektoren erfüllt (Tab. 14 und Fig. 12).

Allerdings fällt bei Vergleich der Resultate dieser Vergleichsmessung mit den Resultaten früherer Vergleichsmessungen auf (siehe auch Fig. 11), dass alle Kernspurdetektor-Mittelwerte in Fig. 12 ein Messwert/Sollwertverhältnis < 1 aufweisen. Möglicherweise zeigt sich bei einzelnen Kernspurdetektortypen bei der hohen Exposition der Vergleichsmessung 2000 schon eine Empfindlichkeitsabnahme der Detektoren infolge Spurenübersättigung.

6.3.4 Messgeräte

Den Resultaten der an der Vergleichsmessung 2000 teilnehmenden Messgeräte wurde wiederum die „systematische“ Unsicherheit (u_B) zugeordnet. Fig. 14 zeigt die Messwert/Sollwert-Verhältnisse. Bei einem Vergleich von Fig. 14 mit Fig. 13 fällt auf, dass die Messwerte bei der Vergleichsmessung 2000 in einigen Fällen signifikant unterhalb des Sollwerts liegen. Mit Ausnahme von Code 8 handelt es sich bei den Messgeräten, welche an der Vergleichsmessung 2000 teilnahmen, um den gleichen Messgerätetyp (Typ „Ionisationskammer“; Tab. 10). Mit Kenntnis der Geräte-Seriennummern und unter Beachtung früherer Messresultate des selben Messgerätetyps bei Vergleichsmessungen am PSI lässt sich aus den Resultaten in Fig. 14 schliessen, dass bei diesem Messgerätetyp die Qualität der Kalibrierung für Radongaskonzentrationen oberhalb 10 kBq m^{-3} bei älteren Geräten nicht genügend ist, dieser Mangel bei den neueren Geräten mit hoher Seriennummer (Code 18) vom Hersteller aber eliminiert wurde.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

7.1 Vergleichsmessung 1999

Die Exposition während der Vergleichsmessung 1999 war durch eine sehr hohe Luftfeuchte in der Radonkammer gekennzeichnet. Ungenügende Rückverfolgbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte von zwei Messstellen deuten daraufhin, dass sich die hohe Feuchtigkeit möglicherweise negativ auf die Messresultate von Elektret-Ionisationskammern ausgewirkt haben könnte. Dieser Eindruck wird andererseits durch die ausgezeichneten Messresultate anderer mit Elektret-Ionisationskammern beteiligter Messstellen widerlegt.

Auf die Messresultate von Kernspurdetektoren scheint eine hohe Luftfeuchte bei der Exposition keinen Einfluss zu haben, denn die Resultate erfüllen alle das Rückverfolgbarkeitskriterium. Nur bei den Resultaten einer Messstelle ist die Reproduzierbarkeit ungenügend.

Bei den Messresultaten der elektronischen Radongasmessgeräte ist wie in früheren Jahren wiederum eine ausgezeichnete Rückverfolgbarkeit auf national und international anerkannte Normale zu beobachten.

7.2 Vergleichsmessung 2000

Bei der Vergleichsmessung 2000 mit einem hohen Expositionswert werden sowohl Rückverfolgbarkeits- als auch Reproduzierbarkeitskriterium von den Resultaten aller Teilnehmer, welche sich mit Elektret-Ionisationskammern oder Kernspurdetektoren beteiligten, erfüllt, sodass wie schon bei früheren Vergleichsmessungen am PSI den Messstellen eine hohe Qualität der Messresultate attestiert werden kann. Dies gilt auch für die Resultate der Messinstrumente.

Eine zwar noch genügende, aber qualitativ abfallende Rückverfolgbarkeit der Messresultate von elektronischen Messgeräten des Typs Ionisationskammer lässt auf Mängel in der Kalibrierung älterer Geräte schließen, welche bei Messung von Radongaskonzentrationen oberhalb von 10 kBq m^{-3} zu einer Unterschätzung der Konzentration führen.

8 LITERATUR

Butterweck, G.; Schuler, Ch.

The PSI Radon Chamber Model

Villigen: Paul Scherrer Institut; PSI-Rep. Nr. 95-02; 1995.

DIN Deutsches Institut für Normung

Grundbegriffe der Messtechnik - Begriffe für die Messunsicherheit und für die Beurteilung von Messgeräten und Messeinrichtungen

Berlin: Beuth Verlag; DIN-Taschenbuch 223: Qualitätssicherung und angewandte Statistik - Begriffe: DIN 1319 Teil 3; 1989.

EAM Eidgenössisches Amt für Messwesen

Weisungen über die Rückführbarkeit (Traceability) von Radongaskonzentrationsmessungen

Wabern: Eidgenössisches Amt für Messwesen; 6. Mai 1996.

Genrich, V.

Genitron Anwenderberatung für E-PERM im BAG

Bericht zuhanden des Bundesamtes für Gesundheit

Frankfurt am Main (D): Genitron Instruments GmbH; Sept. 1995.

Schuler, Ch.

Das Referenzlabor für Radongas-Konzentrationsmessungen am PSI

Villigen: Paul Scherrer Institut; PSI-Bericht Nr. 98-08; 1998.

Schuler, Ch.; Butterweck-Dempewolf, G.

Die Vergleichsmessung 1997 für Radongasmessgeräte am PSI

Villigen: Paul Scherrer Institut; PSI-Bericht Nr. 98-05; 1998.

Schuler, Ch.; Butterweck-Dempewolf, G.

Die Vergleichsmessung 1998 für Radongasmessgeräte am PSI

Villigen: Paul Scherrer Institut; PSI-Bericht Nr. 99-01; 1999.

**Tabelle 1: Vergleichsmessung 1999 -
Liste der Teilnehmer**

Altrac Radon-Messtechnik
Hr. Dr. A. Guhr
Dorothea-Viehmann-Str. 28
D-12524 **Berlin**

Beratender Geologe/Hydrogeologe
Hr. Ch. Böhm-Bläuer
Obere Gasse 40
7000 **Chur**

Bundesamt für Gesundheit
Hr. W. Gfeller
Fachstelle Radon und Abfälle
3003 **Bern**

Geotest AG
Hr. Dr. J. Abrecht
Birkenstr. 15
3052 **Zollikofen**

GSF Forschungszentrum
Hr. Dr. Th. Haninger
Auswertungsstelle Radon-Messservice
D-85761 **Neuherberg**

G+S applicazioni SA
Hr. F. Lotti
Via Brunari 3
6500 **Bellinzona**

Institut de Radiophysique Appliquée
Hr. Th. Buchillier
Grand-Pré 1
1007 **Lausanne**

Im Rank Engineering
Hr. St. Miller
Regensdorferstr./Im Rank
8104 **Weiningen**

Kantonales Laboratorium Kt. Luzern
Hr. Dr. Th. Kaufmann
Vonmattstr. 16
6002 **Luzern**

Kantonales Laboratorium Kt. Thurgau
Hr. H. Toggenburger
Spannerstr. 20
8510 **Frauenfeld**

Laboratorio Cantonale Ct. Ticino
Hr. S. Montorfani
Via Ospedale 6
6904 **Lugano**

ökoscience Lufthygiene AG
Hr. Dr. St. Scherer
Quellenstr. 31
8031 **Zürich**

Strahlenschutz Beratung und Planung
Hr. Dr. R. Müller
Rebgasse 23
4102 **Binningen**

Suva
Hr. Dr. A. Werthmüller
Fluhmattstr. 1
6002 **Luzern**

TCI Transcommerce International AG
Hr. D. Ebricht
Zürichstr. 135
8700 **Küsnacht**

Uehlinger-Pfiffner AG
Hr. A. Uehlinger
Picardiestr. 3
5040 **Schöftland**

**Tabelle 2: Vergleichsmessung 2000 -
Liste der Teilnehmer**

Altrac Radon-Messtechnik
Hr. Dr. A. Guhr
Dorothea-Viehmann-Str. 28
D-12524 **Berlin**

Beratender Geologe/Hydrogeologe
Hr. Ch. Böhm-Bläuer
Obere Gasse 40
7000 **Chur**

Bundesamt für Gesundheit
Hr. W. Gfeller
Fachstelle Radon und Abfälle
3003 **Bern**

Centre Universitaire de Luxembourg
Hr. Dr. A. Kies
162A, Avenue de la Faiencerie
L-1511 **Luxembourg**

Geotest AG
Hr. Dr. J. Abrecht
Birkenstr. 15
3052 **Zollikofen**

GSF Forschungszentrum
Hr. Dr. Th. Haninger
Auswertungsstelle Radon-Messservice
D-85761 **Oberschleissheim**

G+S applicazioni SA
Hr. F. Lotti
Via Brunari 3
6500 **Bellinzona**

Institut de Radiophysique Appliquée
Hr. Th. Buchillier
Grand-Pré 1
1007 **Lausanne**

Im Rank Engineering
Hr. St. Miller
Regensdorferstr./Im Rank
8104 **Weiningen**

Kantonales Laboratorium Kt. Luzern
Hr. Dr. Th. Kaufmann
Vonmattstr. 16
6002 **Luzern**

Kantonales Laboratorium Kt. Thurgau
Hr. H. Toggenburger
Spannerstr. 20
8510 **Frauenfeld**

Laboratorio Cantonale Ct. Ticino
Hr. S. Montorfani
Via Ospedale 6
6904 **Lugano**

ökoscience Lufthygiene AG
Hr. Dr. St. Scherer
Quellenstr. 31
8031 **Zürich**

Strahlenschutz Beratung und Planung
Hr. Dr. R. Müller
Rebgasse 23
4102 **Binningen**

TCI Transcommerce International AG
Hr. D. Ebricht
Zürichstr. 135
8700 **Küsnacht**

Uehlinger-Pfiffner AG
Hr. A. Uehlinger
Picardiestr. 3
5040 **Schöftland**

Tabelle 3: Vergleichsmessung 1999 - Daten**Dauer der Expositionsperiode:**

Ende der Vergleichsmessung 06.10.99 11:05
 Start der Vergleichsmessung 29.09.99 13:30

Expositionsdauer in h 165.58

Dauer der Ausgasperiode:

Ende Ausgasung 07.10.99 13:30
 Start Ausgasung 06.10.99 11:05

Ausgasdauer in h 26.42

Messungen der Umweltparameter in den Vorbereitungsräumen A997 und 104:

Ort	Start	Ende	Rn-Konz. [Bqm ⁻³]	Temp. [°C]	Feuchte Bem. [%RH]	
A997	27.09.99 11:53	28.09.99 14:02	21 ± 5	23	60	
104	28.09.99 14:05	28.09.99 17:45	10 ± 6	24	57	
A997	28.09.99 17:45	29.09.99 12:00	18 ± 3	23	59	
A997	06.10.99 16:00	07.10.99 12:00	24 ± 6	22	50	Ausgasung

Messungen γ -Dosisleistungen mit Automess AD2 S/N 67443

Ort	Start	Ende	Dauer [h]	D [nSv]	DL [nSv/h]	Bem.
A997	28.09.99 09:45	29.09.99 13:00	27.25	1000	37	
Rn-Kammer	29.09.99 13:30	06.10.99 11:05	165.58	27000	163	
A997	07.10.99 13:30	11.10.99 09:45	92.25	5000	54	Ausgasung

LC-Füllungen:

Konsequente Füllung einer LC nach dem Schema	TN #	Δt (Min.)	
	TN #515		0
	TN #539		100
	TN #576		100
	TN #515		120
	TN #539		100
	TN #576		100
	TN #515		120
			usw.

Tabelle 4: Vergleichsmessung 2000 - Daten**Dauer der Expositionsperiode:***Alle Zeiten WZ!*

Ende Vergleichsmessung 28.03.00 09:43

Start Vergleichsmessung 21.03.00 13:35

Expositionsdauer in h 164.13

Dauer der Ausgasperiode:

Ende Ausgasung 29.03.00 14:30

Start Ausgasung 28.03.00 09:43

Ausgasdauer in h 28.78

Messungen der Umweltparameter in den Vorbereitungsräumen A997 und 104:

Ort	Start	Ende	Rn-Konz. [Bqm ⁻³]	Temp. [°C]	Feuchte [%RH]	Bem.
A997	16.03.00 10:37	21.03.00 09:37	33 ± 8	23	32	
104	17.03.00 14:27	20.03.00 12:27	25 ± 10	21	42	
A997	28.03.00 13:49	29.03.00 11:49	31 ± 5	21	38	Ausgasung

Messungen γ -Dosisleistungen mit Automess AD4 S/N 70811:

Ort	Start	Ende	Dauer [h]	D [nSv]	DL [nSv/h]	Bem.
A997	17.03.00 13:25	21.03.00 10:30	93.08	5590	60	
Rn-Kammer	21.03.00 13:35	28.03.00 09:43	164.13	34100	208	
A997	28.03.00 10:00	29.03.00 14:30	28.50	1580	55	Ausgasung

LC-Füllungen:

Konsequente Füllung einer LC nach dem Schema	TN #515	Δt (Min.)	0
	TN #539		100
	TN #576		100
	TN #515		120
	TN #539		100
	TN #576		100
	TN #515		120
			usw.

**Tabelle 5: Vergleichsmessung 1999 - Expositionsparameter in der Radonkammer 29.09.99
13:30 - 06.10.99 11:05**

Rn-Konzentration [Bqm ⁻³]	Rn- Exposition [kBqhm ⁻³]	Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	γ-Dosis- leistung [nSv/h]
Referenzwert (Durchschnitt von 93 Punkt- bestimmungen der Rn-Konz.)				
6384 ± 296	1057 ± 49	22 ± 1	75 ± 6	163

**Tabelle 6: Vergleichsmessung 2000 - Expositionsparameter in der Radonkammer 21.03.00
13:35 – 28.03.00 9:43**

Rn-Konzentration [Bqm ⁻³]	Rn- Exposition [kBqhm ⁻³]	Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	γ-Dosis- leistung [nSv/h]
Referenzwert (Durchschnitt von 93 Punkt- bestimmungen der Rn-Konz.)				
12517 ± 580	2054 ± 95	20 ± 1	76 ± 7	208

Tabelle 7: Vergleichsmessung 1999 - Unsicherheitsabschätzung zu den Resultaten der Radongas-Referenzmessungen in Bqm⁻³

Messung mit Transfornormal:	TN #515	TN #539	TN #576
Durchschnitt der Punktbestimmungen:	6407	6367	6382
„Statistische“ Unsicherheit (u_A):	12	11	11
„Systematische“ Unsicherheit (u_B):	97	87	96
Gesamtunsicherheit (u_C):	98	87	97
Gewichteter Durchschnittswert:	6384		
Gesamtunsicherheit des gew. DW (95%-Vertrauensintervall):	296		
Gesamtunsicherheit in %:	4.6		

Tabelle 8: Vergleichsmessung 2000 - Unsicherheitsabschätzung zu den Resultaten der Radongas-Referenzmessungen in Bqm⁻³

Messung mit Transfornormal:	TN #515	TN #539	TN #576
Durchschnitt der Punktbestimmungen:	12571	12493	12492
„Statistische“ Unsicherheit (u_A):	16	17	15
„Systematische“ Unsicherheit (u_B):	190	170	189
Gesamtunsicherheit (u_C):	191	171	189
Gewichteter Durchschnittswert:	12517		
Gesamtunsicherheit des gew. DW (95%-Vertrauensintervall):	580		
Gesamtunsicherheit in %:	4.6		

Tabelle 9: Vergleichsmessung 1999 - Verwendete Detektoren und Messinstrumente

Code	Detektor-/Messgerättyp	Produkt (Hersteller)	BAG-anerkannte Messstelle
<i>Passive Detektoren</i>			
1	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Geotest AG
2	Kernspurdetektor		
3	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Kantonales Laboratorium Kt. Luzern
4	Kernspurdetektor		
6	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Laboratorio Cantonale Ct. Ticino
7	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Uehlinger-Pfiffner AG
8	Kernspurdetektor	Radtrak (Landauer)	TCI Transcommerce International AG
9	Kernspurdetektor offen	Kodalpha (Dosirad)	G+S applicazioni SA
10	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Kantonales Laboratorium Kt. Thurgau
12	Kernspurdetektor	Alpha-Track (Gammadata Mätttechnik)	Uehlinger-Pfiffner AG
14	Kernspurdetektor	Typ B97 (Altrac)	Ökoscience Lufthygiene AG
15	Elektret-Ionisationskammer	LST E-Perm (Rad Elec)	Institut de Radiophysique Appliquée
17	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Institut de Radiophysique Appliquée
18	Kernspurdetektor	Rem AT-100 (Radon Envir. Monitoring)	Im Rank Engineering
20	Kernspurdetektor		
21	Kernspurdetektor		
22	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Ch. Böhm-Bläuer

Fortsetzung Tabelle 9: Vergleichsmessung 1999 - Verwendete Detektoren und Messinstrumente

Code	Detektor-/Messgerättyp	Produkt (Hersteller)	BAG-anerkannte Messstelle
<i>Messgeräte</i>			
5	Elektrostatische Sammlung/Halbleiter-detektor		
11	Ionisationskammer		
13	Durchfluss-Ionisationskammer		
16	Elektrostatische Sammlung/Halbleiter-detektor		
19	Ionisationskammer		
23	Elektrostatische Sammlung/Halbleiter-detektor		
24	Elektrostatische Sammlung/Halbleiter-detektor		

Tabelle 10: Vergleichsmessung 2000 - Verwendete Detektoren und Messinstrumente

Code	Detektor-/Messgerättyp	Produkt (Hersteller)	BAG-anerkannte Messstelle
<i>Passive Detektoren</i>			
2	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Geotest AG
3	Kernspurdetektor offen	Kodalpha (Dosirad)	G+S applicazioni SA
4	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Kantonales Laboratorium Kt. Luzern
5	Kernspurdetektor	Typ B97 (Altrac)	Ökoscience Lufthygiene AG
6	Elektret-Ionisationskammer		
9	Kernspurdetektor		
10	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Laboratorio Cantonale Ct. Ticino
11	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Institut de Radiophysique Appliquée
12	Kernspurdetektor	Alpha-Track (Gammadata Mätttechnik)	Uehlinger-Pfiffner AG
14	Elektret-Ionisationskammer		
15	Kernspurdetektor		
16	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Uehlinger-Pfiffner AG
17	Kernspurdetektor		
19	Kernspurdetektor	Radtrak (Landauer)	TCI Transcommerce International AG
20	Elektret-Ionisationskammer	LST E-Perm (Rad Elec)	Institut de Radiophysique Appliquée
22	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Ch. Böhm-Bläuer
23	Kernspurdetektor		
25	Kernspurdetektor	Rem AT-100 (Radon Envir. Monitoring)	Im Rank Engineering
27	Elektret-Ionisationskammer	LLT E-Perm (Rad Elec)	Kantonales Laboratorium Kt. Thurgau

Fortsetzung Tabelle 10: Vergleichsmessung 2000 - Verwendete Detektoren und Messinstrumente

Code	Detektor-/Messgerättyp	Produkt (Hersteller)	BAG-anerkannte Messstelle
<i>Messgeräte</i>			
1	Ionisationskammer		
7	Ionisationskammer		
8	Elektrostatische Sammlung/Halbleiter-detektor		
13	Ionisationskammer		
18	Ionisationskammer		
21	Ionisationskammer		
24	Ionisationskammer		
26	Ionisationskammer		
28	Ionisationskammer		

Tabelle 11: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Elektret-Ionisationskammern

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
1	1	958	0.906	0.932	0.048
	2	1039	0.983		
	3	998	0.944		
	4	913	0.864		
	5	1019	0.964		
3	1	1489	1.409	1.340	0.404
	2	1012	0.957		
	3	1135	1.074		
	4	1340	1.268		
	5	2105	1.991		
6	1	1158	1.096	1.235	0.404
	2	1103	1.044		
	3	2065	1.954		
	4	1144	1.082		
	5	1055	0.998		
7	1	1128	1.067	1.027	0.031
	2	1073	1.015		
	3	1103	1.044		
	4	1040	0.984		
	5	1082	1.024		
10	1	1256	1.188	1.096	0.099
	2	1084	1.026		
	3	1111	1.051		
	4	1286	1.217		
	5	1057	1.000		
15	1	1179	1.115	1.147	0.046
	2	1221	1.155		
	3	1190	1.126		
	4	1294	1.224		
	5	1178	1.114		
17	1	1102	1.043	1.026	0.021
	2	1113	1.053		
	3	1071	1.013		
	4	1058	1.001		
	5	1078	1.020		

Fortsetzung Tabelle 11: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Elektretionisationskammern

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
22	1	1044	0.988	0.989	0.010
	2	1032	0.976		
	3	1061	1.004		
	4	1039	0.983		
	5	1049	0.992		

Tabelle 12: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Elektret-Ionisationskammern

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
2	1	2167	1.055	0.954	0.058
	2	1895	0.922		
	3	1953	0.950		
	4	1894	0.922		
	5	1893	0.921		
4	1	2022	0.984	0.991	0.036
	2	2127	1.035		
	3	1928	0.938		
	4	2026	0.986		
	5	2077	1.011		
6	1	2162	1.052	1.051	0.017
	2	2205	1.073		
	3	2106	1.025		
	4	2149	1.046		
	5	2168	1.055		
10	1	2134	1.038	1.014	0.018
	2	2112	1.028		
	3	2072	1.008		
	4	2046	0.996		
	5	2054	1.000		
11	1	2141	1.042	1.062	0.024
	2	2205	1.073		
	3	2122	1.033		
	4	2195	1.068		
	5	2246	1.093		
14	1	2055	1.000	1.019	0.034
	2	2090	1.017		
	3	2007	0.977		
	4	2119	1.031		
	5	2195	1.068		
16	1	1944	0.946	0.956	0.027
	2	2043	0.994		
	3	1901	0.925		
	4	1989	0.968		
	5	1939	0.944		

Fortsetzung Tabelle 12: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Elektretionisationskammern

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
20	1	1734	0.844	0.848	0.029
	2	1827	0.889		
	3	1661	0.808		
	4	1750	0.852		
	5	1736	0.845		
22	1	2120	1.032	1.006	0.023
	2	2053	0.999		
	3	2039	0.992		
	4	2009	0.978		
	5	2113	1.028		
27	1	2387	1.162	1.062	0.053
	2	2191	1.066		
	3	2148	1.045		
	4	2111	1.027		
	5	2169	1.055		
	6	2080	1.012		

Tabelle 13: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Kernspurdetektoren

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
2	1	1024	0.969	0.941	0.096
	2	814	0.770		
	3	1054	0.997		
	4	1025	0.970		
	5	1054	0.997		
4	1	1273	1.204	1.090	0.080
	2	1186	1.122		
	3	1045	0.989		
	4	1117	1.057		
	5	1139	1.078		
8	1	965	0.913	0.952	0.053
	2	959	0.907		
	3	991	0.938		
	4	1018	0.963		
	5	1096	1.037		
9	1	1310	1.239	1.057	0.102
	2	1065	1.008		
	3	1073	1.015		
	4	1065	1.008		
	5	1075	1.017		
12	1	1016	0.961	0.968	0.030
	2	1005	0.951		
	3	1053	0.996		
	4	1058	1.001		
	5	985	0.932		
14	1	932	0.882	0.906	0.027
	2	998	0.944		
	3	959	0.907		
	4	970	0.918		
	5	928	0.878		
18	1	1109	1.049	1.163	0.293
	2	1096	1.037		
	3	1783	1.687		
	4	1072	1.014		
	5	1086	1.027		

Fortsetzung Tabelle 13: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Kernspur-detektoren

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
20	1	943	0.892	0.908	0.027
	2	1002	0.948		
	3	927	0.877		
	4	965	0.913		
	5	962	0.910		
21	1	989	0.936	0.901	0.036
	2	917	0.868		
	3	959	0.907		
	4	990	0.937		
	5	909	0.860		

Tabelle 14: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Kernspurdetektoren

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
3	1	1786	0.869	0.875	0.018
	2	1844	0.897		
	3	1772	0.862		
	4	1759	0.856		
	5	1826	0.889		
5	1	1956	0.952	0.941	0.012
	2	1941	0.945		
	3	1919	0.934		
	4	1898	0.924		
	5	1955	0.951		
9	1	1857	0.904	0.921	0.019
	2	1856	0.903		
	3	1946	0.947		
	4	1887	0.918		
	5	1910	0.929		
12	1	1975	0.961	0.962	0.027
	2	1943	0.945		
	3	1909	0.929		
	4	2051	0.998		
	5	2005	0.976		
15	1	1951	0.949	0.926	0.018
	2	1924	0.936		
	3	1893	0.921		
	4	1861	0.906		
	5	1877	0.913		
17	1	1644	0.800	0.875	0.048
	2	1757	0.855		
	3	1863	0.907		
	4	1850	0.900		
	5	1874	0.912		
19	1	1816	0.884	0.957	0.056
	2	2076	1.010		
	3	1959	0.953		
	4	2079	1.012		
	5	1895	0.922		

Fortsetzung Tabelle 14: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Kernspur-detektoren

Teilnehmercode	Detektorcode	Messwert [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Mittelwert	Standard- abweichung
23	1	2110	1.027	0.983	0.050
	2	2074	1.009		
	3	2108	1.026		
	4	1912	0.930		
	5	2108	1.026		
	6	1885	0.917		
	7	1938	0.943		
25	1	1811	0.881	0.855	0.024
	2	1727	0.840		
	3	1722	0.838		
	4	1812	0.882		
	5	1713	0.834		

Tabelle 15: Vergleichsmessung 1999 - Teilnehmerresultate Messgeräte

Teilnehmercode	Expositions- mittelwert [kBqhm ⁻³]	Standard- abweichung [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Standard- abweichung ¹⁾
5	1071	28	1.013	0.05
11	1003	19	0.949	0.04
13	1005	39	0.951	0.05
16	1084	25	1.025	0.05
19	1038	55	0.982	0.04
23	1051	29	0.995	0.05
24	1099	37	1.039	0.05

¹⁾ Vom PSI eingesetzter Wert für die systematische Unsicherheit der Messresultate (nach Angaben der Hersteller).

Tabelle 16: Vergleichsmessung 2000 - Teilnehmerresultate Messgeräte

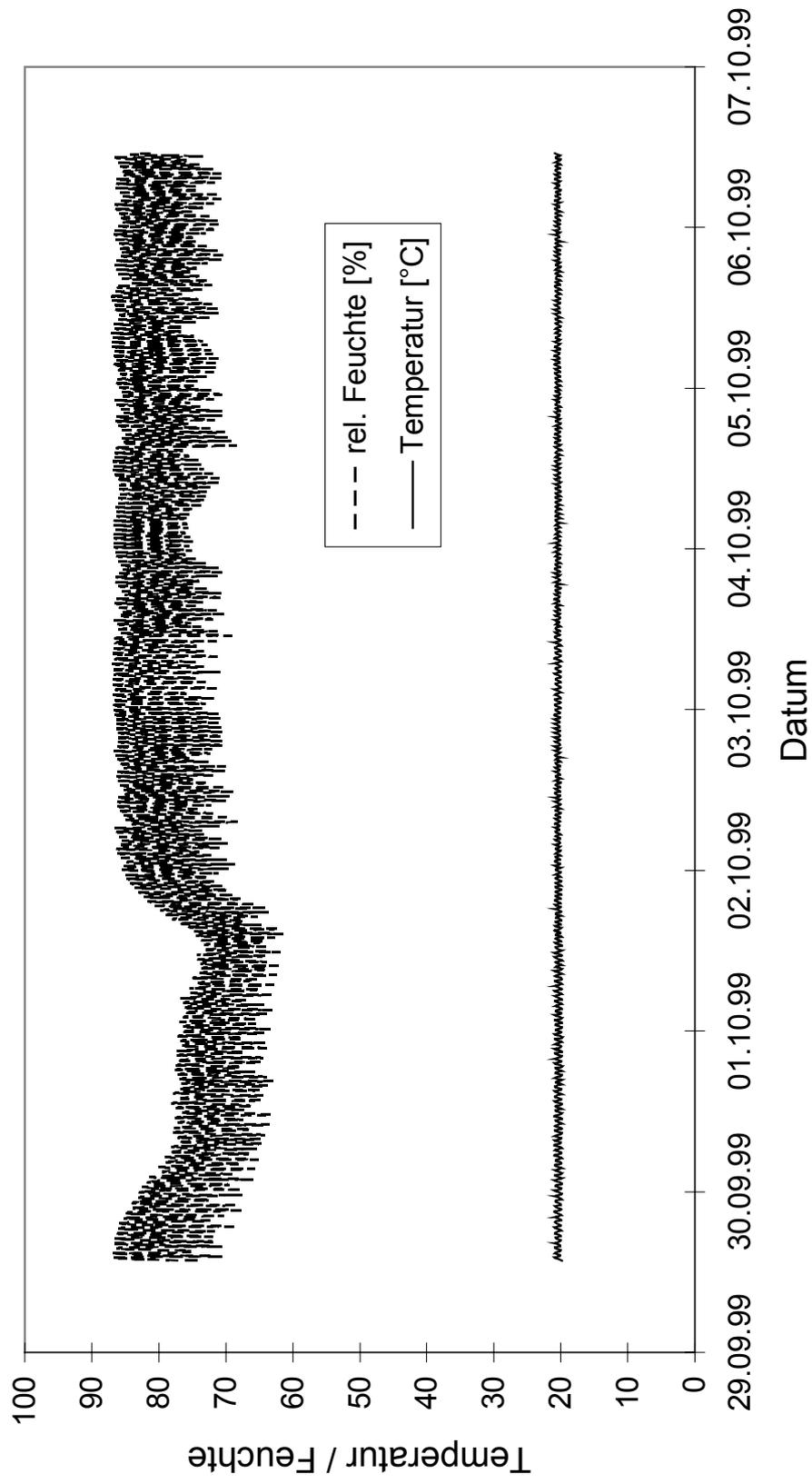
Teilnehmercode	Expositions- mittelwert [kBqhm ⁻³]	Standard- abweichung [kBqhm ⁻³]	Verhältnis Messwert/ Referenzwert	Standard- abweichung ¹⁾
1	1911	34	0.930	0.04
7	1936	39	0.942	0.04
8	2048	33	0.997	0.05
13	1939	37	0.944	0.04
18	2081	37	1.013	0.04
21	1902	38	0.926	0.04
24	1881	34	0.916	0.04
26	1952	39	0.950	0.04
28	1925	37	0.937	0.04

¹⁾ Vom PSI eingesetzter Wert für die systematische Unsicherheit der Messresultate (nach Angaben der Hersteller).

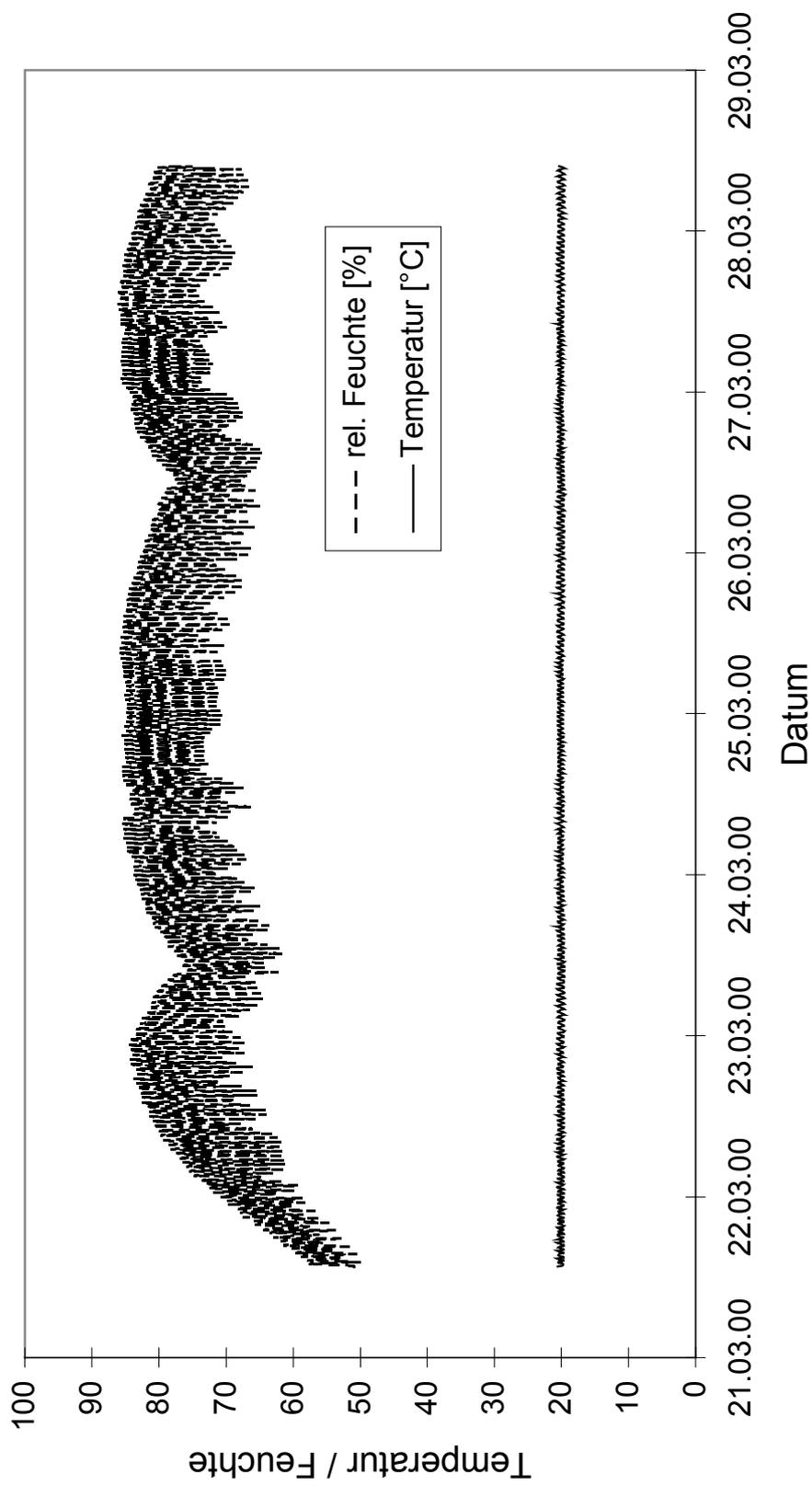
Tabelle 17: Vergleichsmessung 2000 – Vergleich von Spannungsablesungen von Elektreten

Detektorcode	Ablesung Start [Volt]	Ablesung Ende [Volt]	Ablesung Ende [Volt]	Differenz Endablesungen [Volt]
(Code 27 Tab. 12)	Code 27	Messstelle Y	Code 27	
1	477	403	403	0
2	514	447	445	2
3	526	460	458	2
4	532	466	465	1
5	501	434	433	1
6	612	546	544	2

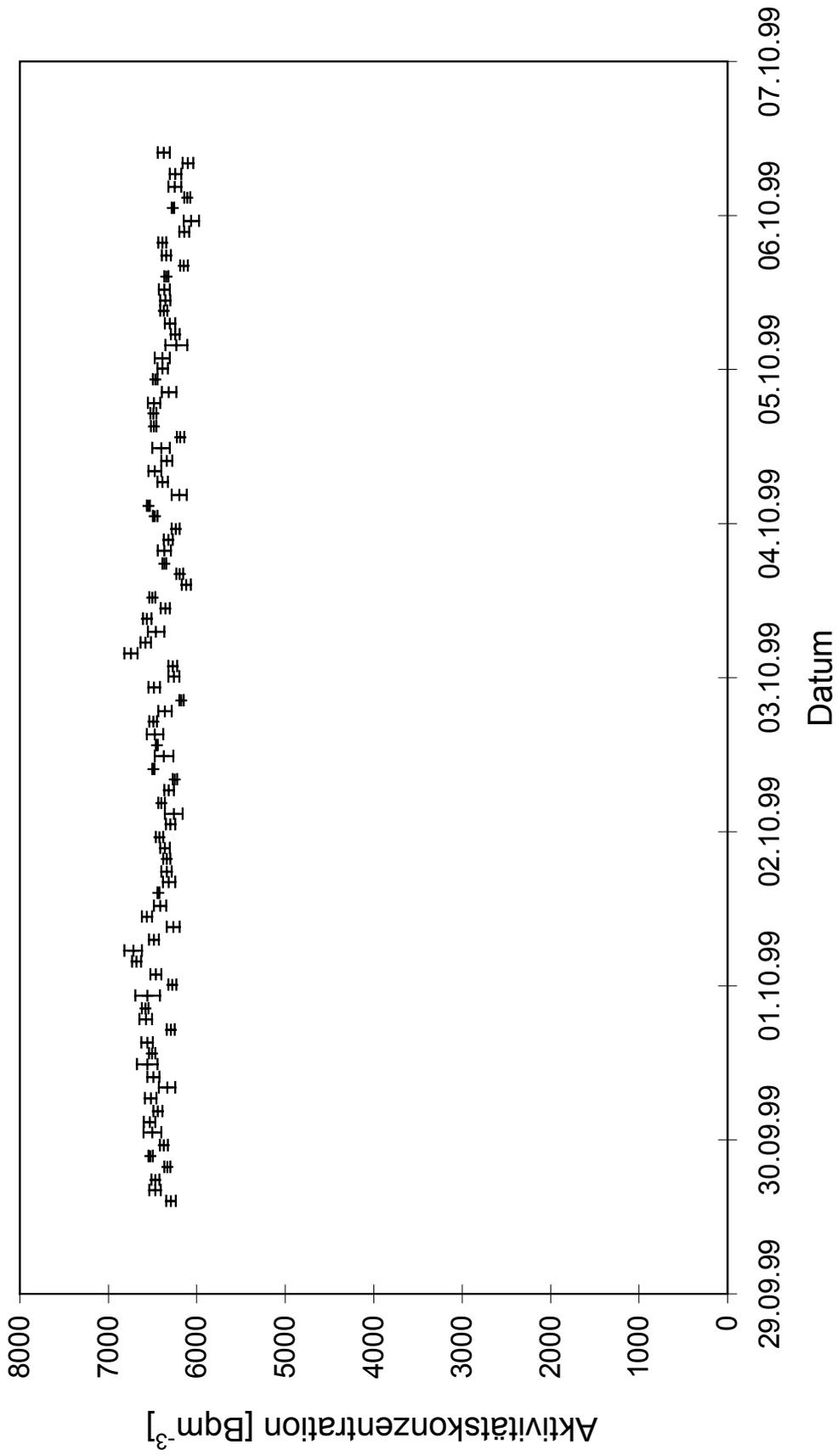
Figur 1: Vergleichsmessung 1999 - Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in der Radonkammer



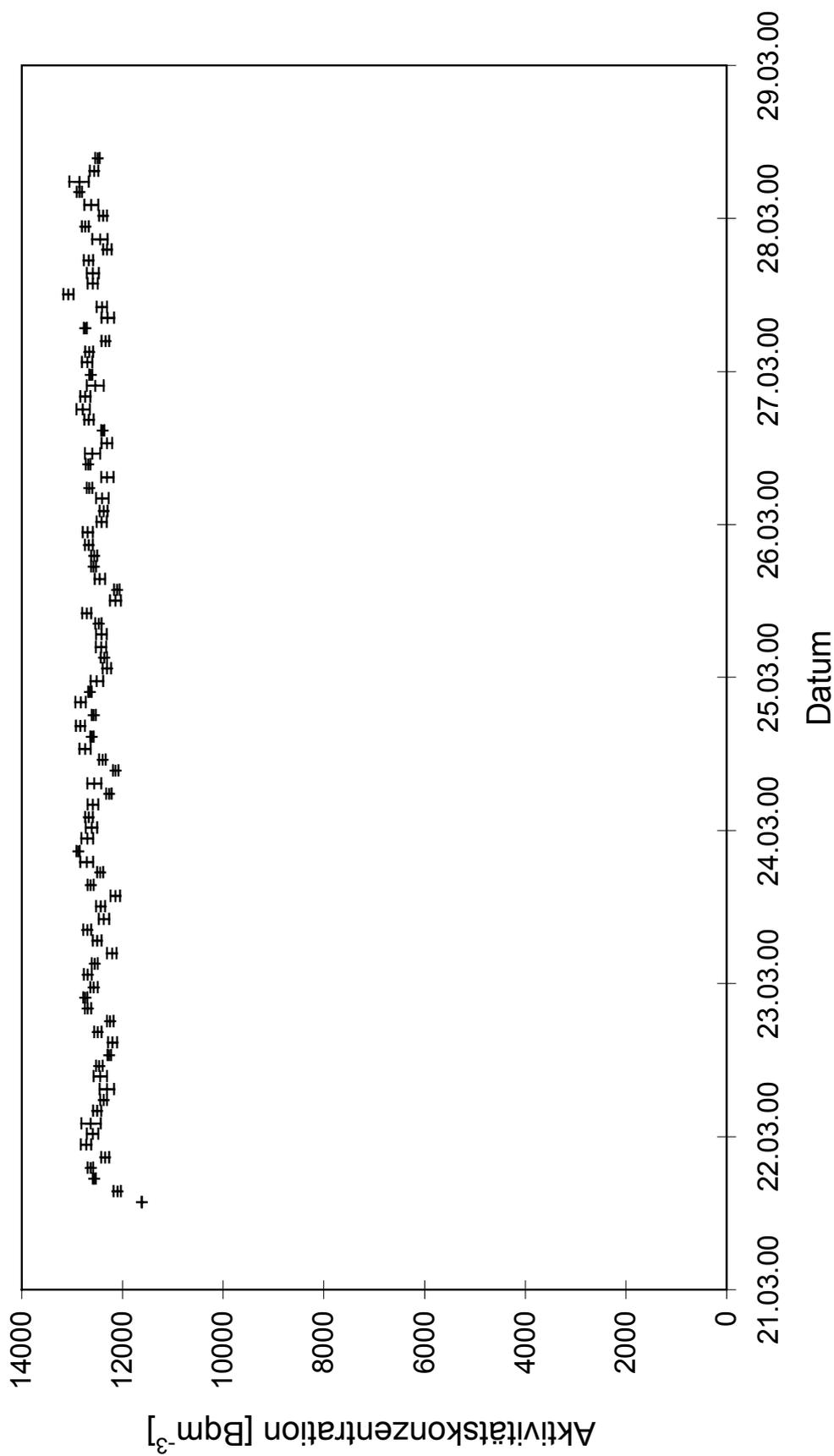
Figur 2: Vergleichsmessung 2000 - Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in der Radonkammer



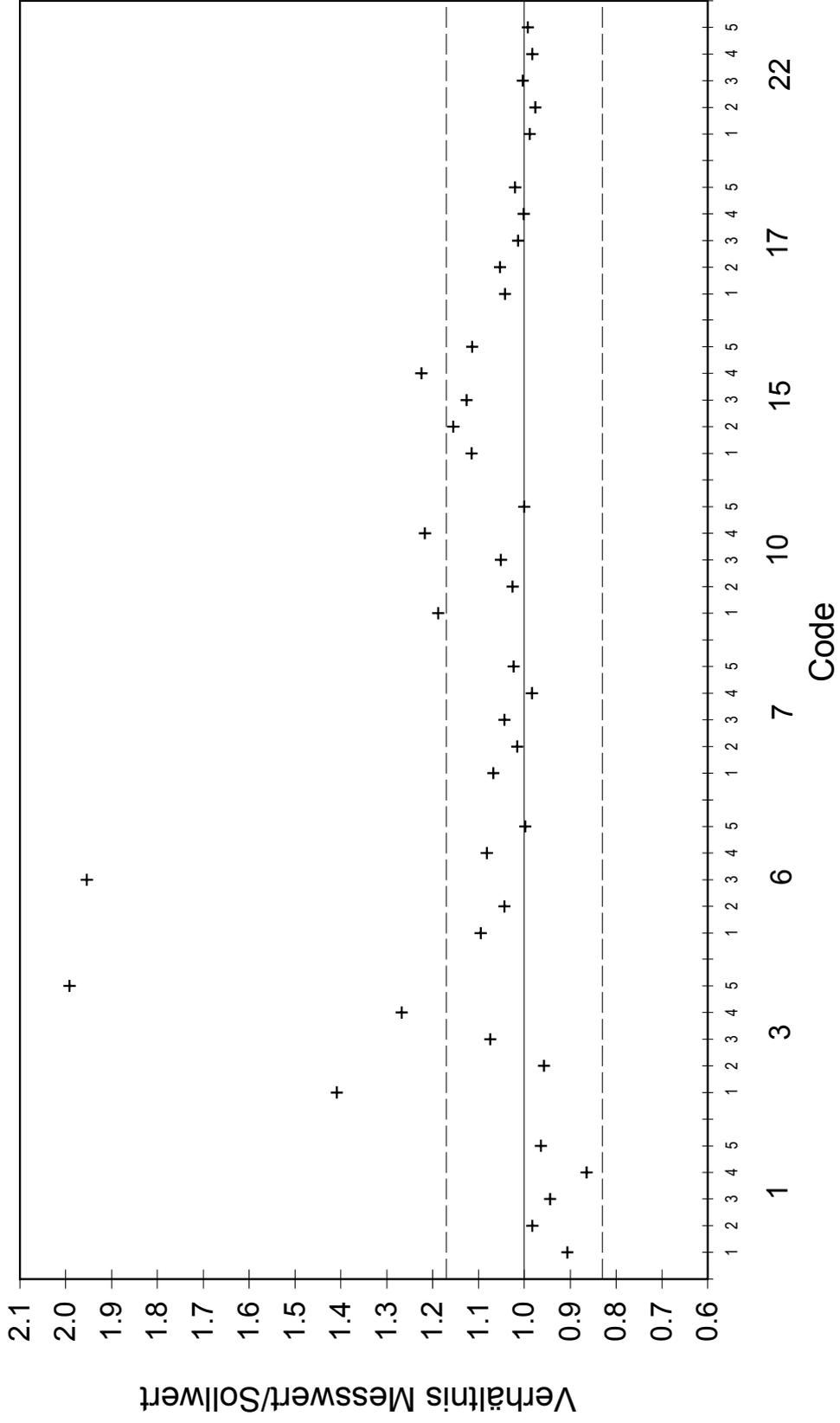
Figur 3: Vergleichsmessung 1999 - Radonkonzentration in der Kammer



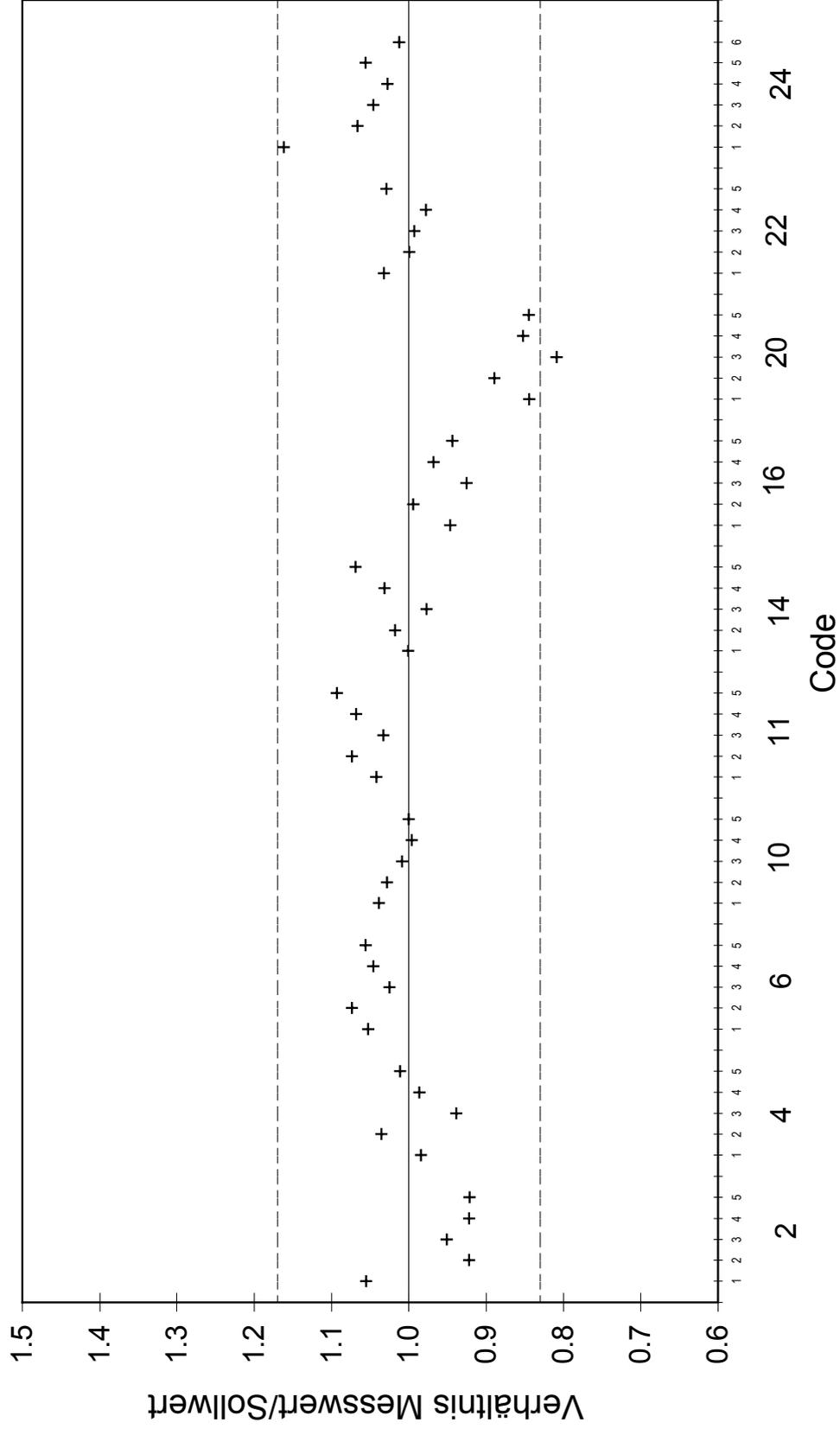
Figur 4: Vergleichsmessung 2000 - Radonkonzentration in der Kammer



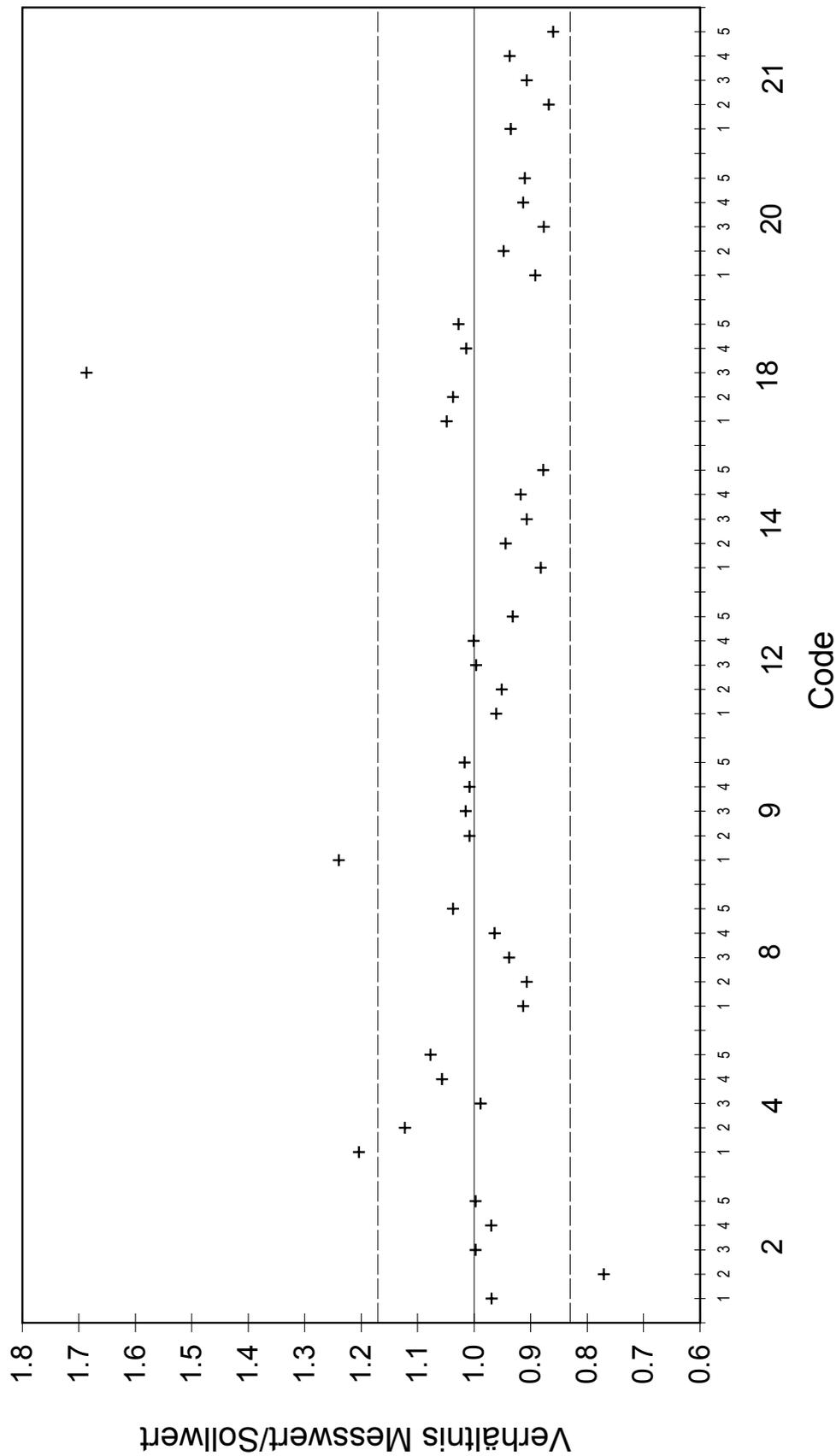
Figur 5: Vergleichsmessung 1999 - Resultate Elektret-Ionisationskammern



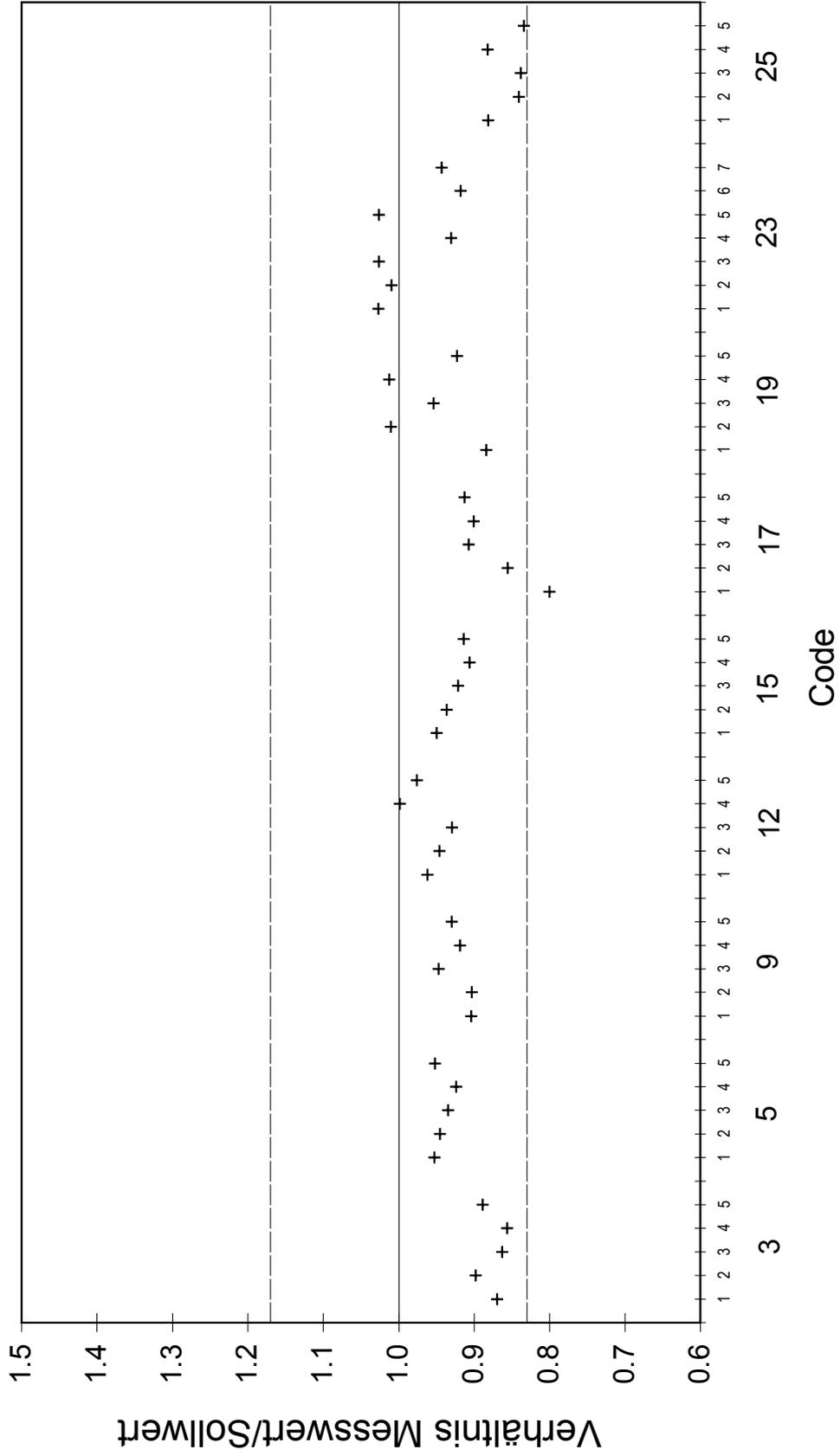
Figur 6: Vergleichsmessung 2000 - Resultate Elektret-Ionisationskammern



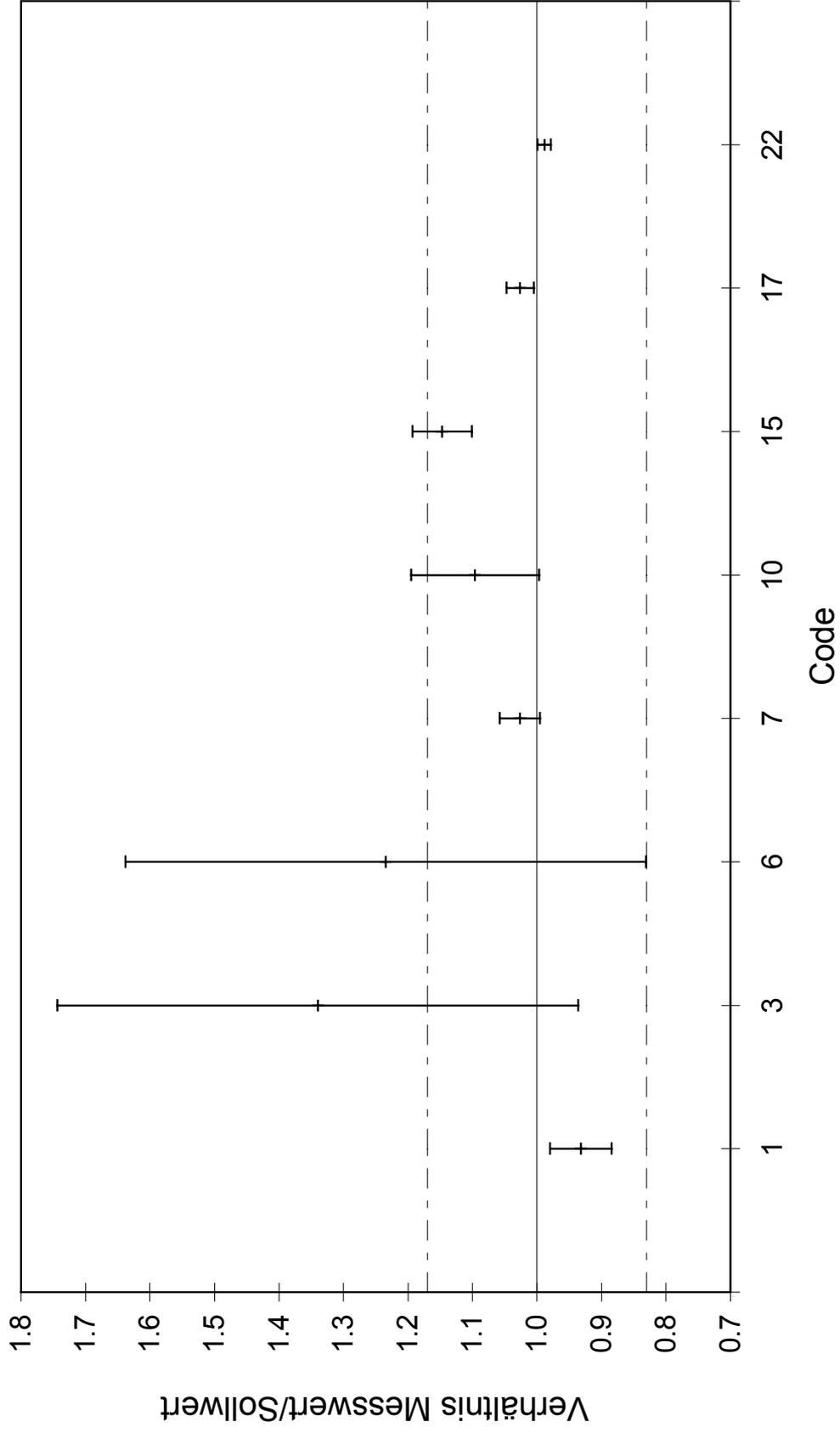
Figur 7: Vergleichsmessung 1999 - Resultate Kernspurdetektoren



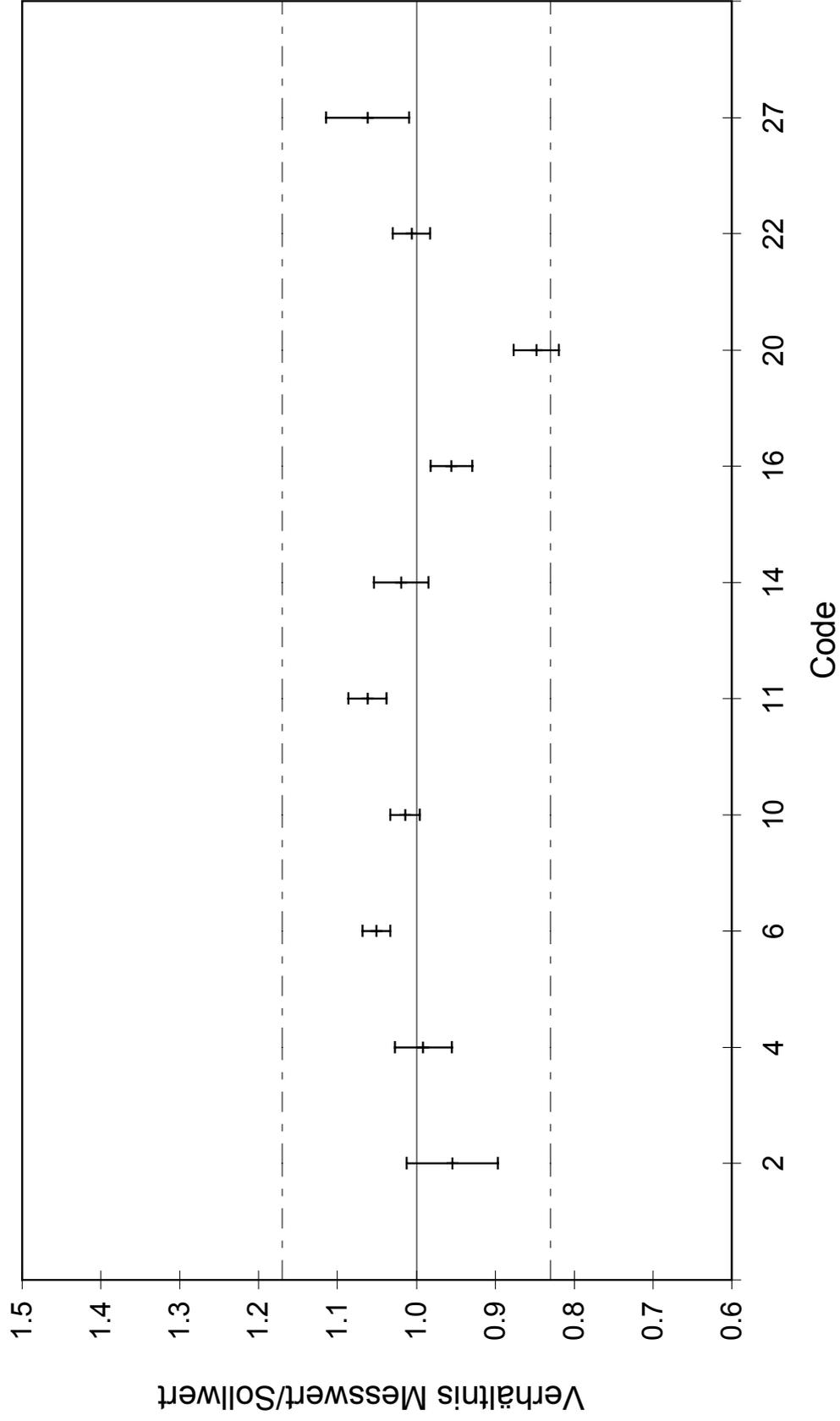
Figur 8: Vergleichsmessung 2000 - Resultate Kernspurdetektoren



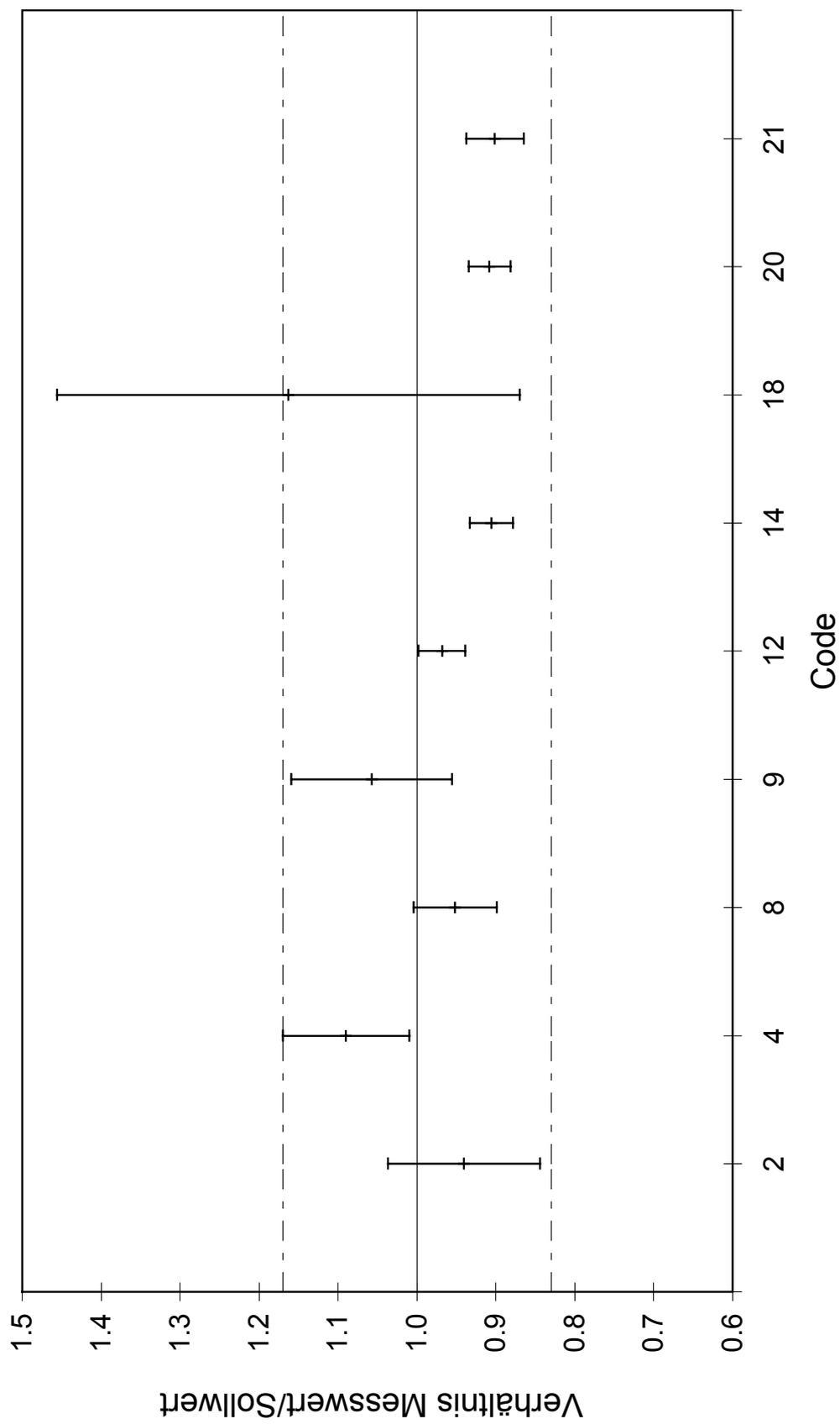
Figur 9: Vergleichsmessung 1999 - Mittelwerte Elektret-Ionisationskammern



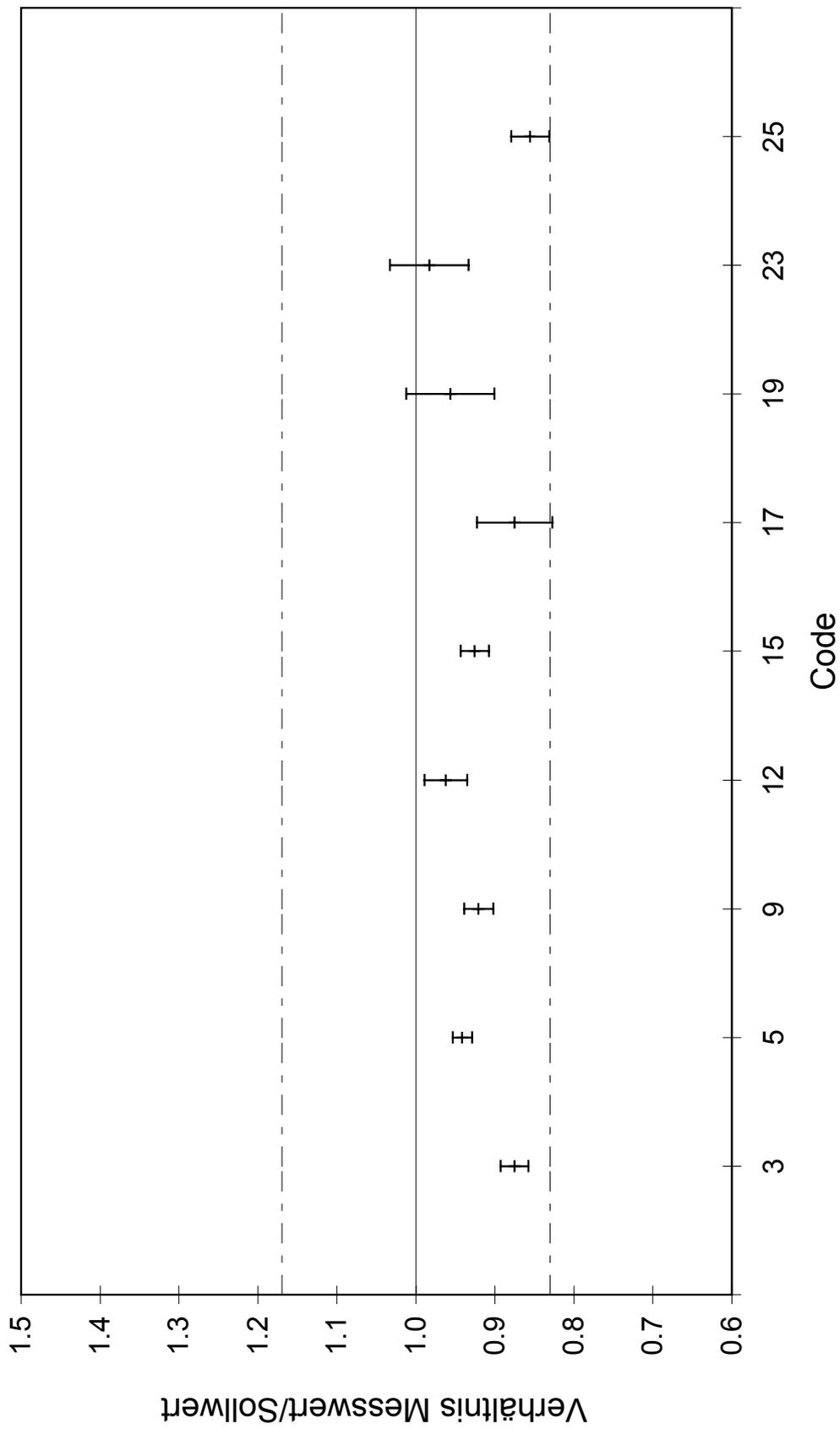
Figur 10: Vergleichsmessung 2000 - Mittelwerte Elektret-Ionisationskammern



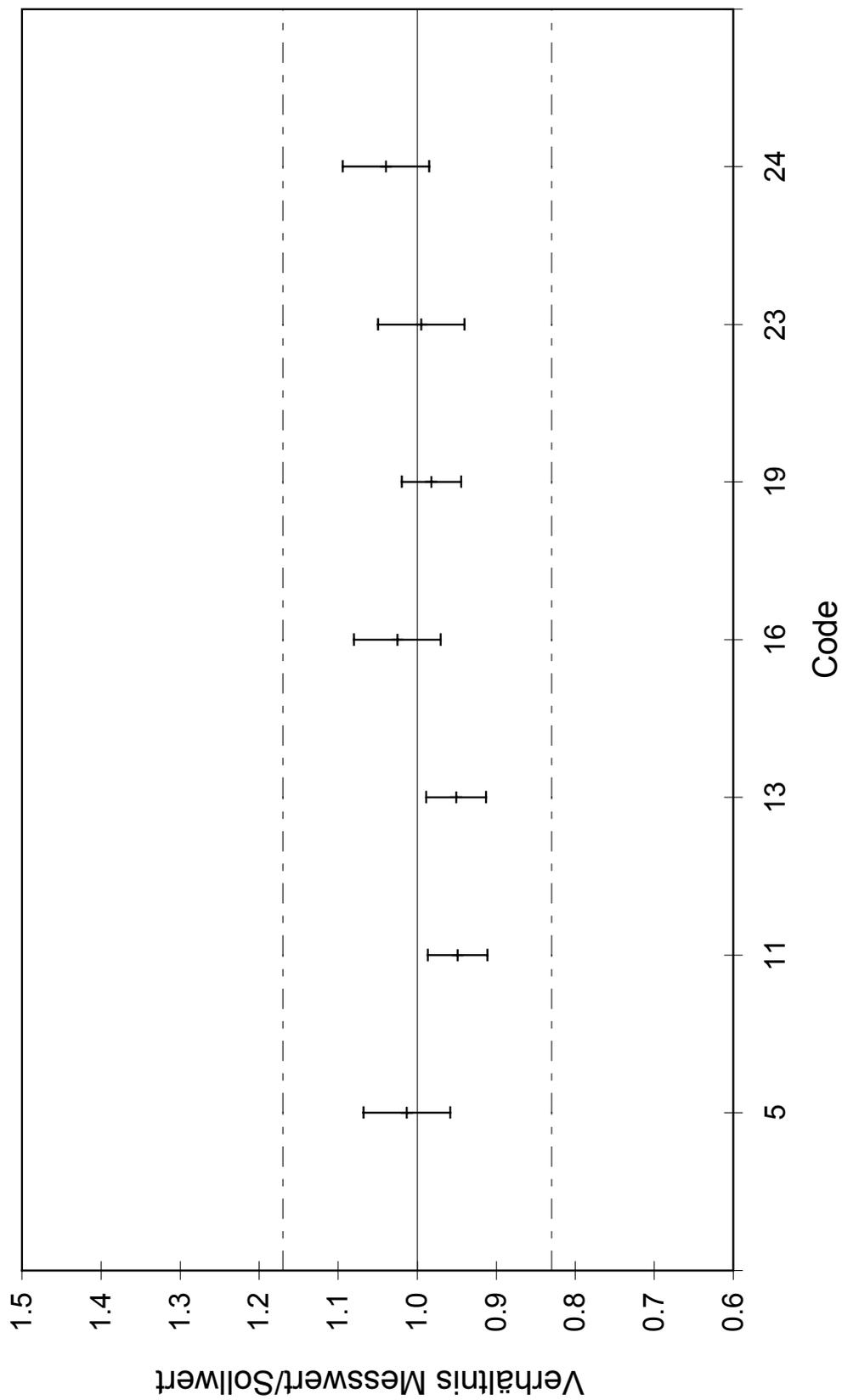
Figur 11: Vergleichsmessung 1999 - Mittelwerte Kernspurdetektoren



Figur 12: Vergleichsmessung 2000 - Mittelwerte Kernspurdetektoren



Figur 13: Vergleichsmessung 1999 - Resultate Messgeräte



Figur 14: Vergleichsmessung 2000 - Resultate Messgeräte

