

# Abschlussbericht

2005

zum Forschungsvorhaben St.Sch.-Nr.4280

„Ermittlung der Zufuhr von natürlichen Radionukliden der Uranzerfallsreihe ( $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) bei Personen aus der Bevölkerung, in belasteten Gebieten und Wohnungen und an NORM-Arbeitsplätzen durch Ausscheidungsanalyse“

**Fördernde Institutionen:**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Bundesamt für Strahlenschutz

**Förderkennzeichen:**

St.Sch. –Nr. 4280

**Forschungsnehmer:**

Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik  
Rossendorf e.V. (VKTA)  
PF 51 01 19  
01314 Dresden

**Bearbeiter:** Dr. Ingrid Schäfer (VKTA)

Dr. Günter Seitz (IfS der BGFE und der BG Chemie)

**Bearbeitungszeitraum:**

01.07.2001 – 30.06.2005

Dieser Bericht gibt die Meinung und Auffassung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

## Kurzfassung

In der Strahlenschutzverordnung vom Juli 2001 werden natürliche Radionuklide in den Strahlenschutz einbezogen. Zur Klärung der mit der Exposition durch natürliche Radioaktivität aufgetretenen Fragen ist es erforderlich, die relevanten Expositionspfade zu definieren und zu quantifizieren. Die Bestimmung von Ausscheidungsraten der langlebigen Tochter-Nuklide der  $^{238}\text{U}$ -Zerfalls-Reihe bei Personen der Bevölkerung und an NORM-Arbeitsplätzen (Naturally Occurring Radioactive Materials) in verschiedenen Regionen Deutschlands soll dazu einen Beitrag leisten.

Im Ergebnis dieser Studie wurden Werte für Ausscheidungsraten in Urin- und Stuhlproben sowie die spezifische Aktivität in Haarproben ermittelt.

Eine Kohorte von insgesamt 104 Personen konnte in fünf Regionen Deutschlands zur Mitarbeit gewonnen werden (Wendland, Harz, Erzgebirge/Vogtland, Bayern/Franken und südlicher Schwarzwald). Zur Beurteilung von Arbeitsfeldern wurden Mitarbeiter aus Wasserwerken, aus der Erdgasgewinnung, aus Schaubergwerken und aus Heilbädern als Probanden ausgewählt. Aus den gleichen Regionen wurden Personen aus der Bevölkerung in die Studie einbezogen. Die Gesamtergebnisse sowie die Ergebnisse für die Beschäftigten und „allgemeine Bevölkerung“ sind in der Übersichtstabelle ohne Differenzierung nach Arbeitsfeldern und Regionen zusammengefasst.

Übersichtstabelle: Ausscheidungsraten und spezifische Aktivitäten für Beschäftigte und Bevölkerung

		<b>Ausscheidungsraten Medianwerte</b>		
		<b>Alle</b>	<b>Beschäftigte</b>	<b>Bevölkerung</b>
<b>Matrix</b>	<b>Nuklid</b>	<b>[mBq/d]</b>	<b>[mBq/d]</b>	<b>[mBq/d]</b>
Urin	$^{226}\text{Ra}$	<b>7,5</b>	<b>6,6</b>	<b>8,1</b>
	$^{210}\text{Pb}$	<b>7,5</b>	<b>8,5</b>	<b>6,3</b>
	$^{210}\text{Po}$	<b>4,3</b>	<b>5,1</b>	<b>3,5</b>
Stuhl	$^{230}\text{Th}$	<b>5,1</b>	<b>5,5</b>	<b>4,1</b>
	$^{226}\text{Ra}$	<b>32</b>	<b>37</b>	<b>21</b>
	$^{210}\text{Pb}$	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>30</b>
<b>Spezifische Aktivität [mBq/g]</b>				
Haar	$^{226}\text{Ra}$	<b>&lt;1</b>	<b>&lt;1,0</b>	<b>&lt;1,0</b>
	$^{210}\text{Pb}$	<b>5,8</b>	<b>7,2</b>	<b>3,2</b>

## Summary

In the current German radiation protection regulations for the first time emphasis is put on the naturally occurring radionuclides. A lot of questions concerning the exposure of general population and workplaces must be investigated. The relevant exposure paths have to be defined and quantified. Subject of this paper is the determination of long living nuclides in the  $^{238}\text{U}$ -decay chain in the excretions of individuals of the general public and at NORM workplaces. The different background radiation level in different German regions is additionally taken into account in the investigations.

In the result of this study values for excretion rates in samples of urine and faeces as well as the specific activity in hair samples were determined.

A cohort of 104 persons was selected in five regions of Germany (Wendland, Harz, Erzgebirge/Vogtland, Bayern/Franken, Schwarzwald).

Workers were chosen from drinking water providers, natural gas providers, balneologic facilities, exhibition mines and museum pits and persons of general population were recruited in the same regions either.

The results of the study for workers and persons of "general population" are displayed in the table without further splitting into the parameters.

Table: Excretion rates and specific activities for workers and general population

		<b>Excretion rates (50 % Percentil)</b>		
		<b>All</b>	<b>Workers</b>	<b>General population</b>
<b>Matrix</b>	<b>Nuclid</b>	<b>[mBq/d]</b>	<b>[mBq/d]</b>	<b>[mBq/d]</b>
Urine	$^{226}\text{Ra}$	<b>7,5</b>	<b>6,6</b>	<b>8,1</b>
	$^{210}\text{Pb}$	<b>7,5</b>	<b>8,5</b>	<b>6,3</b>
	$^{210}\text{Po}$	<b>4,3</b>	<b>5,1</b>	<b>3,5</b>
Faeces	$^{230}\text{Th}$	<b>5,1</b>	<b>5,5</b>	<b>4,1</b>
	$^{226}\text{Ra}$	<b>32</b>	<b>37</b>	<b>21</b>
	$^{210}\text{Pb}$	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>30</b>
<b>Specific Activity [mBq/g] (50 % Percentil)</b>				
Hair	$^{226}\text{Ra}$	<b>&lt;1</b>	<b>&lt;1,0</b>	<b>&lt;1,0</b>
	$^{210}\text{Pb}$	<b>5,8</b>	<b>7,2</b>	<b>3,2</b>

## Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	7
	Tabellenverzeichnis	9
	Häufig verwendete Abkürzungen und Definitionen	11
1	Einleitung	12
2	Exposition durch natürliche Radioaktivität	15
2.1	Allgemeines	15
2.2	Überwachung von Inkorporationen	18
2.3	Literaturübersicht zu Ausscheidungsraten von $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$	19
3	Studiendurchführung	23
3.1	Auswahl der Zielvariablen (Nuklide)/Umfang der Studie	23
3.2	Untersuchungsregionen	23
3.3	Arbeitsfelder	24
3.4	Probandenfindung-Probandenwerbung	24
3.4.1	Probanden aus den gewählten Arbeitsfeldern	24
3.4.2	Allgemeine Bevölkerung	26
3.5	Probenahme	27
3.6	Analysenverfahren	29
3.6.1	Probenvorbereitung	31
3.6.2	Radiochemische Methoden	32
3.6.2.1	$^{230}\text{Th}$ -Bestimmung in Stuhlproben	33
3.6.2.2	$^{226}\text{Ra}$ -Bestimmung in Urin-, Stuhl- und Haarproben mit ICP- Massenspektrometrie	33
3.6.2.3	$^{210}\text{Pb}$ und $^{210}\text{Po}$ -Bestimmung	35
3.6.2.3.1	$^{210}\text{Pb}$ - und $^{210}\text{Po}$ -Bestimmung in Urin	36
3.6.2.3.2	$^{210}\text{Pb}$ -Bestimmung in Stuhl- und Haarproben	38
3.6.3	$\alpha$ -Spektrometrie	38
3.6.4	Maßnahmen zur analytischen Qualitätssicherung und Unsicherheiten der Ergebnisse	40
4	Ergebnisse	43
4.1	Datenmaterial und Auswertungen (Datenbank)	43
4.2	Darstellung der Ergebnisse	47
4.2.1	Volumina und Massen der Ausscheidungen	47
4.2.2	Ausscheidungsraten der untersuchten Nuklide	52
4.2.2.1	Ausscheidungsraten von $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ im Urin	54
4.2.2.1.1	$^{226}\text{Ra}$ im Urin	55
4.2.2.1.2	$^{210}\text{Po}$ im Urin	62
4.2.2.1.3	$^{210}\text{Pb}$ im Urin	67
4.2.2.1.4	$^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ - Verhältnis im Urin	72
4.2.2.2	Ausscheidungsraten von $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl	74
4.2.2.2.1	$^{230}\text{Th}$ im Stuhl	74

---

4.2.2.2.2	$^{226}\text{Ra}$ im Stuhl	80
4.2.2.2.3	$^{210}\text{Pb}$ im Stuhl	86
4.2.2.3	Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ und $^{210}\text{Pb}$ im Haar	92
4.2.2.3.1	$^{226}\text{Ra}$ im Haar	92
4.2.2.3.2	$^{210}\text{Pb}$ im Haar	97
5	Zusammenfassung	102
6	Danksagung	106
7	Literaturverzeichnis	107
8	Anlagen	114

## Abbildungsverzeichnis

1:	Zerfallschema der Uran-Radium-Reihe	15
2:	Gamma-Ortsdosisleistung	16
3:	Radon in der Bodenluft und Untersuchungsregionen	17
4:	Trennung $^{210}\text{Pb}$ und $^{210}\text{Po}$ aus einer Probe	36
5:	$\alpha$ -Spektrum von Po-Nukliden	39
6:	$\alpha$ -Spektrum von Th-Nukliden	39
7:	Struktur der Access-Datenbank	44
8:	Datenbankfelder	44
9:	Access-Abfragebeispiel Tabellenübersicht	45
10:	Access-Abfrage	45
11:	Ergebnistabelle einer Abfrage	46
12:	Urinvolumina - Individuelle Mittelwerte und Schwankungsbreite	47
13:	Häufigkeitsverteilung Urinvolumina (N= 286)	48
14:	Stuhlmassen – Individuelle Mittelwerte und Schwankungsbreite	49
15:	Häufigkeitsverteilung der Tagesausscheidung Stuhl (N = 286)	49
16:	Box Plots – Definition von Ausreißern und Extrema	53
17:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	55
18:	Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin	55
19:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung ohne Ausreißer und Extrema	56
20:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin - alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung mit Ausreißern und Extrema	56
21:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	57
22:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern	58
23:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – Arbeitsfelder nach Regionen	58
24:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	62
25:	Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin	63
26:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – alle Ergebnisse nach Beschäftigten und Bevölkerung	63
27:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	64
28:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – alle Beschäftigten nach Arbeitsfelder	64
29:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – Arbeitsfelder nach Regionen	65
30:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	67
31:	Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin	68
32:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung	68
33:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	69
34:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern	70
35:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – Arbeitsfelder nach Regionen	70
36:	Häufigkeitsverteilung des Verhältnisses der Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$	73

37:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	74
38:	Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl	75
39:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung	75
40:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	76
41:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – alle Beschäftigte nach Arbeitsfeldern	76
42:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – Arbeitsfelder nach Regionen	77
43:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	80
44:	Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl	81
45:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung	81
46:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – Beschäftigte und Bevölkerung	82
47:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern	82
48:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – Arbeitsfelder nach Regionen	83
49:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	86
50:	Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl	87
51:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung	87
52:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	88
53:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – alle Beschäftigte nach Arbeitsfeldern	88
54:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – Arbeitsfelder nach Regionen	89
55:	Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ im Haar – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	92
56:	Häufigkeitsverteilung der spezifischen Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ im Haar	93
57:	Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ im Haar – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung	93
58:	Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ im Haar – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	94
59:	Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ im Haar – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern	94
60:	Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ im Haar – Arbeitsfelder nach Regionen	95
61:	Spezifische Aktivität von $^{210}\text{Pb}$ im Haar – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)	97
62:	Häufigkeitsverteilung der spezifische Aktivität von $^{210}\text{Pb}$ im Haar	98
63:	Spezifische Aktivität von $^{210}\text{Pb}$ im Haar – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung	98
64:	Spezifische Aktivität von $^{210}\text{Pb}$ im Haar – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen	99
65:	Spezifische Aktivität von $^{210}\text{Pb}$ im Haar – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern	99
66:	Spezifische Aktivität von $^{210}\text{Pb}$ im Haar – Arbeitsfelder nach Regionen	100

## Tabellenverzeichnis

1:	Spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide in der Gesamtnahrung	18
2:	Mittelwerte der Jahresaktivitätszufuhr natürlicher Radionuklide über Ingestion	18
3:	Literaturdaten zu Ausscheidungsraten von $^{230}\text{Th}$ (in Klammern MW)	19
4:	Literaturdaten zu Ausscheidungsraten von $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ (in Klammern MW)	20
5:	Aktivitätsverhältnis $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ für verschiedene Matrices und Probandengruppen	21
6:	Probandenkohorte nach Status, Alter und Geschlecht	26
7:	Probandenkohorte nach Arbeitsfeldern, Regionen und Status	27
8:	Zeitdifferenz der PN für die einzelnen Probandengruppen	28
9:	Mögliche Methoden für die Analytik der studienrelevanten Nuklide und typische Nachweisgrenzen, Literaturwerte und realisierte Werte des Labors	30
10:	Zahl der durchgeführten Analysen (Gesamtzahl 2102 Analysen)	30
11:	Verwendete analytische Methoden	32
12:	$\alpha$ -Energien der untersuchten Nuklide	39
13:	Datenbereitstellung für die Auswertung	43
14:	Urinausscheidungen	48
15:	Stuhlausscheidungen	50
16:	Abweichungen der individuellen Urinvolumina und Stuhlmassen bei drei PN	50
17:	Extremwerte für Tagesausscheidungen Urin (Gesamtmittelwert Urinausscheidung dieser Studie 2,3 l/d)	50
18:	Extremwerte für Tagesausscheidungen Stuhl (Gesamtmittelwert AM dieser Studie 5,2 g/d)	51
19:	Medianwerte und obere Quartile aller Ausscheidungsraten für die analysierten Nuklide	52
20:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin	54
21:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	60
22:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Urin – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen	61
23:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin	62
24:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	65
25:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}$ im Urin – Arbeitsfelder und Bevölkerung nach Regionen	66
26:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin	67
27:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	71
28:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Urin – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen	72
29:	Verhältnis der Ausscheidungsraten $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ im Urin	73
30:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl	74
31:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	78
32:	Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ im Stuhl – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen	79

33:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl	80
34:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	84
35:	Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ im Stuhl – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen	85
36:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl	86
37:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	90
38:	Ausscheidungsraten $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen	91
39:	Spezifische Aktivität $^{226}\text{Ra}$ im Haar	92
40:	Spezifische Aktivität $^{226}\text{Ra}$ im Haar – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	96
41:	Spezifische Aktivität $^{210}\text{Pb}$ im Haar	97
42:	Spezifische Aktivität $^{210}\text{Pb}$ im Haar – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen	100
43:	Spezifische Aktivität $^{210}\text{Pb}$ im Haar – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen	101
44:	Medianwerte der Ausscheidungsraten in den Matrices Urin (n = 286) und Stuhl (n = 286), differenziert nach Beschäftigten und Bevölkerung, Wertebereich der Studie und aus der Literatur	103
45:	Oberes Quartil (75%) und 90 % Perzentil der Ausscheidungsraten von Urin und Stuhl	104
46:	Medianwerte der spezifischen Aktivitäten für $^{226}\text{Ra}$ und $^{210}\text{Pb}$ im Haar (n = 237) differenziert nach Beschäftigten und Bevölkerung, Wertebereich der Studie und aus der Literatur	104
47:	Oberes Quartil (75%) und 90 % Perzentil der spezifischen Aktivitäten im Haar	104

## Häufig verwendete Abkürzungen und Definitionen

ID	Identitätsnummer für die Probanden
AM	Aschemasse
FM	Frischmasse
ICP-MS	<b>I</b> nductively <b>C</b> oupled <b>P</b> lasma <b>M</b> ass <b>S</b> pectrometry
LSC	Flüssigszintillationsspektrometrie (Liquid Scintillation Counting)
PC	Gasdurchflussproportionalzählrohr (Proportional Counter)
PIPS	Passivated Implanted Planar Silicon
PN	Probenahme
Beschäftigte	hier: durch den Beruf auf Grund natürlicher Exposition erhöht Exponierte (NORM-Arbeitsplätze)
Bevölkerung	Personengruppen, die in den untersuchten Regionen leben
VG	Vergleichsgruppe Bevölkerung zu den entsprechenden Arbeitsfeldern
Bäder	Arbeitsfeld Bäder
SB	Arbeitsfeld Schaubergwerke
WW	Arbeitsfeld Wasserwerke
EG	Arbeitsfeld Erdgas
B/F	Region Bayern/Franken
E/V	Region Erzgebirge/Vogtland
Harz	Region Harz
Wendland	Region Lüchow/Wendland
SW	Region Schwarzwald
Wertebereich	Gesamtwertebereich aller Ergebnisse eines Nuklids (Min – Max)
Quartilsspanne	Wertebereich 25-75 % der Ergebnisse
unteres Quartil	25 % aller Ergebnisse
oberes Quartil	75 % aller Ergebnisse
Perzentil 90	90 % aller Werte
Medianwert	50 % der Werte < Median und 50 % > Median
$\bar{m}$	Mittelwert (MW)(arithmetisches Mittel)
c	Aktivitätskonzentration in mBq/l
a	spezifische Aktivität in mBq/g
s	Gesamtunsicherheit (einfache Standardabweichung) (s. Anlage 4)
AR	Ausscheidungsrate in mBq/d
$g^*$	Nachweisgrenze nach DIN 25492 [ <sup>1</sup> ]
M	eingesetzte Probenmasse in g
$M_{min}$	Minimale Masse
$M_{max}$	Maximale Masse
V	Volumen in l
$V_{min}$	Minimalvolumen
$V_{max}$	Maximalvolumen
$T_{1/2}$	Halbwertszeit

# 1 Einleitung

Wie alle Materie ist auch der Mensch immer und überall ionisierender Strahlung ausgesetzt. Die Ursache dafür sind natürliche Strahlenquellen, die Bestandteil des täglichen Lebens sind. Man unterscheidet bei diesen Strahlenquellen zwischen kosmischer Strahlung aus dem Weltall und terrestrischer Strahlung, deren Quelle die Radionuklide in Böden und Gesteinen der Erdkruste sind. Die natürliche Strahlenexposition eines Menschen setzt sich aus äußerer und innerer Strahlenexposition zusammen. Die terrestrische äußere Strahlenexposition sowie der überwiegende Teil der inneren Strahlenexposition wird bestimmt durch die primordialen Radionuklide, die aufgrund ihrer großen Halbwertszeit seit der Entstehung der Erde noch nicht zerfallen sind. Neben den Radionukliden ohne Zerfallsreihen wie  $^{40}\text{K}$  und  $^{87}\text{Rb}$ , sind die Radionuklide aus den Zerfallsreihen Thorium, Uran sowie Actinium zu beachten.

Die ursprüngliche Verteilung der Radionuklide in der Natur und damit die Höhe der natürlichen Strahlenexposition kann durch die Tätigkeit des Menschen beeinflusst werden. Diese zivilisatorischen Einwirkungen können unter Umständen erheblich sein. Ein klassisches Beispiel dafür ist der Bergbau. Als Abraum auf Halden abgelagerte Materialien enthalten Rückstände aus der Erzverarbeitung mit, gegenüber dem ursprünglichem Gestein erhöhten Konzentrationen natürlicher Radionuklide.

Mit erhöhter Belastung durch kosmische Strahlung ist für Fluggäste und das Flugpersonal bei Reisen mit dem Flugzeug in großen Höhen zu rechnen.

Geringfügige Erhöhungen der natürlichen Strahlenexposition werden auch durch Kohlekraftwerke verursacht. Die in der Kohle enthaltenen natürlichen Radionuklide werden bei der Verfeuerung in der Asche angereichert, gelangen teilweise in die Atmosphäre und lagern sich auf dem Boden ab. Die dadurch zustande kommende Dosis für die Bevölkerung ist - bezogen auf die gleiche Kraftwerksleistung- etwa gleich groß wie die Jahresdosis der Bevölkerung durch Emission künstlicher Radionuklide aus Kernkraftwerken.

Mit der Entwicklung von Industrie, Forschung und Medizin wurden den natürlichen Strahlenquellen eine Reihe künstlicher Strahlenquellen hinzugefügt, die ebenfalls zu einer zivilisatorischen Strahlenexposition führen. Auf alle Anwendungen künstlicher Radionuklide und natürlicher Radionuklide richten sich die Maßnahmen des Strahlenschutzes; sie haben das Ziel, den Schutz des Menschen vor der schädigenden Wirkung ionisierender Strahlung zu gewährleisten, ohne die Anwendungen, die der Anlass für die Strahlenexposition sind, mehr als notwendig einzuschränken. Ein weites Feld ist die Überwachung beruflich strahlenexponierter Personen, aber auch die Strahlenexposition der Bevölkerung durch externe Strahlung, Inhalation und Ingestion. Die Feststellung der Aufnahme von Radionukliden in den menschlichen Körper durch Inhalation oder Ingestion kann direkt im Körper (in vivo) oder in den Körperausscheidungen (in vitro) erfolgen. Dabei ist bei der Inkorporationskontrolle auf künstliche Radionuklide davon auszugehen, dass bei positiven Befunden die Inkorporation tatsächlich durch den Umgang mit diesen Nukliden erfolgt ist.

Bei der Inkorporationskontrolle auf Uran- oder Thoriumnuklide oder deren radioaktive Töchter ist zu berücksichtigen, dass diese Radionuklide nicht nur durch berufliche

Exposition inkorporiert werden können, sondern in erheblichem Maße durch Nahrungsaufnahme und Trinkwasser in den Körper gelangen. Es kann daher schwierig sein, festgestellte Gehalte dieser Nuklide als beruflich bedingt zu interpretieren. Dies ist aber notwendig, da der Schutz des Menschen und der Umwelt vor den Einwirkungen durch ionisierende Strahlung die von natürlichen Radionukliden emittiert wird, mit Inkrafttreten der Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001<sup>[58]</sup> explizit in den Strahlenschutz einbezogen worden ist. Es ist sicher, dass ionisierende Strahlung aus natürlicher Radioaktivität (bezeichnet als: **NORM** (Naturaly Occuring Radioactive Materials) bzw. **TENORM** (Technical Enhanced Naturaly Occuring Radioactive Materials)) einen signifikanten Beitrag zur Strahlenexposition liefern kann. Das hat dazu geführt, dass in der EU-Richtlinie 96/29 Euratom in Titel VII<sup>[57]</sup> ausdrücklich eine Berücksichtigung von NORM und TENORM in der nationalen Gesetzgebung verlangt wird. Der wirksame Schutz setzt Kenntnisse über Art und Höhe der Belastung durch die natürlichen Radionuklide voraus.

Für die allgemeine Bevölkerung und für beruflich mit natürlicher Radioaktivität umgehende oder durch sie in erhöhtem Maße exponierte Personen, müssen grundlegende Daten als Referenzwerte über die unterschiedlichen Belastungspfade zusammengestellt werden. Der Beschaffung dieser Daten dienen eine Reihe von Forschungs- und Untersuchungsprojekten, die von verschiedenen Institutionen in Deutschland durchgeführt wurden und werden. Diese Studien und Publikationen befassen sich vor allem mit der Zufuhr von Uran- und Thoriumnukliden und der Exposition durch <sup>222</sup>Rn für Personen der Bevölkerung. Ein Datenpool zu Ausscheidungsdaten von Uran- und Thoriumnukliden und ihren radioaktiven Töchtern wird die Unterscheidung zwischen normaler Aufnahme durch die Nahrung und erhöhter Zufuhr durch berufliche Exposition erleichtern. Während es für Urannuklide und Thoriumnuklide der Thoriumzerfallsreihe (<sup>228</sup>Th, <sup>232</sup>Th) auch für Deutschland schon Daten gibt, findet man für die langlebigen Tochternuklide des Urans (<sup>230</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb und <sup>210</sup>Po) nur sehr wenige Angaben über Ausscheidungsdaten. Dabei sind gerade diese Radionuklide von großer Bedeutung bei der Bewertung der Exposition z.B. bei Arbeiten in Wasserwerken, Schaubergwerken oder Radon-Bädern. Wird bei den Ausscheidungsdaten nicht differenziert nach Zufuhr über die Nahrung und Zufuhr aufgrund beruflicher Exposition kann es zu einer Überschätzung der Körperdosen aus beruflichem Umgang kommen.

Deshalb sollten im Rahmen dieser Studie Referenzwerte für die langlebigen Urantochternuklide ermittelt werden. Als Matrix waren Urin, Stuhl und Haare vorgegeben.

**In Absprache mit dem Auftraggeber wurde zu Beginn der Studie festgelegt, dass abweichend vom Titel der Studie, statt der Zufuhr die Ausscheidungsdaten für Urin- und Stuhlproben und die spezifische Aktivität von Haarproben zu bestimmen sind. Personen, die im Uranerzbergbau tätig sind, sollten bei der Auswahl von Probanden nicht berücksichtigt werden<sup>[2]</sup>.**

**Die hier vorgestellte Studie hat zum Ziel, Daten über die Ausscheidungsdaten der langlebigen Uran-Tochternuklide bei Personen aus der Bevölkerung und an NORM-Arbeitsfeldern in verschiedenen Regionen Deutschlands zu gewinnen.**

Ein Hauptaugenmerk lag auf der Frage, ob es geogen bedingte Unterschiede in der Exposition an vergleichbaren Arbeitsplätzen und Unterschiede der Exposition an Arbeitsfeldern und bei Personen aus der Bevölkerung gibt.

Das Projekt war zunächst auf den Zeitraum vom 1.7.2001 bis zum 31.1.2004 ausgeschrieben und wurde dann auf Antrag bis zum 31.3.2005 und noch einmal kostenfrei bis 30.6.2005 verlängert. Die Verlängerung gab die Möglichkeit, die Anzahl der gesammelten Proben um 29 % zu erhöhen.

Die Studie wurde im Auftrag des BMU/BfS durchgeführt. Vom VKTA als Auftragnehmer wurde als unterauftragnehmender Partner des Projekts das Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik und der BG Chemie gewonnen. Das Interesse des IfS an der Studie war die Definition der entsprechenden Arbeitsfelder und der Vergleich der Ergebnisse der Studie mit dem sonst überwiegend angewendeten Verfahren, die Inkorporation durch die Messung der raumluftgetragenen Aktivität zu ermitteln, bzw. zu begrenzen.

## 2 Exposition durch natürliche Radioaktivität

Die Exposition durch natürliche Radioaktivität ist auf der Erde allgegenwärtig und damit ein Teil unseres Lebens. Die Höhe dieser Exposition kann dabei je nach Standort oder Tätigkeit sehr unterschiedlich sein.

### 2.1 Allgemeines

Über die primordialen Zerfallsreihen ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ )<sup>[9]</sup>, ihre Zerfallsprodukte und die regionale Verteilung ihrer Nuklide liegen umfangreiche Untersuchungen vor <sup>[3,4,5,6,7,8]</sup>. Abbildung 1 zeigt die Zerfallsreihe von  $^{238}\text{U}$ . Die im Zusammenhang mit dieser Studie relevanten langlebigen Tochternuklide des  $^{238}\text{U}$  ( $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) wurden rot markiert. Die nuklidspezifischen Parameter sind angegeben.

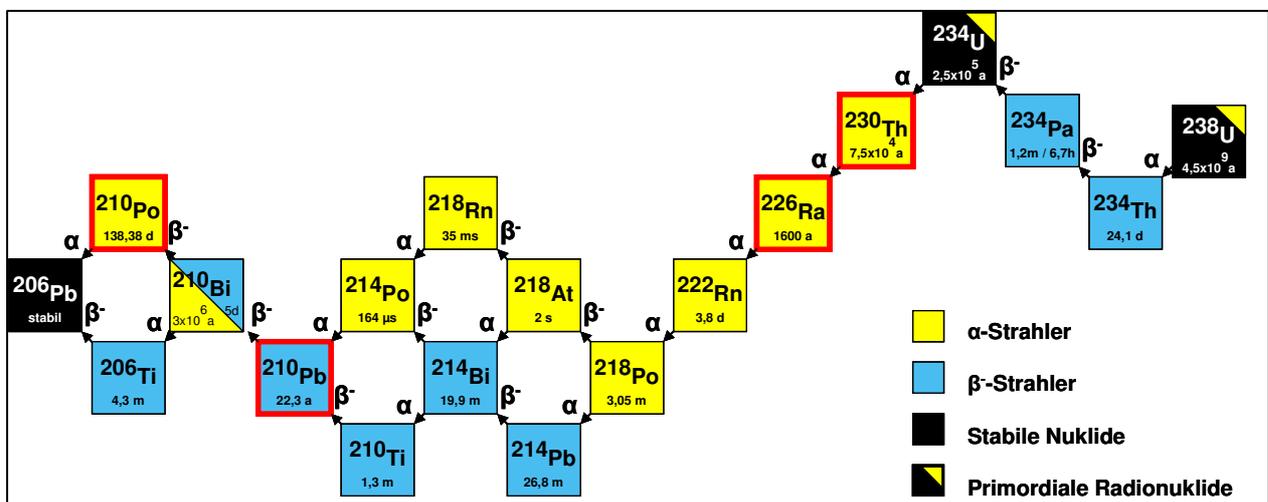


Abbildung 1: Zerfallsschema Uran-Radium-Reihe

Die Expositionspfade der Bevölkerung und der Arbeitskräfte durch natürliche Radionuklide sind ausführlich beschrieben worden<sup>[9]</sup>. Kartenmaterial <sup>[3,4,5,6,7]</sup> ist veröffentlicht, das die regionalen Verteilungen der für unterschiedliche Belastungspfade relevanten Parameter deutlich erkennen lässt.

Die für Bevölkerung und Arbeitskräfte relevanten Expositionspfade sind die externe Exposition durch Gammastrahlung (Abbildung 2) und die Inhalation des aus dem Erdboden austretenden und sich in Gebäuden (Wohnungen/Arbeitsstätten) anreichernden Radons (Abbildung 3). Hinzu tritt die Inkorporation der langlebigen Zerfallsprodukte. Diese werden mit Nahrung und Trinkwasser oder durch Inhalation oder Ingestion von Staub aufgenommen.

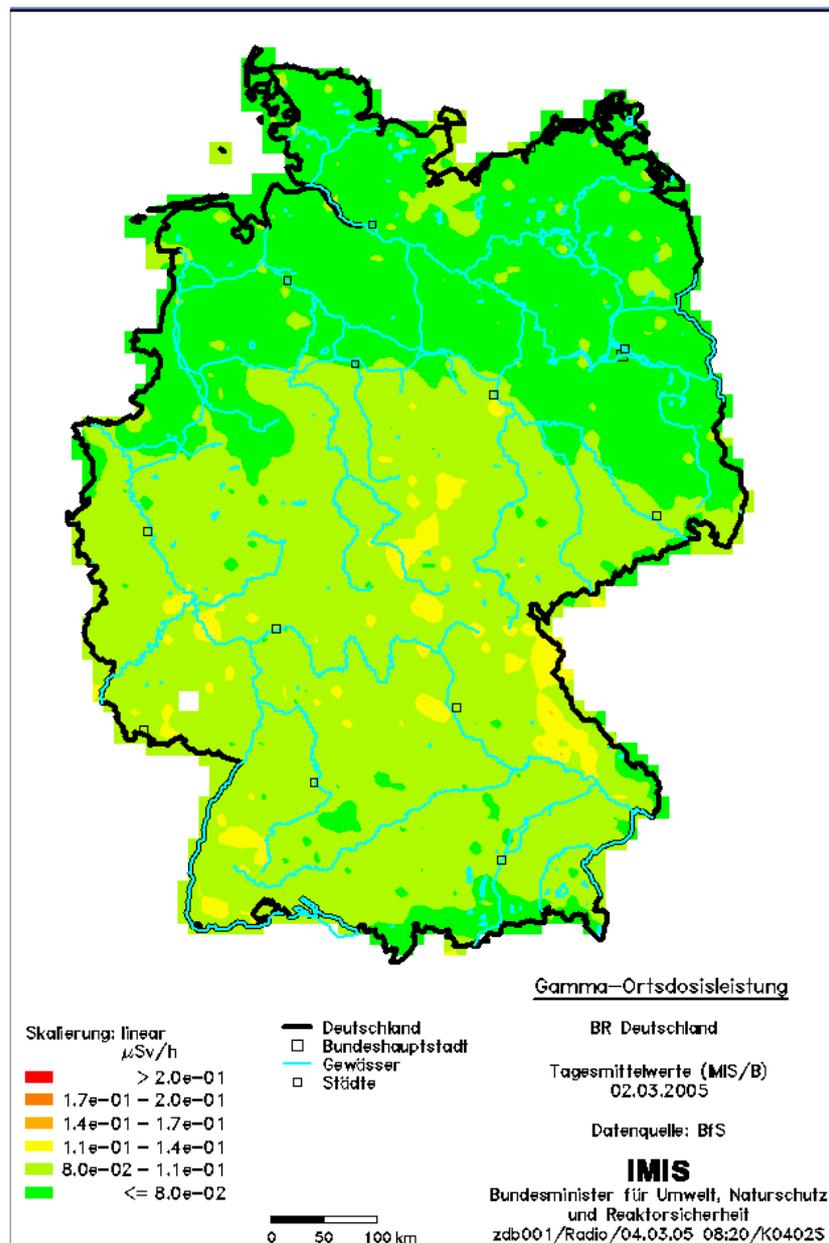


Abbildung 2: Gamma-Ortsdosisleistung<sup>[7]</sup>

Abbildung 2 lässt erkennen, in welchen Regionen mit einer erhöhten Gamma-Ortsdosisleistung zu rechnen ist, d.h. in diesen Regionen liegt eine geogen bedingte Erhöhung durch Radionuklide in der Erdkruste vor

Gleiche Ursache hat auch die Erhöhung des  $^{222}\text{Rn}$  in der Bodenluft in Abbildung 3. Nach diesen publizierten Daten wurde eine Auswahl der Regionen getroffen, die in die Studie einbezogen werden sollten.

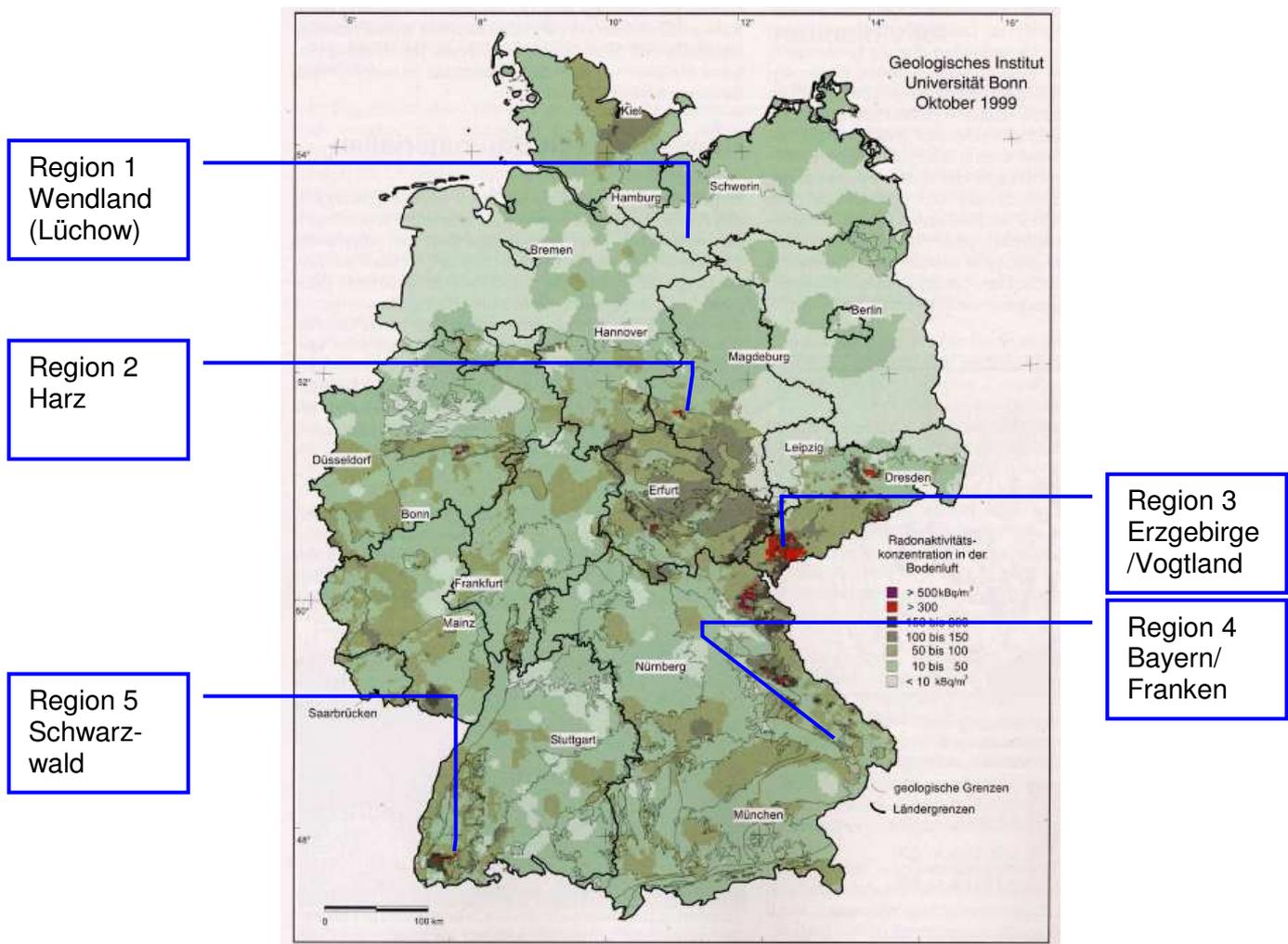


Abbildung 3: Radon in der Bodenluft [<sup>9</sup>] und Untersuchungsregionen

Ausführliche Untersuchungen über die Arbeitsplätze an denen natürliche radioaktive Stoffe zu einer möglichen Exposition der Mitarbeiter beitragen, sind durchgeführt worden [<sup>9</sup>]. Die Ergebnisse wurden für die Auswahl der einzubeziehenden Arbeitsfelder in den gewählten Regionen verwertet. Es ist zu berücksichtigen, dass nach Vorgabe des Auftraggebers bei den untertägigen Arbeitsplätzen der Uranerzbergbau auszuschließen war (s. 3.3).

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, in welchem Maße die Nahrungsaufnahme die Ausscheidungsraten natürlicher Radionuklide beeinflussen kann, ist es hilfreich, publizierte Daten über den Gehalt an den in der Studie zu untersuchenden Radionukliden in Nahrungsmitteln und Wasser zu betrachten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide in der Gesamtnahrung<sup>[10]</sup>

Nuklid	Babynahrung		Gesamtnahrung Erwachsener *	
	$\bar{m}$ [Bq/kg FM]	Wertebereich [Bq/kg FM]	$\bar{m}$ [Bq/kg FM]	Wertebereich [Bq/kg FM]
<sup>238</sup> U	0,007	0,005 - 0,010	0,008	0,001 - 0,020
<sup>234</sup> U	0,008 **		0,012	0,004 - 0,036
<sup>230</sup> Th	0,003	< 0,001 - 0,004	0,002	< 0,001 - 0,004
<sup>226</sup> Ra	0,022	0,009 - 0,032	0,021	< 0,006 - 0,042
<sup>210</sup> Pb	0,030	0,017 - 0,069	0,029	0,010 - 0,115

$\bar{m}$  - Mittelwert

\* gemischte Kost aus Gemeinschaftseinrichtungen

\*\* Einzelwert

Während die Maximalwerte für <sup>226</sup>Ra und <sup>210</sup>Pb für die Nahrung Erwachsener wesentlich höher liegen als für Babynahrung, unterscheiden sich die berechneten Mittelwerte sehr wenig.

Im Vergleich zu diesen Werten, die den Gehalt an natürlichen Radionuklide in der Frischmasse zeigen, gibt Tabelle 2 eine Übersicht zu den Mittelwerten der Jahresaktivitätszufuhr durch Ingestion.

Tabelle 2: Mittelwerte der Jahresaktivitätszufuhr natürlicher Radionuklide über Ingestion<sup>[11]</sup>

Nuklid	Gesamte Nahrung [ Bq/a]	Trinkwasser (440 l/a) [ Bq/a]
<sup>238</sup> U	5	2
<sup>226</sup> Ra	30	2
<sup>210</sup> Pb	50	0,4
<sup>210</sup> Po	50	0,2

Nach den Werten aus Tabelle 1 und 2 ist zu erwarten, dass diese Nuklidgehalte auch bei den Ausscheidungsraten im Stuhl ermittelt werden.

## 2.2 Überwachung von Inkorporationen

Für die innere Strahlenexposition sind die Inkorporationspfade der Inhalation und Ingestion vorrangig zu betrachten (der Sonderfall der kontaminierten Wunde wird hier nicht berücksichtigt). Während die Nuklidaufnahme durch Nahrungsmittel und Trinkwasser dem Ingestionsspfad zuzuordnen ist, und nicht beruflich bedingt ist, kann die Inhalation luftgetragener Radionuklide und von Stäuben sowohl dem beruflichen als auch dem privaten Umfeld zugeordnet werden. Die Inhalation von Stäuben führt in gewissem Maße allerdings auch zu einer ingestiven Exposition.

Zur Feststellung der in den Körper gelangten Radionuklide sind mehrere Verfahren möglich:

- Raum- oder Atemluftmessungen am Arbeitsplatz (in situ)
- Messungen aller aufgenommenen Nahrungsmittel und des Trinkwassers
- Messung der Aktivität der Radionuklide direkt im Körper (in vivo)
- Messung der Aktivität der Radionuklide in den Ausscheidungen (in vitro)

Das für die zu überwachende Person unkomplizierte Verfahren der in vivo-Messungen mit Ganz- oder Teilkörperzählern kann durchgeführt werden, wenn die Strahlung aufgrund ihrer Eigenschaften und der Aktivitätskonzentration auch außerhalb des Körpers nachgewiesen werden kann. Uran und seine langlebigen Tochternuklide erfordern als Alpha-Strahler ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) bzw. Beta Strahler ( $^{210}\text{Pb}$ ) im natürlichen Aktivitätsniveau eine in vitro-Untersuchung. Hierzu sind Analysen von Urin- und/oder Stuhlproben durchzuführen.

### 2.3 Literaturübersicht zu Ausscheidungsraten von $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$

Während es zu Ausscheidungsraten von Uran- und Thoriumnukliden eine Vielzahl von Publikationen und Studien gibt [12,13,14,15,16,17,18,19], die verschiedene Regionen und Arbeitsfelder in Deutschland erfassen, sind Daten zu Ausscheidungsraten der langlebigen Uranfolgeprodukten ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) in der Literatur meist nur für spezielle Untersuchungsgruppen oder -regionen beschrieben [20,21,22,23,24,25,26,27,28,29].

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht zu publizierten Ausscheidungsraten der studienrelevanten Nuklide. Es werden Schwankungsbreiten und/oder Mittelwerte der Ergebnisse angegeben.

Tabelle 3: Literaturdaten zu Ausscheidungsraten von  $^{230}\text{Th}$  (in Klammern MW)

Nuklid	Matrix	Ausscheidungsrate [mBq/d]	Zahl der Probanden	Untersuchungsregion/ Bemerkungen
$^{230}\text{Th}$	Stuhl	0,89-47 <sup>13</sup>	54	Deutschland
		1,7-16 (9,8) <sup>35,30</sup>	5	Berlin
		1,1-13,1(6,4) <sup>12</sup>	23	Deutschland
		6,8 <sup>39*</sup>	-	UNSCEAR 1993
		0,7-19(7) <sup>31</sup>	15	Dresden
		4,0 <sup>32</sup>	7	Jülich

\* Jahreswerte dividiert durch 365 Tage

Für die Ausscheidungsraten von  $^{230}\text{Th}$  in Stuhlproben kann man für Deutschland die Daten der bisherigen Untersuchungen auf Werte zwischen 1 und 20 mBq/d eingrenzen, nur Zingler<sup>[13]</sup> findet Werte bis zu 47 mBq/d.

Tabelle 4: Literaturdaten zu Ausscheidungsraten von  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  (in Klammern MW)

Nuklid	Matrix	Ausscheidungsrate [mBq/l]	Ausscheidungsrate/ spez. Aktivität [mBq/d] / Haar [mBq/g]	Zahl der Probanden	Untersuchungsregion/ Bemerkungen	
	Urin	1-20 <sup>33</sup>		10	Schweiz	
			<2 <sup>36</sup>	7	Berlin	
			<2 <sup>34</sup>	9	Jülich	
$^{226}\text{Ra}$	Stuhl		1030 <sup>23</sup>	1	Schweiz, Ra-Malerin	
			370 <sup>23</sup>	1	Schweiz Ehepartner der Ra-Malerin	
			38-121(65) <sup>35,36</sup>	9	Berlin	
			112 <sup>36</sup> 81 <sup>37</sup>	5	Schneeberg	
			81 <sup>38</sup>	-	ICRP 23	
			52 <sup>39</sup>	-	UNSCEAR 1993	
$^{210}\text{Pb}$	Urin		9,5-15,3 <sup>21</sup>	6	Brasilien Uranarbeiter	
			9,5-10,0 <sup>21</sup>	4	Brasilien Uran Büro	
			3,0-10,4 <sup>21</sup>	10	Brasilien VG	
		4,6 <sup>40</sup>		8	Brasilien Farmer	
		5,3 <sup>40</sup>		8	Brasilien Farmer VG	
			3,5-16 (7,4) <sup>35,36</sup>	10	Berlin	
	Stuhl		52-185(111) <sup>35,36</sup>	7	Berlin	
			156 <sup>36</sup>	5	Schneeberg	
			97 <sup>39</sup>	-	UNSCEAR 1993	
	Haar		0,7-6,5 (2,3) <sup>41</sup>	832,3±1,1) <sup>41</sup>		Japan
			1,48±0,28 <sup>42</sup>	331,5±0,3 <sup>42</sup>		Rostov / Don
			0,9-2,2 (1,5) <sup>43</sup>	291,5±0,4) <sup>43</sup>		Berlin
			7,5-30,2(18,0) <sup>43</sup>	4		Schneeberg
			4,6 <sup>40</sup>	8		Brasilien Farmer
			3,9 <sup>40</sup>	8		Brasilien Farmer VG
$^{210}\text{Po}$	Urin		9,5-13,3 <sup>21</sup>	6	Brasilien Uranarbeiter	
			8,6-8,9 <sup>21</sup>	4	Brasilien Uran Büro	
			2,9-14,9 <sup>21</sup>	10	Brasilien Bevölkerung	
			6,9±4,4 <sup>22</sup>	20	NR Philippinen	
			9,9±4,0 <sup>22</sup>	20	Raucher Philippinen	
			0,4 <sup>44</sup>	4	NR USA	
			2,4 <sup>44</sup>	3	Raucher USA	
		6,0 <sup>40</sup>		8	Brasilien Farmer	
		5,3 <sup>40</sup>		8	Brasilien Farmer VG	
			<1-13(4,1) <sup>35,36</sup>	12	Berlin	

Nachweisbare Ausscheidungsdaten für  $^{226}\text{Ra}$  wurden für Urin nur in der Schweiz gefunden, sie lagen zwischen 1 und 20 mBq/l. Für Haaranalysen konnten keine Werte für  $^{226}\text{Ra}$  erfasst werden. In Stuhlproben nicht beruflich strahlenexponierter Personen wurden dagegen Ausscheidungsdaten von 38-121 mBq/d gemessen.

Die publizierten Werte zeigen, dass es für die Nuklide in den untersuchten Matrices sehr große Schwankungsbreiten gibt. Es ist die bei den einzelnen Studien häufig sehr geringe Anzahl von Probanden zu berücksichtigen.

Die Autoren, die sowohl über die Analyse von  $^{210}\text{Po}$  als auch  $^{210}\text{Pb}$  berichten, geben in den meisten Fällen auch das Aktivitätsverhältnis der beiden Nuklide an (Tabelle 5).

Tabelle 5: Aktivitätsverhältnis  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  für verschiedene Matrices und Probandengruppen

Nuklid	Matrix	Ausscheidungsrate	Ausscheidungsrate/ spez. Aktivität
Urin	0,9-1,2	Uranarbeiter Brasilien	Santos <sup>21</sup>
Urin	0,9	Uran Brasilien Büro	Santos <sup>21</sup>
Urin	0,9-1,4	Brasilien Bevölkerung	Santos <sup>21</sup>
Urin	1,0-1,6	Brasilien Farmer Phosphatdünger	Santos <sup>40</sup>
Urin	0,9-1,2	Brasilien Farmer Vergleichsgruppe	Santos <sup>40</sup>
Urin	1,9	Uranarbeiter Japan	Okabayashi <sup>29</sup>
Haar	8,7±5,1	Japan	Yamamoto <sup>41</sup>
Haar	2,2±0,4	Rostov / Don	Landinskayaya <sup>42</sup>
Haar	1,3±0,6	Berlin	Hartmann <sup>43</sup>
Haar	1,0±0,1	Schneeberg	Hartmann <sup>43</sup>
Haar	0,9-1,2	Brasilien Farmer Phosphatdünger	Santos <sup>40</sup>
Haar	0,9-1,1	Brasilien Farmer Vergleichsgruppe	Santos <sup>40</sup>

Die angegebenen  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  Verhältnisse liegen für Urin und Haar zwischen 0,9 und 2,2. Das  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  Verhältnis im Haar bei Yamamoto<sup>[41]</sup> war wesentlich höher (MW 8,7+/-5,1, Median 7,1) verglichen mit verfügbaren Literaturdaten von etwa 2. Als Ursache für die höheren  $^{210}\text{Po}$ -Gehalte ist nach Yamamoto die Ernährung der Japaner mit erhöhtem Anteil an tierischen Eiweiß in Form von Meeresfrüchten zu sehen. Auch Okabayashi<sup>[29]</sup> stellte in Japan erhöhte  $^{210}\text{Po}$ -Werte bei Uranarbeitern fest, die er aber ebenfalls auf die Ernährung zurückführte.

Von Interesse ist auch eine Untersuchung der Haarwurzel und Haarspitze in Japan die zeigt, dass das  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  Verhältnis an der Wurzel doppelt so hoch ist wie an der Haarspitze. Bei einem Wachstum von 1-2 cm / Monat ist an der Spitze das kurzlebige  $^{210}\text{Po}$  schon abgeklungen, während das  $^{210}\text{Pb}$  über die gesamte Länge konstant war. Vergleichende Messungen von gewaschenen und ungewaschenen Haaren zeigten nahezu die gleichen Werte für  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$ , was hinweist, dass die Oberflächenkontamination der Haare nur gering ist oder vernachlässigt werden kann. Santos<sup>[21]</sup> stellte dagegen fest, dass bei Uranarbeitern die Ergebnisse für gewaschene Haare 40% niedriger liegen als für ungewaschene, was auf eine starke Luftkontamination schließen lässt. In den japanischen Untersuchungen wurden keine Unterschiede zwischen Männern und Frauen, Rauchern und Nichtrauchern und auch keine regionalen Unterschiede festgestellt.

Santos<sup>[21]</sup> fand bei Uranarbeitern nur geringe Unterschied für  $^{210}\text{Po}$  und  $^{210}\text{Pb}$  im Urin. Etwas höhere Werte stellte er bei Berufstätigen im chemischen Laboratorium einer Uranmine fest. Santos, Gotchy und Schiager<sup>[45]</sup> fanden unterschiedliche Werte für  $^{210}\text{Po}$  und  $^{210}\text{Pb}$  im Urin bei Arbeitern von geöffneten und stillgelegten Urangruben, was sie auf erhöhten Anteil von  $^{222}\text{Rn}$ -Töchtern in der Atmosphäre von geschlossenen Minen zurückführten.

Bei Vergleichsgruppen der Bevölkerung wurden für  $^{210}\text{Po}$  in Urin Werte im Bereich 3,7-18,3 mBq/d gefunden<sup>[21]</sup>. Azeredo und Lipsztein fanden im Gegensatz zu Santos, der keine Unterschiede für Raucher und Nichtraucher bei den Ausscheidungsraten von  $^{210}\text{Po}$  im Urin feststellte, unterschiedliche Werte<sup>[21]</sup> für Raucher (3,7 - 12,4 mBq/l Urin) und Nichtraucher 0,7-5,2 mBq/l Urin).

Ladinskaya<sup>[42]</sup> fand bei Untersuchungen von Wasser, Nahrungsmitteln, menschlichem Gewebe und Knochen, dass die Werte für  $^{210}\text{Po}$  in Haaren 3 mal höher als in Knochen sind, Das  $^{210}\text{Po}$  / $^{210}\text{Pb}$ - Verhältnis ist 2,2. Das spricht dafür, dass  $^{210}\text{Po}$  selbst im Haar vorhanden ist und nicht nur aus dem Zerfall des  $^{210}\text{Pb}$  resultiert.

Von erheblicher Bedeutung für die Inkorporation von  $^{210}\text{Po}$  ist das Rauchen. Die Gefahr durch  $^{210}\text{Po}$  Belastung beim Rauchen geht davon aus, dass es bei der Temperatur einer brennenden Zigarette (600-800 °C) verdampft, im Gegensatz dazu haben Studien aus Großbritannien gezeigt, dass ebenfalls im Tabak enthaltenen Nuklide wie  $^{40}\text{K}$  und  $^{226}\text{Ra}$  nicht flüchtig sind und deshalb keine entscheidende Strahlendosis erzeugen<sup>[46]</sup>. Unterschiedliche Werte für  $^{210}\text{Po}$  in Urin zeigt eine Studie von Radford in den USA<sup>[44]</sup> für Raucher (2,4 mBq/d) und Nichtraucher (0,4 mBq/d), Juan ermittelte auf den Philippinen für Raucher 6,6 mBq/d im Urin und für Nichtraucher 9,6 mBq/d <sup>[22]</sup>.

Wenger<sup>[23]</sup> untersuchte eine ehemalige Radium-Malerin 6 Jahre nach ihrer Pensionierung und gleichzeitig ihren Ehemann. Im Zeitraum von 10 Jahren ergaben sich Werte für  $^{210}\text{Po}$  in Stuhlproben von anfangs 2,15 Bq/d bis 0,78 Bq/d nach 10 Jahren bei der Malerin und von 1,37 Bq/d bis zu 0,22 Bq/d beim Ehemann.

Die in Tabelle 4 erfassten Daten sind in den meisten Fällen auf spezielle Personengruppen oder Regionen beschränkt. In 66 % der erfassten Daten standen für die Untersuchung weniger als 10 Probanden zu Verfügung.

### 3 Studiendurchführung

Die Studienplanung und Durchführung wurden in einem Projekthandbuch dokumentiert. Der Koordination mit dem Auftraggeber dienten regelmäßige Statusgespräche. Statusberichte und Jahresberichte wurden erstellt. Auf diese Einzelheiten wird hier nicht weiter eingegangen.

#### 3.1 Auswahl der Zielvariablen (Nuklide)/Umfang der Studie

Die modifizierte Projektausschreibung (s. Einleitung) nennt detailliert die Aufgabe und die Zielvariablen des Projekts. Danach sind tagesbezogen die Ausscheidungsraten, bzw. die spezifische Aktivität (für Haare) zu bestimmen für:

- $^{230}\text{Th}$  (Stuhl)
- $^{226}\text{Ra}$  (Urin, Stuhl, Haare)
- $^{210}\text{Pb}$  (Urin, Stuhl, Haare)
- $^{210}\text{Po}$  (Urin)

Für Stuhl- und Urinproben werden die Ausscheidungsraten in mBq/d, für die Haare die spezifische Aktivität in mBq/g angegeben.

*Gemäß der Aufgabenstellung waren die Probanden aus Gruppen von Personen zu wählen, die aufgrund ihrer Arbeit in erhöhtem Maße natürliche radioaktive Stoffe inkorporieren können. Die Auswahl sollte möglichst solche Regionen betreffen, in denen eine höhere Belastung durch natürliche Radionuklide bekannt ist.*

#### 3.2 Untersuchungsregionen

Grundlage zur Bestimmung der Studienregionen bildeten publizierte Karten (Abbildung 2 und 3). Indikator für den Grad der Exposition waren die Messwerte der Bodenkontamination, die Werte von Radon in der bodennahen Luft und im Wasser sowie die gemessenen ODL-Verteilungen. Als Bereiche mit erhöhtem Untergrund an natürlichen Radionukliden wurden die folgenden vier Regionen Deutschlands ausgewählt:

- Südlicher Schwarzwald,
- Nordostbayern (Franken, Fichtelgebirge, Oberpfalz, Bayerischer Wald),
- Südsachsen (Erzgebirge, Vogtland)
- Harz

Als Vergleichsregion diente in Norddeutschland die Region um Lüchow (Wendland) mit zu erwartender geringer geogener Belastung.

### 3.3 Arbeitsfelder

Nach Veröffentlichung der Empfehlungen des Bandes 60 der internationalen Strahlenschutzkommission [47] wurde deutlich, dass der Exposition von Arbeitnehmern durch natürliche radioaktive Stoffe eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist. Die Grundnormen der Europäischen Union nahmen die Empfehlungen auf und konkretisierten sie [48]: Arbeitsfelder, die durch erhöhte Einwirkung natürlicher ionisierender Strahlung gekennzeichnet sein können, sind zu prüfen und zu beurteilen. Im Bedarfsfalle sind Schutzmaßnahmen festzulegen und die betroffenen Arbeitnehmer zu überwachen.

Die rechtlichen Festlegungen in Deutschland[49] konkretisieren die internationalen Empfehlungen und europäischen Festlegungen.

Die StrlSchV definiert im Teil 3 und im Zusammenhang mit der Anlage XI die Arbeitsfelder, die im Hinblick auf die Einwirkung ionisierender Strahlung aus natürlichen Quellen einer besonderen Überwachung bedürfen.

Für die in dieser Studie zu untersuchenden langlebigen Urantöchter ( $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) sind zum einen Arbeiten mit Staubbelastungen oder mit Aerosolen interessant, z.B. in untertägigen Bergwerken und Höhlen oder in Bädern, in denen ein Beitrag durch Inkorporation möglich ist. Zum anderen sind für die Studie die in Anlage XI Teil A beschriebenen Arbeitsfelder, die durch eine erhöhte  $^{222}\text{Rn}$  Exposition gekennzeichnet sein können, von Interesse. Bei diesen ist verstärkt eine Inkorporation der Radonfolgeprodukte  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$  zu erwarten.

Es sind dies folgende Arbeitsfelder/Arbeitsstätten:

- untertägige Bergwerke, Schächte und Höhlen, einschließlich Besucherbergwerke [50,51,52,53,54]
- Radon-Heilbäder und Heilstollen [55,56,57,58,59,60,61,62]
- Anlagen der Wassergewinnung, Aufbereitung und Verteilung [63,64,65,66,67,68,69,70,71,72]
- Betriebe der Erdgas- und Erdölförderung, einschl. der Nebenbetriebe [73,74]

Die angegebenen Publikationen befassen sich im Allgemeinen mit der Arbeitsplatzanalyse durch Messungen der Raumluft, in einigen Fällen wurden auch Personendosimeter getragen und ausgewertet. Untersuchungen von Inkorporationen durch Bestimmung von Ausscheidungsraten in Stuhl oder Urin wurden nur in Einzelfällen durchgeführt.

### 3.4 Probandenfindung-Probandenwerbung

#### 3.4.1 Probanden aus den gewählten Arbeitsfeldern

Im Zuge ihrer präventiven Aufgaben im Arbeits- und Gesundheitsschutz, haben die gewerblichen Berufsgenossenschaften ihre Mitgliedsbetriebe auch in Fragen des Strahlenschutzes zu betreuen und zu beraten. Das Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie berät auf Wunsch sowohl Unfallversicherungsträger als auch direkt Betriebe. Es koordiniert auch

Schwerpunktaktionen. Da es sich bei vorliegender Studie um eine branchenübergreifende Fragestellung handelt war es nahe liegend, dass sich das Institut an dem Projekt beteiligte.

Die genannten Arbeitsfelder fallen, sofern die Unternehmer der gewerblichen Wirtschaft angehören, in den Zuständigkeitsbereich der folgenden Berufsgenossenschaften:

Berufsgenossenschaft für den Bergbau (BBG)

Berufsgenossenschaft der Gas-, Fernwärme und Wasserwirtschaft (BGFW)

Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW).

Betriebe, die ausschließlich in kommunaler oder privater Hand liegen, (z.B. Besucherbergwerke oder einige Heilstollen) gehören nicht zum Klientel der Berufsgenossenschaften.

Von Seiten der Präventionsabteilungen der genannten Berufsgenossenschaften wurden geeignete Betriebe vorgeschlagen. Kriterien für die Auswahl eines Betriebes waren seine regionale Lage in den ausgewählten Gebieten und seine Bereitschaft, das Projekt zu unterstützen.

In den Betrieben, die Ihre Unterstützung zugesagt hatten, wurden seitens der beteiligten BGen und der Auftragnehmer Betriebs- und Personalräte, Sicherheitsfachkräfte und Strahlenschutzbeauftragte und schließlich die Mitarbeiter über das Projekt informiert und ihnen eine Teilnahme – selbstverständlich auf freiwilliger Basis - angeboten. Während die überwiegende Zahl der ursprünglich angesprochenen Betriebe das Projekt unterstützte, gab es auch einige, die nicht an einer Mitwirkung ihrer Mitarbeiter interessiert waren. In solchen Fällen bestand keine Möglichkeit, die Mitarbeiter einzubeziehen.

Die angesprochenen Betriebe machten Ihre Unterstützung in allen Fällen davon abhängig, über die Ergebnisse informiert zu werden. Dies wurde zugesagt, wobei auf die Notwendigkeit der Wahrung datenschutzrechtlicher Belange hingewiesen wurde. Personenbezogene Angaben, wozu auch individuelle Analyseergebnisse gehören, können nur mit Zustimmung der Probanden bekannt gegeben werden. Liegt die Einwilligung nicht vor, kann die Information nur summarisch oder in Form von Mittelwerten weitergegeben werden.

In Betrieben, die sich in kommunaler oder privater Trägerschaft befinden, meist sind dies Besucherbergwerke und Bäder oder Heilstollen, wurden die Betreiber direkt angesprochen und das Projekt vorgestellt.

Es wurden zunächst 49 Betriebe in 9 Regionen angesprochen bzw. aufgesucht, 22 Betriebe lehnten Mitwirkung oder Unterstützung ab. Aus 27 Betrieben konnten dann 70 Probanden gewonnen werden.

Die in Frage kommenden Mitarbeiter eines zustimmenden Betriebes wurden in einer gemeinsamen Informationsveranstaltung über das Projekt aufgeklärt. Viele Mitarbeiter zeigten sich über die eventuelle Erhöhung des natürlichen Strahlenpegels an ihrem Arbeitsplatz zumindest andeutungsweise informiert.

Bei der Veranstaltung standen neben den technischen Maßnahmen der Probenahme vor allen Dingen auch Fragen des Daten- und Persönlichkeitsschutzes im Vordergrund. Dieses Erfordernis resultierte zwangsläufig aus der Mitteilung an die potentiellen Probanden, dass zur Bewertung der messtechnischen Resultate gewisse Angaben über persönliche Daten und Lebensgewohnheiten nötig sind. Die Mitarbeiter

gaben Ihre Zustimmung überwiegend ebenfalls unter der Bedingung, dass Sie über die Ergebnisse informiert würden. Den Mitarbeitern wurde im Anschluss an die Informationsveranstaltung eine ausführliche Informationsschrift zu Hintergrund und Durchführung der Studie ausgehändigt.

### 3.4.2 Allgemeine Bevölkerung

Während sich der Zugriff auf Personen in der Arbeitswelt als relativ einfach gestaltet, ist die Einbeziehung der Bevölkerung in solche Studien problematischer. Eine sich anbietende Möglichkeit ist die Stichprobenauswahl aus Melderegistern. Dazu bedarf es der Zustimmung der zuständigen Datenschutzbeauftragten, die bei Beachtung gewisser Verfahrensschritte zu erreichen ist. Allerdings ist dies Verfahren sehr aufwendig, da eine große Zahl von Personen anzuschreiben und erfahrungsgemäß die Zahl der positiven Rückläufer sehr klein ist. Da in dieser Studie Stuhl- und Urinproben gesammelt werden mussten, war damit zu rechnen, dass die Zahl der Mitwirkenden sehr klein gewesen wäre. Darüber hinaus wäre eine aufwändige persönliche Information am Wohnsitz jedes einzelnen Probanden notwendig geworden. Dies war im Rahmen des hier geförderten Projektumfanges nicht zu leisten. Deshalb wurden Personen aus dem (familiären) Umfeld der beruflich tätigen Probanden (s. 3.4.1), bzw. Mitarbeiter der beteiligten Betriebe, die nicht exponiert sind, gewonnen. Damit ergaben sich hinsichtlich der Aufklärung der Probanden und der Erläuterungen zum Verfahren und zum Hintergrund der Studie eine Reihe von Vereinfachungen. Außerdem war damit sichergestellt, dass die Kopplung von Region und Ernährung der beiden Probandengruppen sehr hoch ist. Damit verringert sich für diese beiden Parameter der Störfaktoren bei dem Vergleich Bevölkerung – Arbeitsfelder.

Die Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Probandenkohorte. In Anlage 3 ist die Probandenkohorte detailliert beschrieben.

*Tabelle 6: Probandenkohorte nach Status, Alter und Geschlecht*

Probanden	Geschlecht	Altersbereich (Jahre)	Zahl
Beschäftigte	m	25 - 74	59
	w	33 - 62	11
Bevölkerung	m	21 - 70	22
	w	29 - 64	12

In Tabelle 7 sind als Übersicht die Arbeitsfelder, die Regionen und der Status der untersuchten Probanden benannt.

Tabelle 7: Probandenkohorte nach Arbeitsfeldern, Regionen und Status

Arbeitsfelder	Regionen	Probandenzahl	
		Beschäftigte	Bevölkerung
Erdgas	Wendland	3	3
Schaubergwerke	Erzgebirge/Vogtland	7	13
Wasserwerke		9	
Bäder/Heilstollen		7	
Schaubergwerke	Oberpfalz/ Bayerischer Wald/ Franken	4	2
Wasserwerke		6	
Bäder/Heilstollen		4	
Schaubergwerke	Harz	10	9
Wasserwerke		3	
Bäder/Heilstollen		1	
Schaubergwerke	Schwarzwald	6	7
Wasserwerke		10	
Bäder/Heilstollen			
	<i>Gesamtzahl:</i>	<i>70</i>	<i>34</i>

Die vielfältigen Einflussparameter, wie z.B. körperliche Verfassung, Nahrungsaufnahme oder Jahreszeit lassen erhebliche Streuung der Ergebnisse erwarten. Zur Erfassung des Streubereiches wurden daher mehrere Probenahmen geplant. Die Zahl der einzubeziehenden Probanden wurde begrenzt durch den Studenumfang. Die ursprünglich vorgesehene maximale Anzahl von 200 Probenahmen wäre durch 50 Probanden und 4 Probenahmezyklen ausgeschöpft. Bei einem zunächst postulierten Ausscheiden von ca. 50% der Probanden wurden daher 100 Probanden geworben, im Ergebnis stellten sich 104 für die Studie zur Verfügung. Erstaunlicherweise war die Zahl der Probanden, die das Untersuchungskollektiv verließen, aber viel geringer. Von der ersten zur zweiten Probenahme erklärte nur ein Proband seinen Ausstieg aus dem Projekt (weniger als 1%). Ohne willkürlich Probanden auszuschließen, war damit nur eine zweite Probenahme möglich. Aufgrund der Erweiterung des Projekts ab 2004 konnte jedoch mit der vergrößerten Probandenzahl eine dritte Probenahme durchgeführt werden. Es standen dann ca. 25-30% mehr Proben zur Verfügung. Aufgrund der Zeitverzögerung zwischen zweiter und dritter Probenahme, die sich aus der Antragstellung zur Verlängerung der Studie ergab, waren bei der dritten Probenahme 23 Probanden nicht mehr verfügbar (Krankheit, Arbeitsplatzwechsel, bei fünf Probanden Desinteresse).

### 3.5 Probenahme

Nachdem die Probanden ihre Bereitschaft erklärt hatten, an der Studie teilzunehmen, wurden sie persönlich und schriftlich über das Projekt und seine Durchführung informiert.

Die Probenahmen (PN) erfolgten immer an einem Wochenende, freitags wurden den Probanden die vorbereiteten Probengefäße übergeben, spätestens am Sonntag die Proben abgeholt.

Die Probanden erhielten vor Ort eine persönliche und schriftliche Einweisung zur Probenahme (Anlage 1). Bei dieser Gelegenheit wurden auch anstehende Fragen der Probanden geklärt.

Die Probanden bekamen eine Kennzahl, die in der Studie verwendet wurde und deren Identität nur dem Auftragnehmer bekannt ist.

Vor der ersten Probenahme wurden die Probanden zu persönlichen Daten und Lebensgewohnheiten interviewt (Fragebogen Anlage 2). Dieser Fragebogen diente dazu, bei eventuellen Auffälligkeiten der Untersuchungsergebnisse nach möglichen Ursachen zu forschen, interessant sind dabei besondere Ernährungsgewohnheiten, Rauchen, Medikamenteneinnahme.

Der Abstand zwischen den PN lag zwischen 7 und 26 Monaten (Tabelle 8). Der geplante Abstand von maximal 12 Monaten konnte bei der 3. PN nicht gehalten werden, da diese bereits den geplanten Projektumfang überstieg und daher erst genehmigt werden musste.

*Tabelle 8: Zeitdifferenz der PN für die einzelnen Probandengruppen*

<b>Probandengruppe</b>	<b>Zeitdifferenz zwischen 1. und 2. PN [Monate]</b>	<b>Zeitdifferenz zwischen 2. und 3. PN [Monate]</b>
Bevölkerung Erzgebirge	12	16
Erdgas Wendland	9	26
WW Erzgebirge	9	17
SB Erzgebirge	9	15
WW Harz	10	17
SB Harz	7	20
Bayern gesamt	10	12
WW Schwarzwald	10	13
SB Schwarzwald	8	14
Bäder	8	15
<b>Mittlerer PN-Abstand</b>	<b>9,2</b>	<b>16,5</b>

Die Probanden wurden aufgefordert, während der PN ihre normalen Ernährungsgewohnheiten beizubehalten.

Beprobt wurden Urin- Stuhl- und Haarproben. In 24 Stunden wurden alle Ausscheidungen in den Gefäßen gesammelt. Für die Sammlung von Urin wurden gefärbte 2l-PE-Flaschen verwendet, die Stuhlproben wurden mit Spezialtüten der Fa. Plastunion (Frankreich) genommen und in 1l Polycarbonatdosen aufbewahrt und transportiert. Bei Urinproben wurde der Beginn der Sammlung mit Datum und Uhrzeit notiert, bei den Stuhlproben der exakte Zeitpunkt des Ereignisses innerhalb der 24-Stunden-Probenahmezeit, um die Probe tatsächlich einer 24 Std.-Ausscheidung zuordnen zu können. Bei der Auswertung wurden die Massen und Volumina der Proben dann auf die 24-Stunden-Sammlung korrigiert. Üblicherweise wird von einer mittleren Ausscheidung von 5 g/d Stuhlaschemasse und 1,4 l/d Urin ausgegangen. Im

Verlauf der Untersuchungen zeigten sich erhebliche Unterschiede der Ausscheidungsmengen bei den Probanden, die unter 4.1 diskutiert werden. Die Probanden zeigten sich bei allen Probenahmen sowohl in der Kontinuität der Teilnahme als auch in der exakten Protokollführung während der PN als überaus zuverlässig.

Etwas komplizierter erwies sich die Haarprobenahme. Zur vorgesehenen Analytik von  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{210}\text{Pb}$  sind jeweils 0,5 - 1,0 g Haar erforderlich. Die tatsächlichen Probenmengen lagen jedoch zwischen 0,1 und 3 g Haar, dabei hatten etwa 60 % der Haarproben weniger als 0,5 g Masse. Nach Ausschreibung des Projektes sollte ursprünglich ein Überblick über die Nuklidgehalte der letzten vier Wochen gegeben werden. Nach Vorschriften zur Haaranalytik [75] schneidet man das Haar dazu knapp über der Kopfhaut ab und schneidet den Teil der Haare, der länger als 1 cm ist ab und verwirft ihn. Da das Haar etwa einen Zentimeter pro Monat wächst, erhält man so einen Überblick über den letzten Monat. In dieser Studie war diese Art der Probengewinnung nicht möglich. 67 % der Probanden waren männlichen Geschlechts mit überwiegend kurzen Haarschnitten oder schon stark reduziertem Haupthaar. In diesen Fällen war eine Probenahme an der Kopfhaut nicht zumutbar. Für alle Haarprobenahmen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber eine Probe an den Haarspitzen genommen. Die Ergebnisse können deshalb nicht einem bestimmten Wachstumszeitraum zugeordnet werden. Bei einigen Probanden ergab sich so wenig Material, dass nicht bei jeder Probenahme beide Nuklide ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) bestimmt werden konnten.

### 3.6 Analysenverfahren

Prinzipiell sind zur Analytik die folgenden Schritte durchzuführen:

- Probenvorbereitung
- Anreicherungsverfahren
- Messverfahren

Zur Bestimmung der Nuklide  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  in biologischen Proben stehen verschiedene Messmethoden zur Verfügung, die sich im Zeit- und Kostenaufwand, den Nachweisgrenzen und der Eignung für diese Probenarten unterscheiden:

- Alpha-Spektrometrie (Thorium-Nuklide,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) [76,13, 77,78]
- Gamma-Spektrometrie ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) [79,80,81,82]
- LSC ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) [83, 84, 85, 86, 87,88]
- ICP-MS (Thorium,  $^{226}\text{Ra}$ ) [19,89, 90,19]
- Alpha-Beta-Proportionalzähler ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) [91, 92]
- Emanometrie ( $^{226}\text{Ra}$ ) [93,94]

Die typischen Nachweisgrenzen der Methoden aus Literaturdaten und der Vergleich mit den routinemäßig im Labor erreichten Nachweisgrenzen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

**Tabelle 9 :** Mögliche Methoden für die Analytik der studienrelevanten Nuklide und typische Nachweisgrenzen, Literaturwerte und realisierte Werte des VKTA Labors

Messmethode	<sup>230</sup> Th [mBq/ Probe]		<sup>226</sup> Ra [mBq/ Probe]		<sup>210</sup> Pb [mBq/ Probe]		<sup>210</sup> Po [mBq/ Probe]	
	Literatur	Labor	Literatur	Labor	Literatur	Labor	Literatur	Labor
Gamma-Spektrometrie	-	<b>150</b>	81 <sup>81</sup>	<b>5</b>	1000 <sup>79</sup> 140 <sup>95</sup> 30 <sup>96,97</sup>	<b>40</b>	-	-
Alpha-Spektrometrie	0,5 <sup>96</sup>	<b>0,5</b>	0,5 <sup>81</sup>	-	0,5 <sup>97</sup>	<b>0,5</b>	0,5 <sup>97</sup>	<b>0,5</b>
ICP-MS	-	-	0,2 <sup>98,89</sup>	<b>0,1</b>	-	-	-	-
LSC	-	-	1,0 <sup>81</sup>	<b>1,0</b>	0,5 <sup>97</sup>	<b>1,0</b>	1 - 0,3 <sup>97</sup>	-
Emanometrie	-	-	5,7 <sup>81</sup>	<b>10</b>	-	-	-	-
Alpha-Beta-Proportionalzähler	-	-	5,0 <sup>81</sup>	-	5 <sup>97</sup>	<b>5,0</b>	5 <sup>97</sup>	-

Im Laufe des Projektes wurden insgesamt 809 Proben (Urin-, Stuhl-, Haarproben) genommen und analysiert. Einen Überblick darüber gibt die Tabelle 10.

**Tabelle 10:** Zahl der durchgeführten Analysen ( Gesamtzahl 2102 Analysen)

Matrix	Probenzahl	Durchgeführte Analysen / Probe			
		<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Po	<sup>210</sup> Pb	<sup>230</sup> Th
<b>Urin</b>					
1. Probenahmezyklus	104	104	104	104	-
2. Probenahmezyklus	101	101	101	101	-
3. Probenahmezyklus	81	81	81	81	-
<b>Stuhl</b>					
1. Probenahmezyklus	104	104	-	104	104
2. Probenahmezyklus	101	101	-	101	101
3. Probenahmezyklus	81	81	-	81	81
<b>Haare</b>					
1. Probenahmezyklus	104	100	-	66	-
2. Probenahmezyklus	64	53	-	52	-
3. Probenahmezyklus	69	46	-	69	-

Die Durchführung der Analysen wird im Folgenden für die einzelnen Nuklide beschrieben. In Vorbereitung der Studie wurden verschiedene Methode miteinander verglichen (Tabelle 9), die im Ergebnis für diese Untersuchungen eingesetzt sind in Tabelle 11 zu sehen.

Zur Berechnung des Aktivitätsgehaltes der Proben wird die Aktivitätskonzentration  $c$  in mBq/l oder die spezifische Aktivität  $a$  in mBq/g ermittelt. Zur Auswertung der

Ergebnisse werden diese Aktivitätsgehalte auf die individuellen Tagesausscheidungen umgerechnet und so die Ausscheidungsraten (AR) bestimmt.

### **3.6.1 Probenvorbereitung**

#### **Konservierung der Proben**

Die Urinproben wurden im Labor sofort mit  $\text{HNO}_3$  angesäuert und kühl gelagert, die Stuhlproben zur Verhinderung einer zu starken Geruchsbelästigung vor dem Öffnen in den Dosen eingefroren und am nächsten Tag nach Bestimmung der Frischmasse sofort bei  $450^\circ\text{C}$  verascht.

Um die Haare von anhaftendem Staub und Fett zu befreien, wurden die Haarproben zunächst mit destilliertem Wasser und Aceton gewaschen und anschließend getrocknet.

#### **Aufschluss der Proben**

##### ***Urinproben***

1l Urin wird bis auf ca. 100 ml eingeeengt. Bei weniger als 3 l Tagesprobe wurde der Urin auf die drei Analysen ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) verteilt. Die Urinprobe wird in eine Abdampfschale überführt, zur Trockene eingedampft und im Muffelofen bei  $450^\circ\text{C}$  zersetzt. Die mineralisierte Probe wird mit verdünnter  $\text{HNO}_3$  gelöst.

##### ***Stuhlproben***

Die Ascheprobe wird homogenisiert und für die Analyse 0,5 g eingewogen. Reste an organischer Substanz werden mit  $\text{HNO}_3$  und  $\text{HClO}_4$  zerstört.

##### ***Haarproben***

Die vorbehandelten Haare werden eingewogen und mit konzentrierter  $\text{HNO}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}_2$  aufgeschlossen.

### 3.6.2 Radiochemische Methoden

Für diese Untersuchungen wurden folgende Methoden eingesetzt:

Tabelle 11: *Verwendete analytische Methoden*

Nuklid	Matrix	Radiochemische Methode	Messmethode
$^{230}\text{Th}$	Stuhl	Mitfällung Anionenaustausch Flüssigextraktion Fluoridfällung	$\alpha$ -Spektrometrie ICP-MS (Qualitätssicherung)
$^{226}\text{Ra}$	Urin Stuhl Haare	Mitfällung, Ionenaustausch	ICP-MS
$^{210}\text{Pb}$	Urin Stuhl Haare	Hydroxidfällung Spontanabscheidung	$\alpha$ -Spektrometrie $^{210}\text{Po}$
$^{210}\text{Po}$	Urin	Hydroxidfällung Spontanabscheidung	$\alpha$ -Spektrometrie

#### 3.6.2.1 $^{230}\text{Th}$ -Bestimmung in Stuhlproben

##### Methode

Die Analyse der Thorium-Nuklide erfolgt durch  $\alpha$ -spektrometrische Messung nach radiochemischer Isolierung.

##### Analytik

Für die Analyse wird 0,5 g Stuhlprobe eingesetzt und 25 mBq  $^{229}\text{Th}$  als Tracer zur Ausbeutekontrolle zugegeben. Nach Anreicherung durch Hydroxidfällung folgt eine Anionenaustauschchromatographie mit DOWEX<sup>®</sup> IX8. Nach Elution des Thoriums mit 10M HCl (Trennung von Uran) schließt sich eine Extraktion mit TOPO/Cyclohexan und Reextraktion mit 0,3 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> an.

Durch Zugabe von CeCl<sub>3</sub>-Träger und Flusssäure wird das Thorium gefällt und der Fluoridniederschlag durch Vakuumfiltration auf einem Nuklearfilter absorbiert.

Das so gewonnene Präparat wird durch  $\alpha$ -Spektrometrie gemessen.

##### Berechnung des Aktivitätsgehaltes der Proben

Die Aktivitätsberechnung für die Thorium-Nuklide erfolgt nach der Gleichung:

$$a_{230Th} = \frac{R_{230Th} * A_{229Th}}{R_{229Th} * M} \quad (1)$$

$a_{230Th}$	spezifische Aktivität für für $^{230}Th$ in der Stuhlasche [mBq/g]
$A_{229Th}$	Aktivität des zugesetzten Radiotracers $^{229}Th$ [mBq]
R	Nettozählrate [Ips]
M	eingesetzte Aschemasse der Einzelprobe[g]

Die Ausscheidungsrate für  $^{230}Th$  in Stuhlproben wird nach Formel 2 berechnet.

$$AR_{230Th} = a_{230Th} * M_G \quad (2)$$

$M_G$	Gesamtaschemasse der Tagesausscheidung [g]
-------	--

### 3.6.2.2 $^{226}Ra$ -Bestimmung in Urin-, Stuhl- und Haarproben mit ICP-Massenspektrometrie

#### Methode

Messung mit ICP-Massenspektrometrie nach radiochemischer Trennung des Radiums von der Matrix.

#### Analytik

Nach Vorbehandlung und Aufschluss der Proben wird das Radium durch Phosphatmitfällung angereichert und nach Zersetzung des Niederschlages mit  $HNO_3/H_2O_2$  mit HCl abgeraucht.

Die salzsaure Lösung wird mit Ionenaustauscherharz DOWEX® IX8 16 Stunden geschüttelt, nach Überführung in eine Säule gewaschen und mit HCl/  $HNO_3$  wird das Radium vom Harz eluiert.

Das Eluat wird eingedampft, mit  $HNO_3/H_2O_2$  abgeraucht und in 5 ml 1 %iger  $HNO_3$  für die Radium-Bestimmung mit ICP-MS aufgenommen.

Für die Bestimmung von  $^{226}Ra$  in den Aufschlusslösungen wurde die Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS) eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung der ICP-MS ist in verschiedenen Publikationen<sup>[99,89,100]</sup> zu finden.

Die verschiedenen ICP-MS-Systeme unterscheiden sich grundsätzlich dadurch, wie die Massenanalytoren konzipiert und aufgebaut sind. Im Gegensatz zu den weiter verbreiteten Quadrupol-Massenspektrometern wird im Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik ein doppeltfokussierendes Sektorfeld-Massenspektrometer eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein Gerät vom Typ AXIOM der Firma VG Elemental (Großbritannien), mit dem Massenaufösungen von 400 bis 10000 stufenlos eingestellt werden können.

Wegen der hohen Nachweisempfindlichkeit moderner ICP-MS-Geräte sind sie neben traditionellen Anwendungsgebieten auch für die analytische Bestimmung langlebiger Radionuklide geeignet. Mit dem Sektorfeld-ICP-MS werden die Messungen im niedrig aufgelösten Modus, d.h. bei höchster Nachweisstärke, durchgeführt. Die Kalibrierung des Messgerätes geschieht üblicherweise durch Bestimmung der Radium-Zählraten in Relation zum internen Standard über der Ra-Konzentration und wird durch die Gerätesoftware realisiert. Es wurden neben einer Blanklösung, die zugleich den „Null“-Standard repräsentierte, mindestens drei weitere Kalibrationsstandards mit den Aktivitäten 0,11; 0,29 und 0,88 Bq/l  $^{226}\text{Ra}$  vermessen. Damit war der zu erwartende Konzentrationsbereich der realen Proben abgedeckt. Da keine Kontrollstandards zur Überprüfung der Richtigkeit der Ergebnisse zur Verfügung standen, wurde wenigstens durch wiederholte Messung eines Kalibrationsstandards innerhalb der Probensequenz die Langzeitstabilität der Ergebnisse überprüft.

Die Bestimmungsgrenze der Methode liegt bei 20 mBq/l Messlösung, d.h. bei 0,1 mBq/Probe (5 ml). Durch die radiochemische Anreicherung des  $^{226}\text{Ra}$  aus den Matrices wird eine Nachweisgrenze der Methode von 1-5 mBq/g oder mBq/l je nach eingesetzter Probenmenge erreicht. Zur Bestimmung der chemischen Ausbeute werden stichprobenartig Vergleichsbestimmungen von realen Proben nach Zusatz von 44 mBq eines  $^{226}\text{Ra}$ -Standard durchgeführt. Die Messeffektivität der ICP-MS-Methode wird außerdem mit der  $^{226}\text{Ra}$ -Standard-Vergleichslösung (44 mBq/Probe) direkt ermittelt.

### Berechnung des Aktivitätsgehaltes der Proben

Aktivitätsgehalte der Urinproben:

$$c_{226Ra} = \frac{A_{226Ra}}{\eta * V} \quad (3)$$

$c_{226Ra}$	Aktivitätskonzentration für $^{226}\text{Ra}$ [mBq/l]
$A_{226Ra}$	gemessene Aktivität für $^{226}\text{Ra}$ mit ICP-MS in mBq/Probe
$\eta$	Radiochemische Ausbeute des $^{226}\text{Ra}$ –Vergleichsstandard
$V$	eingesetztes Volumen der Einzelprobe [l]

Die radiochemische Ausbeute der Methode ergibt sich dann zu:

$$\eta_{226Ra} = \frac{A_{226Ra-ST}}{Z_{226Ra-ST}} \quad (4)$$

$A_{226Ra-ST}$	gemessene Aktivität des $^{226}\text{Ra}$ -Standards in mBq/Probe
$Z_{226Ra-ST}$	Zertifizierte Aktivität des $^{226}\text{Ra}$ -Standards in mBq/Probe

Die Ausscheidungsrate errechnet sich dann nach Formel 5.

$$AR_{226Ra} = c_{226Ra} * V_G \quad (5)$$

$AR_{226Ra}$	Ausscheidungsrate
--------------	-------------------

$V_G$  Gesamtvolumen der Tagesausscheidung [l]

Die Aktivitätsgehalte von Stuhl- und Haarproben werden nach Formel 6 ermittelt.

$$a_{226Ra} = \frac{A_{226Ra}}{\eta * M} \quad (6)$$

$a_{226Ra}$  spezifische Aktivität für  $^{226}Ra$  [mBq/g]  
 $A_{226Ra}$  gemessene Aktivität für  $^{226}Ra$  mit ICP-MS in mBq/Probe  
 $\eta$  Radiochemische Ausbeute des  $^{226}Ra$ -Vergleichsstandard  
 $M$  eingesetzte Aschemasse der Einzelprobe [g]

Der Aktivitätsgehalt für Haarproben wird als spezifische Aktivität in der weiteren Verarbeitung der Daten angegeben.

Die Ausscheidungsrate für Stuhlproben wird nach Formel 7 berechnet.

$$AR_{226Ra} = c_{226Ra} * M_G \quad (7)$$

$AR_{226Ra}$  Ausscheidungsrate  $^{226}Ra$  im Stuhl  
 $M_G$  Gesamtaschemasse der Tagesausscheidung [g]

### 3.6.2.3 $^{210}Pb$ und $^{210}Po$ -Bestimmung

$^{210}Pb$  ist das einzige langlebige Zerfallsprodukt des Edelgases  $^{222}Rn$ .  $^{210}Pb$  ist ein langlebiges natürliches Radionuklid ( $T_{1/2} = 22,4$  a) aus der  $^{238}U$ -Zerfallsreihe. Es zerfällt über  $^{210}Bi$  ( $T_{1/2} = 5$  d) zum  $^{210}Po$  ( $T_{1/2} = 138$  d).  $^{210}Po$  zerfällt über einen Alphazerfall in das stabile  $^{206}Pb$  (s. Abbildung 1).

Die Verfahren zur Bestimmung des  $^{210}Pb$  lassen sich primär nach den Zerfallsarten unterscheiden, wobei direkte Verfahren die vom  $^{210}Pb$  unmittelbar emittierte  $\gamma$ - bzw.  $\beta$ -Strahlung nachweisen. Die indirekten Verfahren nutzen die ionisierende Strahlung der Tochternuklide  $^{210}Bi$  und  $^{210}Po$  im radioaktiven Gleichgewicht bzw. in einer definierten Phase der Gleichgewichtseinstellung.

Die einfachste Methode zur Bestimmung von  $^{210}Po$  ist die Spontanabscheidung des  $^{210}Po$  an Silberplättchen [101,102]. Die Messung des  $^{210}Po$  erfolgt mittels  $\alpha$ -Spektrometrie unter Verwendung von  $^{208}Po$  als Tracer.

Nach einer ersten Abtrennung des  $^{210}Po$  aus der Lösung wird das aus dem  $^{210}Pb$  nachgewachsene  $^{210}Po$  gemessen (indirekte Bestimmung). Die  $\alpha$ -Spektrometrie des  $^{210}Po$  im Gleichgewicht mit  $^{210}Pb$  erlaubt die Bestimmung von  $^{210}Pb$  mit niedrigster Nachweisgrenze. Die Analyse setzt ein radioaktives Gleichgewicht zwischen  $^{210}Pb$  und  $^{210}Po$  voraus. Bei  $^{210}Po$  ( $\tau_{1/2} = 138$  d) ist das radioaktive Gleichgewicht zwischen  $^{210}Pb$  und  $^{210}Po$  erst nach ca. 1 a eingestellt. Bei einer Analyse zu einem früheren Zeitpunkt als der Gleichgewichtseinstellung muss auf diesen Zeitpunkt rechnerisch korrigiert werden. Im Rahmen dieser Studie wurden erneute Messungen nach 1 ½ bis 2 Halbwertszeiten durchgeführt.

### 3.6.2.3.1 $^{210}\text{Pb}$ - und $^{210}\text{Po}$ -Bestimmung im Urin

#### Methoden

Die Analyse von  $^{210}\text{Po}$  im Urin erfolgt durch  $\alpha$ -spektrometrische Messung nach radiochemischer Isolierung und Spontanabscheidung auf Silber.

Die Analyse von  $^{210}\text{Pb}$  in Urinproben erfolgt ebenfalls über  $^{210}\text{Po}$  nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts, ( $\tau_{1/2} = 138 \text{ d}$ ), mindestens aber nach 200 Tagen.

#### Analytik

$^{210}\text{Po}$  wird aus den frischen Urinproben nach PN schnellstmöglich (< 3 Tage) im Labor isoliert und analysiert. Nach Zusatz von Fe-Träger wird  $^{208}\text{Po}$  als interner Tracer zugesetzt. Nach Veraschung und Aufschluss der Probe erfolgt die Zersetzung organischer Reste mit  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ , anschließend wird durch eine Hydroxidfällung angereichert. Nach Lösen in 6M HCl und Zugabe von Wasser und Ascorbinsäure erfolgt die Spontanabscheidung des Poloniums bei 95 °C in 6 Stunden.

Nach der Spontanabscheidung des  $^{210}\text{Po}$  wird die überstehende Lösung quantitativ überführt und nach Zugabe von etwas  $\text{HNO}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}_2$  zur Trockne eingedampft. Der Rückstand wird in 10-20 ml 10 M HCl aufgenommen, erneut  $^{208}\text{Po}$ -Tracer zugeben und gut verschlossen 3-6 Monate zur Bestimmung des  $^{210}\text{Pb}$  durch  $\alpha$ -Spektrometrie von  $^{210}\text{Po}$  aufbewahrt.

Nach mindestens 200 Tagen kann  $^{210}\text{Pb}$  nach erneuter Spontanabscheidung seiner Tochter  $^{210}\text{Po}$  auf Silberblech  $\alpha$ -spektrometrisch nachgewiesen werden.

#### Berechnung des Aktivitätsgehaltes der Proben

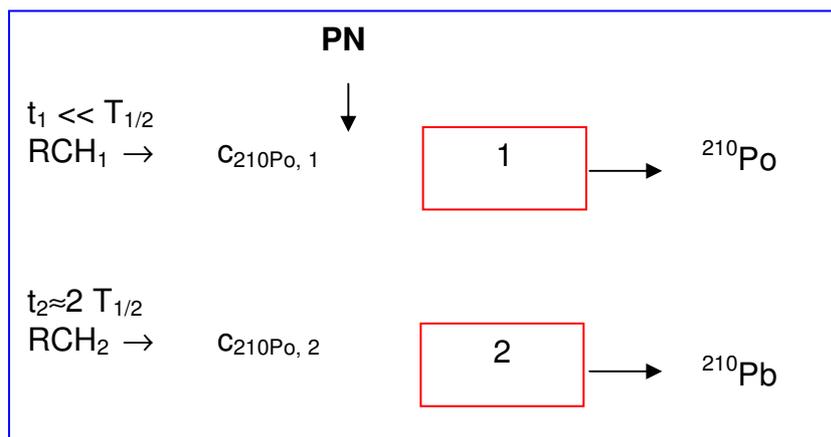


Abbildung 4: Trennung  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$  aus einer Probe

Die Berechnung der Aktivitätskonzentration von  $^{210}\text{Po}$  in Urin erfolgt nach radiochemischer Abtrennung, Spontanabscheidung auf Ag-Plättchen und Alpha-Spektrometrie. Zur Kontrolle der chemischen Effektivität wird  $^{208}\text{Po}$  zugegeben.

**Ergebnis:  $c_{210Po, 1}$** 

$^{210}Po$  – Aktivitätsgehalt des Urins (keine Korrektur für  $T_{1/2}$  erforderlich)

$$c_{210Po} = \frac{R_{n, 210Po} * A_{208Po}}{R_{n, 208Po} * V} \quad (8)$$

$c_{210Po}$	Aktivitätskonzentration für $^{210}Po$ [mBq/l]
$A_{208Po}$	Aktivität des zugesetzten Radiotracers [mBq]
$R_{n, 210Po}$	Nettozählrate für $^{210}Po$ [ $s^{-1}$ ]
$R_{n, 208Po}$	Nettozählrate für $^{208}Po$ [ $s^{-1}$ ]
$V$	eingesetztes Volumen der Einzelprobe [l]

**Ergebnis:  $c_{210Po, 2}$** 

Die Analyse des  $^{210}Pb$  erfolgt nach ca.  $2 T_{1/2}$  des  $^{210}Po$  (ca. 250 Tage) durch Spontanabscheidung des nachgebildeten  $^{210}Po$ . Zur Ausbeutekontrolle wird der zugegebene  $^{208}Po$ -Tracer ( $\eta_2$ ), genutzt. Das Ergebnis ist zusätzlich mit der Effektivität der ersten Abtrennung ( $\eta_1$ ) zu korrigieren.

$$c_{210Pb} = \left( \frac{c_{210Po, 2}}{1 - e^{-\lambda t_2}} \right) * \left( \frac{1}{\eta_2 * \eta_1} \right) \quad (9)$$

$c_{210Po, 2}$	Aktivitätskonzentration für $^{210}Po$ [mBq/Probe] zum Zeitpunkt $t_2$
$c_{210Pb}$	berechnete Aktivitätskonzentration von $^{210}Pb$ [mBq/l]
$\lambda_2$	$\ln 2 / T_{1/2} (^{210}Po)$
$t$	Zeitdifferenz zwischen 1. und 2. radiochemischer Trennung
$\eta_{1, 2}$	Radiochemische Ausbeute des $^{208}Po$ -Vergleichsstandards

Aus der Aktivitätskonzentration des  $^{210}Po$  und  $^{210}Pb$  errechnet sich dann nach Formel 10 die Ausscheidungsrate.

$$AR_{210Po, 210Pb} = c_{210Po, 210Pb} * V_G \quad (10)$$

$V_G$	Gesamtvolumen der Tagesausscheidung [l]
-------	---

### 3.6.2.3.2 <sup>210</sup>Pb-Bestimmung in Stuhl- und Haarproben

#### Methode

Die Analyse von <sup>210</sup>Pb in Stuhl- und Haarproben erfolgt indirekt über <sup>210</sup>Po nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts in den Proben, ( $\tau_{1/2} = 138$  d), mindestens aber 200 Tagen nach PN, durch  $\alpha$ -spektrometrische Messung nach radiochemischer Isolierung und Spontanabscheidung auf Silber.

#### Analytik

Nach Einwaage der Stuhl-Aschemasse, bzw. der Haarprobe und Zusatz von <sup>208</sup>Po-Tracer wird die vorhandene organische Substanz mit HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> zersetzt und die weitere radiochemische Isolierung und Messung nach 3.6.2.3.1 durchgeführt.

#### Berechnung des Aktivitätsgehaltes der Proben

1. Berechnung der spezifischen <sup>210</sup>Pb-Aktivität nach Einstellung des Gleichgewichtes durch Bestimmung der <sup>210</sup>Po-Aktivität

$$a_{210Pb} = \frac{c_{210Po,2}}{1 - e^{-\lambda \Delta t}} \quad (11)$$

$a_{210Po,2}$	spezifische Aktivität von <sup>210</sup> Po zum Messzeitpunkt $t_2$ [mBq/g]
$a_{210Pb}$	berechnete spezifische Aktivität von <sup>210</sup> Pb [mBq/g]
$\lambda$	$\ln 2 / T_{1/2} (^{210}\text{Po})$
$\Delta t$	Zeitdifferenz zwischen PN und radiochemischer Trennung

Der Aktivitätsgehalt für Haarproben wird als spezifische Aktivität in der weiteren Verarbeitung der Daten angegeben.

Die Ausscheidungsrate für Stuhlproben wird nach Formel 12 berechnet.

$$AR_{210Pb} = c_{210Pb} * M_G \quad (12)$$

$M_G$	Gesamtaschemasse der Tagesausscheidung [g]
-------	--

### 3.6.3 $\alpha$ -Spektrometrie

Für die Messungen von <sup>210</sup>Po und Th-Nukliden wird ein  $\alpha$ -Spektrometer ( $\alpha$ -Analyst Canberra) verwendet. Es werden PIPS-Detektoren (Passivated Implanted Planar Silicon) mit einer aktiven Fläche von 450 mm<sup>2</sup> eingesetzt. Die begrenzte Reichweite

der emittierten  $\alpha$ -Teilchen erfordert die Präparation eines dünnen matrixfreien Präparates ( $\varnothing \approx 10$  mm), welches im Vakuum in unmittelbarer Nähe (Abstand  $\approx 2$  mm) eines PIPS-Detektors analysiert wird. Typische Detektoreffektivitäten sind 25-30%. Bei Messzeiten von mindestens 200.000 s werden Nachweisgrenzen von 0,5 mBq/ Probe erreicht.

Die nachfolgende Tabelle und Abbildungen zeigen die Energien und Spektren der Messpräparate.

Tabelle 12:  $\alpha$ -Energien der untersuchten Nuklide

Nuklid	$E_{\alpha}$ [MeV]	P [%]
$^{210}\text{Po}$	5,30	100
$^{208}\text{Po}$ -Tracer	5,11	100
$^{230}\text{Th}$	4,62	23,4
	4,69	76,3
$^{229}\text{Th}$ -Tracer	4,81	9,3
	4,85	56,2
	4,90	10,2

$E_{\alpha}$ - Zerfallsenergie, P-Übergangswahrscheinlichkeit

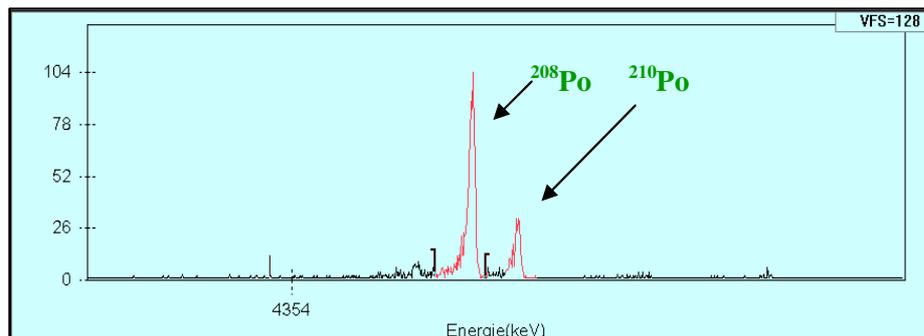


Abbildung 5:  $\alpha$ -Spektrum von Po-Nukliden

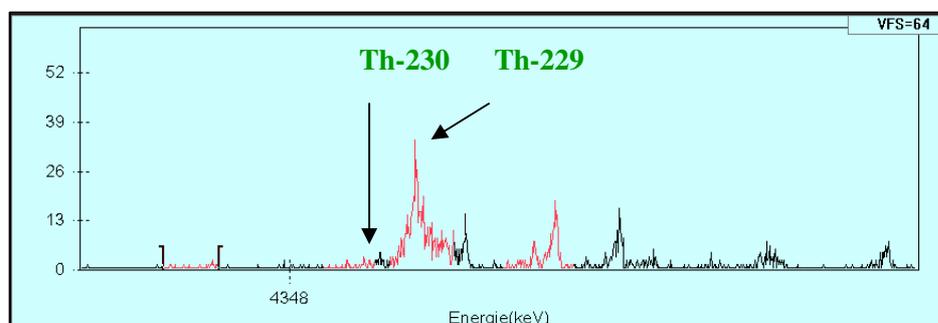


Abbildung 6:  $\alpha$ -Spektrum von Th-Nukliden

### 3.6.4 Maßnahmen zur analytischen Qualitätssicherung und Unsicherheiten der Ergebnisse

#### Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung der Probenvorbereitung und der Analytik wurden verschiedene Maßnahmen durchgeführt.

Es wurde ein einheitliches System der Probenbezeichnung verwendet, das jederzeit die Zuordnung der Proben zu den Probenarten und zu den Probanden und die zeitliche Einordnung der Proben ermöglichte. Alle Arbeitsschritte der Einzelanalysen wurden in den für die routinemäßige Ausscheidungsanalyse üblichen tabellarischen Protokollen dokumentiert. In die Protokolle wurden auch alle Abweichungen vom erwarteten Verlauf und sonstige Beobachtungen eingetragen.

#### **<sup>226</sup>Ra**

Für die Bestimmung von <sup>226</sup>Ra gibt es keine Möglichkeit des Tracerzusatzes. Zur Kontrolle der Wirksamkeit des Aufschlussverfahrens, der radiochemischen Analyse und der Richtigkeit der Analysen mit der ICP-MS wurde deshalb bei jeder Aufschlussserie für die Matrix (Urin, Stuhl, Haare) eine oder mehrere Parallelproben mit einem definierten <sup>226</sup>Ra-Standard (44 mBq) mit aufgeschlossen und analysiert. Dazu wurde eine zu analysierende Probe geteilt, eine Teilprobe direkt analysiert, die zweite nach Zusatz von <sup>226</sup>Ra-Standard. Diese Ausbeutekontrolle wurde zur Berechnung des Aktivitätsgehaltes herangezogen. Die Ausbeute betrug 50-60 %.

#### **<sup>230</sup>Th, <sup>210</sup>Po**

Zur Qualitätssicherung der  $\alpha$ -spektrometrischen Bestimmung wird jeder Probe ein interner Tracer zugesetzt. Damit lassen sich die Effektivität von Aufschluss, radiochemischem Verfahren und Messverfahren feststellen und kontrollieren. Die erreichte radiochemische Ausbeute bei der Alpha-Spektrometrie beträgt 80-100 %.

Außerdem werden im Rahmen der Akkreditierung des Labors für Umwelt- und Radionuklidanalytik regelmäßig folgende weitere qualitätssichernde Maßnahmen durchgeführt:

- regelmäßige Kalibrierung und Kalibrationskontrolle
- Teilnahme an Ringversuchen und Laborvergleichen

Eine weitere qualitätssichernde Maßnahme im Rahmen dieses Projektes war die durchgängige Plausibilitätsprüfung aller Mess- und Analysenergebnisse. Unplausible Ergebnisse wurden an Hand der Protokolle und anderer Aufzeichnungen überprüft. Gegebenenfalls wurden Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt.

## **Unsicherheiten der Ergebnisse**

Im Folgenden sollen die Unsicherheiten der einzelnen Schritte der Untersuchung diskutiert werden.

Die analytisch-chemischen und messtechnischen Verfahren werden regelmäßig durch Vergleichsmessungen und Tracer-Zugaben überprüft. Die Gesamtunsicherheiten liegen bei etwa 20 % und sind gut quantifiziert.

Die wesentlichen Faktoren, die die Ergebnisse der vorliegenden Studie streuen lassen, liegen aber nicht in den Unsicherheiten der analytischen Verfahren. Von entscheidender Bedeutung sind die Unterschiede in den Ausscheidungsmengen (s. 4.2). Ursache für diese Unterschiede können liegen in:

- individueller Probensammlung
- Ernährung während des PN-Wochenendes
- individueller Stoffwechsel

Die vorstehend angegebenen Faktoren sind nicht unabhängig voneinander. In den folgenden Überlegungen soll analysiert werden, wie sie sich auswirken können.

### **Individuelle Probensammlung**

Bei der individuellen Probensammlung kann es sowohl zu einer Unter- als auch Überschätzung kommen.

Einflussparameter sind:

- Sammelzeit
- Zuordnung zum 24-h-Sammelzeitraum
- Vollständigkeit der Probe
- Trennung von Urin und Stuhl

Die Möglichkeit, dass die Probensammlung nicht ordentlich und vollständig durchgeführt wurde, kann auf Grund der persönlichen Gespräche mit den Probanden weitgehend ausgeschlossen werden. Zur Unterschätzung kommt es durch eine nicht vollständige Tagesausscheidung. Schwieriger wird es, die gesammelte Probenmenge der 24-Stunden-Ausscheidung zuzuordnen. Die Probanden haben bei den Urinproben den Beginn und das Ende der Sammlung notiert, wobei nur einmal Morgenurin in der Probe enthalten sein sollte. Dies konnte nicht immer gewährleistet sein. Bei einigen Probanden mit erfahrungsgemäß geringen Ausscheidungsmengen wurde 48 Stunden gesammelt und dann bei der Verarbeitung der Daten auf 24 Stunden umgerechnet.

Bei Stuhlproben wurden die exakten PN-Zeiten notiert, so konnte die Menge gemittelt und der 24-Stunden-Ausscheidung zugeordnet werden.

Es wird abgeschätzt, dass Abweichungen von +20 bis -50 % durch die genannten Faktoren verursacht sein können.

### **Ernährung während des PN-Wochenendes**

Die Probanden wurden aufgefordert, ihre Ernährungsgewohnheiten während der PN nicht zu ändern. Die drei Probenahmen fanden im Abstand von 7 – 26 Monaten statt. So ist es also zufällig, was die Probanden an diesem Wochenende zu sich genommen haben. In den Wintermonaten ist die Nahrung sicher anders zusammengesetzt als im

Sommer, an einem heißen Wochenende wird wesentlich mehr Flüssigkeit aufgenommen. Diese verschiedenen Möglichkeiten beeinflussen auch die Aufnahme natürlicher Radionuklide mit der Nahrung. Diese Einflüsse sind nicht quantifizierbar.

### **Individueller Stoffwechsel**

Der Stoffwechsel eines Probanden kann aus verschiedenen Gründen am PN-Wochenende von der regulären Funktion abweichen. Einige Probanden haben auch Ernährungsstörungen bzw. Diarrhöen auf dem Protokoll vermerkt, so dass bei ungewöhnlichen Ergebnissen nachgeforscht werden konnte. Weitere Quantifizierungen sind hier nicht möglich.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird dargestellt, wie das umfangreiche Datenmaterial in einer Datenbank erfasst wurde und diese Daten dann zur Auswertung nach verschiedenen Gesichtspunkten abgerufen und ausgewertet werden können.

### 4.1 Datenmaterial und Auswertungen (Datenbank)

In Tabelle 13 ist ein Überblick über die zu verarbeitenden Daten gegeben. Wo sinnvoll wird auch die Parameterauswahl für die verwendeten Größen genannt.

Tabelle 13: Datenbereitstellung für die Auswertung

Daten	Anzahl	Parameter/Bemerkungen
Probenahmen	3	
PN-Termine	24	
zu analysierende Proben	809	s. Tabelle 10
Nuklide	4	$^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$
Matrix	3	Stuhl, Urin, Haare
Analysenergebnisse	2.102	
Messwerte	>3.000	Einschl. Kontroll- und Qualitätssicherungsmessungen
Probanden	104	
Persönliche Daten der Probanden	5	s. Fragebogen Anlage 2
Persönliche Gewohnheiten	3	s. Fragebogen Anlage 2
Geschlecht	2	m/w
Region	5	s. Untersuchungsgebiete
Status	2	Bevölkerung/Beschäftigte*
Art der Arbeitsfelder	4	Bäder, Schaubergwerke, Wasserwerke, Erdgas
Verarbeitete Datensätze insgesamt	~14.000	

\* Beschäftigte sind Personen, die durch oder bei ihrer beruflichen Tätigkeit einer erhöhten NORM-Exposition ausgesetzt sein können

Die Messdatenbereitstellung erfolgt als Labordatenprotokolle, die entweder direkt in Form von Excel-Tabellen generiert werden oder in Geräteausdrucken, die in Excel-Tabellen übertragen werden.

Um die Ergebnisse der Untersuchungen transparent darzustellen und die Einflüsse aller relevanten Parameter erfassen zu können, wurde eine Access Datenbank aufgebaut und die Messdaten in diese überspielt, die anderen Daten eingetragen. Die Struktur dieser Datenbank ist aus der folgenden Abbildungen zu ersehen:

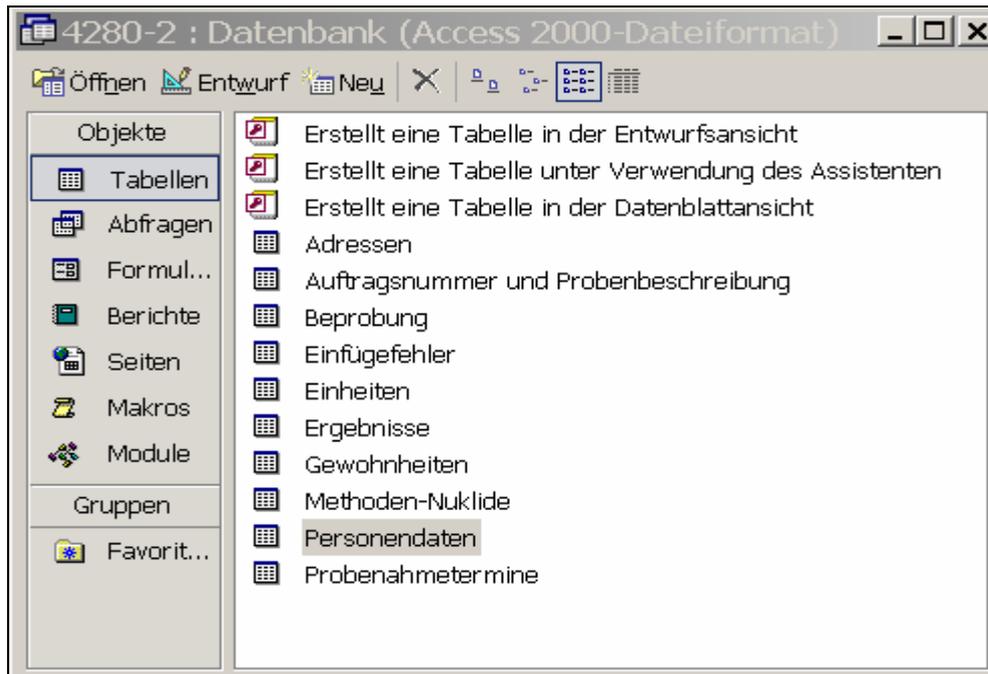


Abbildung 7: Struktur der Access-Datenbank

Die Verknüpfung der Tabellen geschieht über die verschlüsselte ID-Zahl der Probanden. Aufgrund der Aufteilung der Information in verschiedene Tabellen, lassen sich die einzelnen Tabellen sehr übersichtlich gestalten. Das Beispiel gibt die einfache Struktur der Ergebnistabellen wieder, in der mehr als 12.000 Analyseergebnisse enthalten sind.

	Feldname	Felddatentyp	
	Auftragsnummer	Text	
	ID	Zahl	
	Methoden-Nuklid-Schlüssel	Zahl	
	Einheit	Text	
	Messwert	Zahl	
	NWG	Text	
	Unsicherheit	Zahl	

Abbildung 8: Datenbankfelder

Zum sicheren Eintragen der Daten, die nicht als Messdaten in Excel vorlagen, wurden Eingabeformulare erstellt. Hierbei wurden durch Kombinations-, bzw. Listfelder die Eingaben kontrolliert. Auf die Einzelheiten muss hier nicht eingegangen werden.

Durch die Verknüpfung der Tabellen werden dann durch Abfragen die für die gewünschte Auswertung relevanten Ergebnisse dargestellt. Als Beispiel ist die Verknüpfungsstruktur für die Erstellung der Abfrage zur Erlangung des Zusammenhangs „Nuklid/Region/Matrix“ gezeigt:

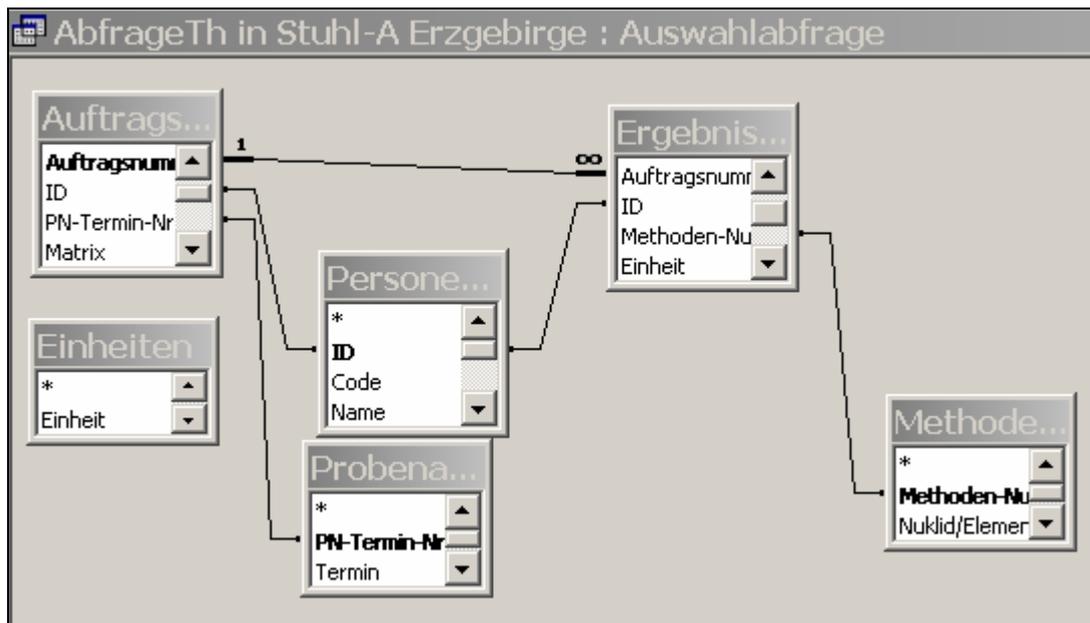


Abbildung 9: Access-Abfragebeispiel Tabellenübersicht

Die Abfragesyntax gestaltet sich dann ebenfalls sehr einfach:

Feld:	Messwert	Matrix	Nuklid/Element	Einheit	Probandenart
Tabelle:	Ergebnisse	Auftragsnummer ur	Methoden-Nuklide	Ergebnisse	Personendaten
Sortierung:					
Anzeigen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kriterien: oder:		"Stuhl"	"Thorium"	"3"	"A"

Abbildung 10: Access-Abfrage

und führt dann direkt zu einer Tabelle mit den gewünschten Ergebnissen. Diese wird nach MS Excel oder Statistica übernommen und kann direkt numerisch ausgewertet bzw. weiterverarbeitet oder graphisch dargestellt werden:

AbfrageTh in Stuhl-A Erzgebirge : Auswahlabfrage			
	ID	Region	Messwert
▶	20	Erzgebirge	0,68
	20	Erzgebirge	0,55
	21	Erzgebirge	0,7
	21	Erzgebirge	0,22
	22	Erzgebirge	0,94
	22	Erzgebirge	1,05
	23	Erzgebirge	0,57
	23	Erzgebirge	0,73
	24	Erzgebirge	0,86
	24	Erzgebirge	0,85
	25	Erzgebirge	0,95
	25	Erzgebirge	0,35
	26	Erzgebirge	0,63
	26	Erzgebirge	0,67
	27	Erzgebirge	1,82

Abbildung 11: *Ergebnis einer Abfrage*

Zur Erfassung der Daten und zu allen Berechnungen wurde das Tabellenkalkulationsprogramm „Excel 2003™“ der Firma Microsoft™ genutzt. Für spezielle Berechnungen, Mittelwerte, Medianwerte und Generierung von Box Plots und Häufigkeitsverteilungen wurden die Auswerteprogramme Statistica der Firma StatSoft und SPSS der SPSS GmbH Software eingesetzt.

## 4.2 Darstellung der Ergebnisse

Die erfassten Daten – Massen und Volumina der Proben, die Ausscheidungsraten der relevanten Nuklide in den unterschiedlichen Matrices sowie die spezifischen Aktivitäten im Haar sind in den Tabellen 14 – 43 und den Diagrammen 12 – 66 zusammengestellt. Es wurden Mittelwerte und Medianwerte, Schwankungsbreiten der Ergebnisse und die Quartilsspanne berechnet und dargestellt.

### 4.2.1 Volumina und Massen der Ausscheidungen

Zur Ermittlung von Ausscheidungsraten ist es erforderlich, gesicherte und vergleichbare Werte der Ausscheidungsmengen zu bekommen. Da die individuellen Ausscheidungen von Personen sehr unterschiedlich sind, wurde großer Wert darauf gelegt, in persönlichen Gesprächen die Probanden auf die Notwendigkeit einer vollständigen und zeitlich korrekt zugeordneten Probensammlung hinzuweisen.

#### Tagesausscheidungen Urin

Abbildung 12 zeigt die mittleren individuellen täglichen Ausscheidungen und den Minimal- und Maximalwert bei den drei Probenahmen für alle Probanden. Die Häufigkeitsverteilung dieser Werte ist in Abbildung 13 als Histogramm dargestellt.

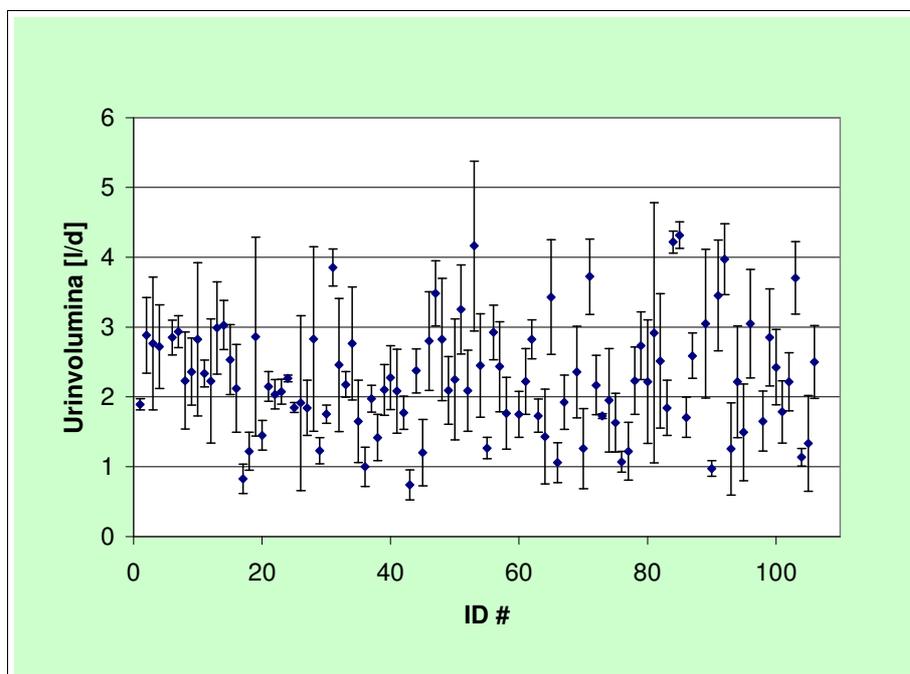


Abbildung 12: *Urinolumina – individuelle Mittelwerte und Schwankungsbreite*

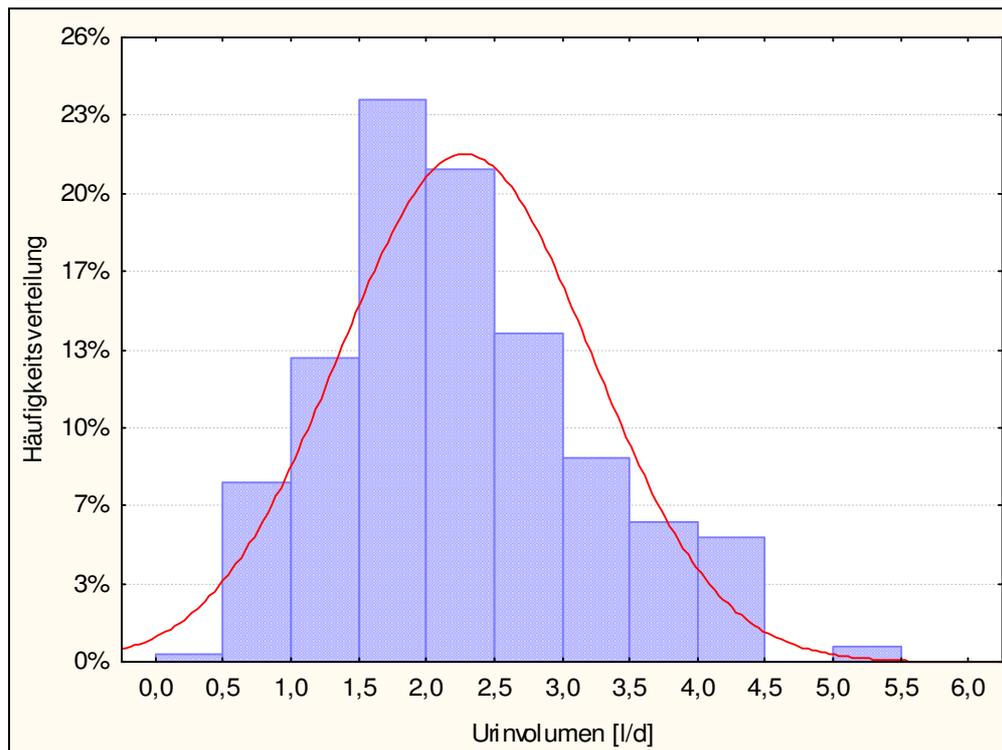


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung Urinvolumina (N = 286)

Die folgende Tabelle 14 zeigt im Überblick die mittlere Tagesausscheidung Urin, die Schwankungsbreite, die Standardabweichung und den Medianwert.

Tabelle 14: Urinausscheidungen

Urin	N	$\bar{m}$	$V_{\min}$	$V_{\max}$	s	Median
Volumina		[l/d]	[l/d]	[l/d]	[l/d]	[l/d]
	286	2,3	0,5	5,0	0,9	2,1

N Anzahl der untersuchten Proben

$\bar{m}$  Mittelwert der Tagesausscheidungen (arithmetisches Mittel)

V Urinvolumen

s einfache Standardabweichung

Median 50 % der Werte < Median und 50 % > Median

Interessant ist, dass bei dem hier untersuchten Probandenkollektiv der üblicherweise als Standardwert für die Tagesausscheidung des Urins genutzte Wert von 1,4 l/d von mehr als 80 % der Proben überschritten wird. Da die Ausscheidungsraten für die einzelnen Nuklide individuell berechnet werden, spielt diese Abweichung bei den Nukliduntersuchungen keine Rolle.

## Tagesausscheidungen Stuhl

Abbildung 14 zeigt die mittleren täglichen Ausscheidungen und den Minimal- und Maximalwert bei den drei Probenahmen für alle Probanden. Die Häufigkeitsverteilung dieser Werte ist in Abbildung 15 als Histogramm dargestellt.

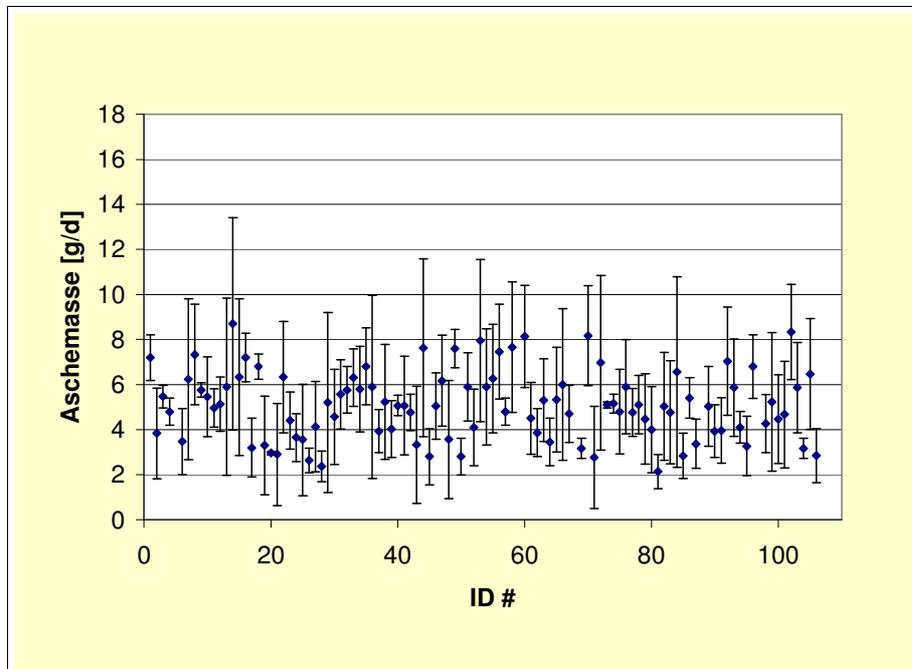


Abbildung 14: *Stuhlmassen – Individuelle Mittelwerte und Schwankungsbreite*

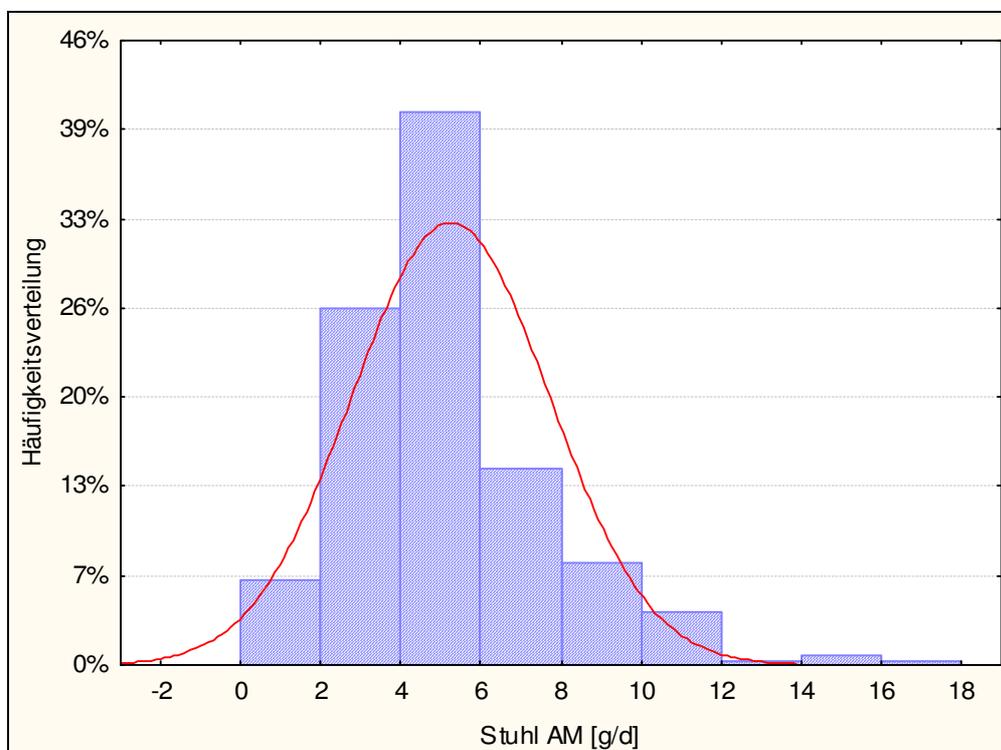


Abbildung 15: *Häufigkeitsverteilung der Tagesausscheidungen Stuhl (N = 286)*

In der folgenden Tabelle sind die mittleren Tagesausscheidungen Stuhl, die Schwankungsbreite, die Standardabweichung und der Medianwert für Frischmasse und Aschemasse zusammengefasst.

*Tabelle 15: Stuhlausscheidungen*

Stuhlmassen	N	[g/d]	M <sub>min</sub>	M <sub>max</sub>	s	Median
			[g/d]	[g/d]	[g/d]	[g/d]
Frishmasse[FM]	286	235	11,5	862	131	<b>215</b>
Aschemasse [AM]	286	5,2	0,5	16,3	2,5	<b>4,9</b>

N Anzahl der untersuchten Proben

$\bar{m}$  Mittelwert (arithmetisches Mittel)

M Masse

s einfache Standardabweichung

Median 50 % der Werte < Median und 50 % > Median

Das Verhältnis von Aschemasse zu Frishmasse ist im Mittel 0,3. Der Schwankungsbereich liegt zwischen 0,01 und 0,43.

### **Individuelle Streuung in den Ausscheidungsmengen**

Aus den Abbildungen 12 und 14 scheinen extreme individuelle Streuungen möglich. Um dies genauer zu untersuchen, wurde ein Faktor aus maximaler und minimaler Ausscheidungsmenge eines jeden einzelnen Probanden errechnet. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle 16 dargestellt.

*Tabelle 16: Abweichung der individuellen Urinvolumina und Stuhlmassen bei drei PN*

Faktor Max/Min	Urinvolumina [%]	Stuhlmassen [%]
<2	84,6	58,9
2-3	12,8	29,9
>3	2,6	12,1

Bei 85 % der Probanden streuen die Urinvolumina und bei 60 % der Probanden die Stuhlmassen um nicht mehr als den Faktor 2. Dies gilt auch für die Probanden, die sehr niedrige oder sehr hohe Ausscheidungsmengen gesammelt haben wie in der folgenden Tabelle 17 zu erkennen ist.

*Tabelle 17: Extremwerte für Tagesausscheidungen Urin (Mittelwert Urinausscheidung dieser Studie 2,3 l/d)*

Probanden ID#	Gruppe	$\bar{m}$	V <sub>max</sub> / V <sub>min</sub>
		[l/d]	
17	sehr niedrige Ausscheidungsvolumina	0,8	1,7
43		0,7	1,8
45		1,2	1,9
84	sehr hohe Ausscheidungsvolumina	4,2	1,1
85		4,3	1,1
103		3,7	1,3

*Tabelle 18: Extremwerte für individuelle Tagesausscheidungen Stuhl (AM)(Mittelwert AM dieser Studie 5,2 g/d)*

Probanden ID #	Gruppe	$\bar{m}$	$M_{\max}/ M_{\min}$
		[g/d]	
17	sehr niedrige Ausscheidungsmassen	0,8	1,7
43		0,7	1,8
45		1,2	1,9
84	sehr hohe Ausscheidungsmassen	4,2	1,1
85		4,3	1,1
103		3,7	1,3

Die vorstehend gemachten Ausführungen über die Streuung zeigen die Zuverlässigkeit hinsichtlich der Probenahme.

## 4.2.2 Ausscheidungsraten der untersuchten Nuklide

Im Ergebnis der analytischen Arbeit sind für alle untersuchten Radionuklide und alle Matrices die Ausscheidungsraten aller Probanden in der Datenbank niedergelegt. Die Einzelwerte aller Analysen sind im Originalbericht für den Auftraggeber als Anlage 4 beigefügt.

**Die in den jeweiligen Tabellen angegebenen Nachweisgrenzen sind methodische Nachweisgrenzen (<sup>1,104</sup>). Sie wurden auf eine Tagesausscheidung Urin von 2,1 l/d (Median) und Tagesausscheidung Stuhl von 4,9 g/d (Median) bezogen. Die Nachweisgrenze für die spezifische Aktivität im Haar bezieht sich auf 1 g Haar.**

**Dabei ist zu bemerken, dass die methodischen Nachweisgrenzen in Abhängigkeit von Volumen bzw. Masse der tatsächlichen Tagesausscheidungen zu unterschiedlichen individuellen (personenspezifischen) Nachweisgrenzen [mBq/d] führen**

Im Folgenden werden die Ergebnisse zunächst nuklid- und matrixbezogen dargestellt. Wo es möglich ist, werden Auffälligkeiten hinsichtlich der Regionen, Arbeitsfelder oder anderer Parameter diskutiert.

Als Zusammenfassung der Ergebnisse werden in Tabelle 19 die Medianwerte und die oberen Quartile der ermittelten Ausscheidungsraten für die untersuchten Radionuklide in den drei Matrices zusammengefasst.

*Tabelle 19: Medianwerte und obere Quartile aller Ausscheidungsraten für die analysierten Nuklide*

Nuklid	Ausscheidungsrate					
	Urin		Stuhl		Haar	
	Median	oberes Quartil	Median	oberes Quartil	Median	oberes Quartil
	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/g]	[mBq/g]
<sup>230</sup> Th	-	-	<b>5,1</b>	9,0	-	-
<sup>226</sup> Ra	<b>7,5</b>	15	<b>32</b>	69	<b>&lt;1</b>	6,0
<sup>210</sup> Pb	<b>7,5</b>	13	<b>34</b>	56	<b>5,8</b>	11
<sup>210</sup> Po	<b>4,3</b>	10	-	-	-	-

Medianwert und oberes Quartil, die die Maximalwerte für 50 bzw. 75 % aller Messwerte für die Ausscheidungsraten angeben, lassen hier schon die Bandbreiten der Ausscheidungsraten erkennen.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse für die einzelnen Nuklide gruppiert nach der Matrix dargestellt. Dabei werden zunächst tabellarisch die wichtigsten Werte wie z.B. Mittelwert, Minimum, Maximum, Median und die Quartilswerte zum schnellen Überblick insgesamt, für Beschäftigte und für die Bevölkerung angezeigt. Es folgt jeweils eine graphische Gesamtdarstellung aller Ausscheidungsraten. Gezeigt werden die Ausscheidungsraten und ihre Standardabweichung für alle Probenahmen und Probanden.

Zu besserer Anschaulichkeit wird jeweils eine Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten in Form eines Histogramms angefügt. In die Häufigkeitsverteilung ist jeweils zum Vergleich die Normalverteilungskurve eingezeichnet. Es ist aber nicht zu erwarten, dass die Ausscheidungsraten wirklich normalverteilt sind. Hierzu ist bei der Diskussion der Unsicherheiten hingewiesen worden.

Für Vergleiche hinsichtlich der Parameter sind Box Plots gewählt. Die den Box Plots zugrunde liegenden Werte sind tabellarisch dargestellt. Mit Hilfe der Box Plots besteht eine anschauliche Möglichkeit, eventuelle Unterschiede in den Kategorien bzw. Parametern festzustellen.

Der Erläuterung der Box Plots dient die folgende Abbildung:

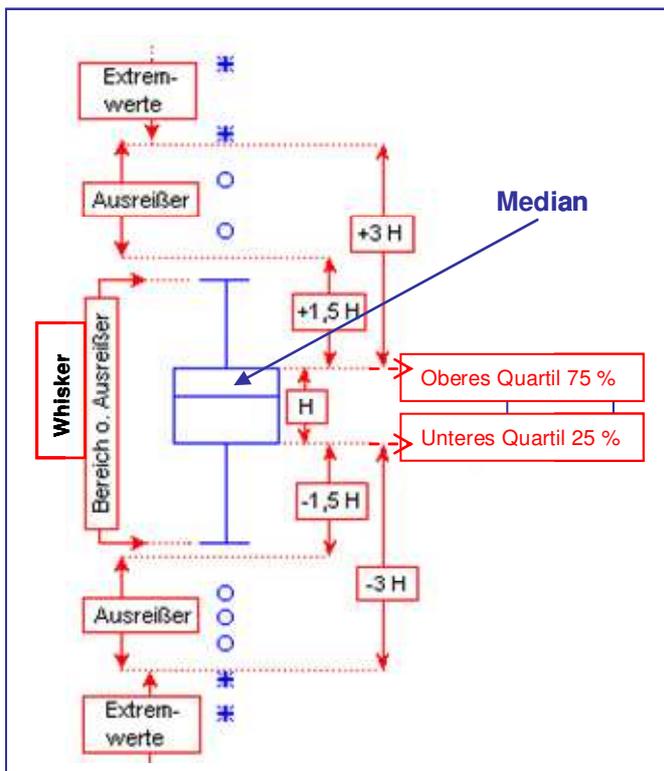


Abbildung 16: Box Plots – Definition von Ausreißern und Extrema

In diesem Bericht entspricht, wie in Abbildung 16 angegeben, die Höhe der Box der Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Quartil. Der Gesamtwertebereich ist durch die Whisker gekennzeichnet. Die Koeffizienten für Ausreißer und Extremwerte wurden mit den Koeffizienten 1,5 und 3 festgelegt.

In der grafischen Darstellung können Ausreißer und Extrema die Bildgestaltung aus Skalierungsgründen stark beeinflussen. Sie erhalten damit eine Bedeutung, die ihnen nicht zukommt wenn ihre Zahl im Verhältnis zur Zahl der Messwerte klein ist. (Dies wird am Beispiel des  $^{226}\text{Ra}$  in Urin später gezeigt werden). Zur besseren Übersichtlichkeit sind daher in den Box Plots Ausreißer und Extrema nicht dargestellt. Die Minimalwerte und Maximalwerte sind aber aus den Tabellen am Ende jeden Kapitels zu entnehmen.

In den Box Plots werden jeweils die Werte der Bevölkerung mit den Werten der Beschäftigten verglichen und regional differenziert. Des Weiteren wurden die

untersuchten Arbeitsfelder untereinander verglichen und ebenfalls nach Regionen gruppiert.

### 4.2.2.1 Ausscheidungsrate von <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po im Urin

#### 4.2.2.1.1 <sup>226</sup>Ra im Urin

Tabelle 20: Ausscheidungsrate <sup>226</sup>Ra im Urin

	Anteil der	Ausscheidungsrate					
	Messwerte	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	< g*		Min	Max		Quartil	Quartil
	[%]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
alle Werte	18,5	11	1,5	75	7,5	1,9	15
Beschäftigte	20,3	10	2,0	75	6,6	2,0	14
Bevölkerung	16,7	12	1,5	66	8,1	2,5	17

g\* = NWG = 2,0 mBq/d (2,1 l)

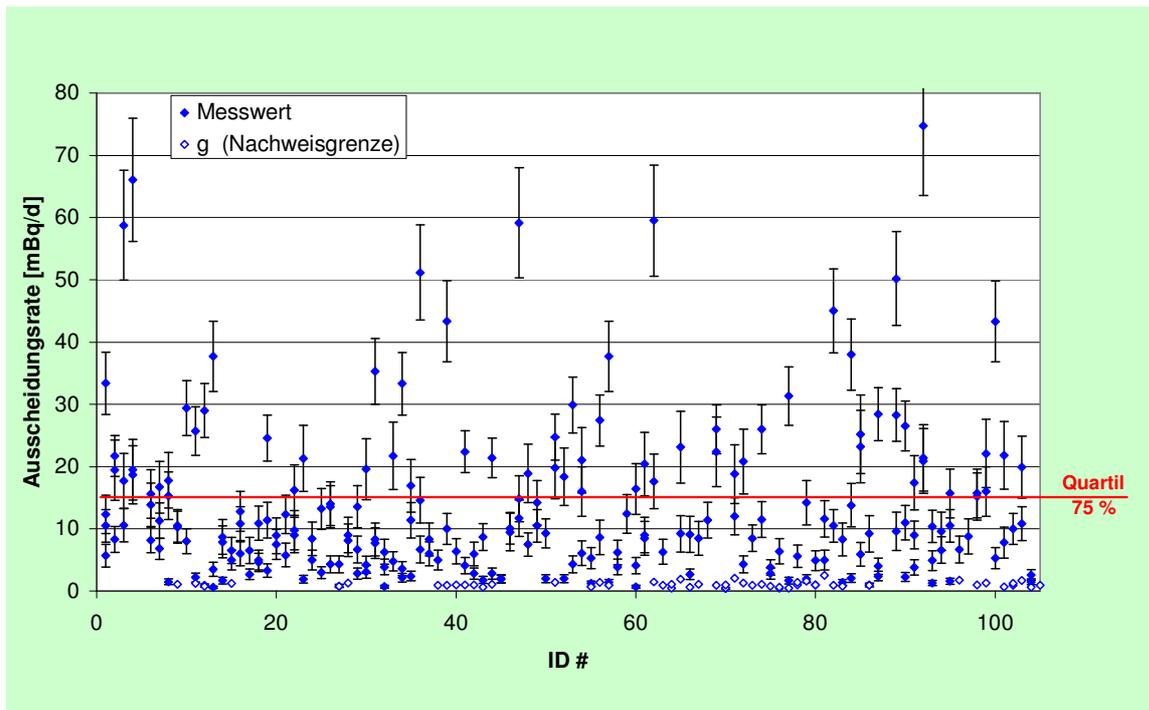


Abbildung 17: Ausscheidungsrate <sup>226</sup>Ra im Urin - alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)

Abbildung 17 zeigt alle Messwerte mit der jeweiligen Standardabweichung. Werte unterhalb der Nachweisgrenze sind als offene Rauten gekennzeichnet und bei der Berechnung des Medianwertes berücksichtigt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass beim Radium in Urin ca. 20 % der Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze lagen. Die sich oberhalb der Ausscheidungsrate von 30 mBq/d darstellenden Werte sind als Einzelwerte zu identifizieren. Sie liegen weit außerhalb der sonst zusammengehörigen Tripel von Messwerten, die den drei Probenahmen entsprechen.

Die Häufigkeitsverteilung der Einzelwerte ist in Abbildung 18 gezeichnet.

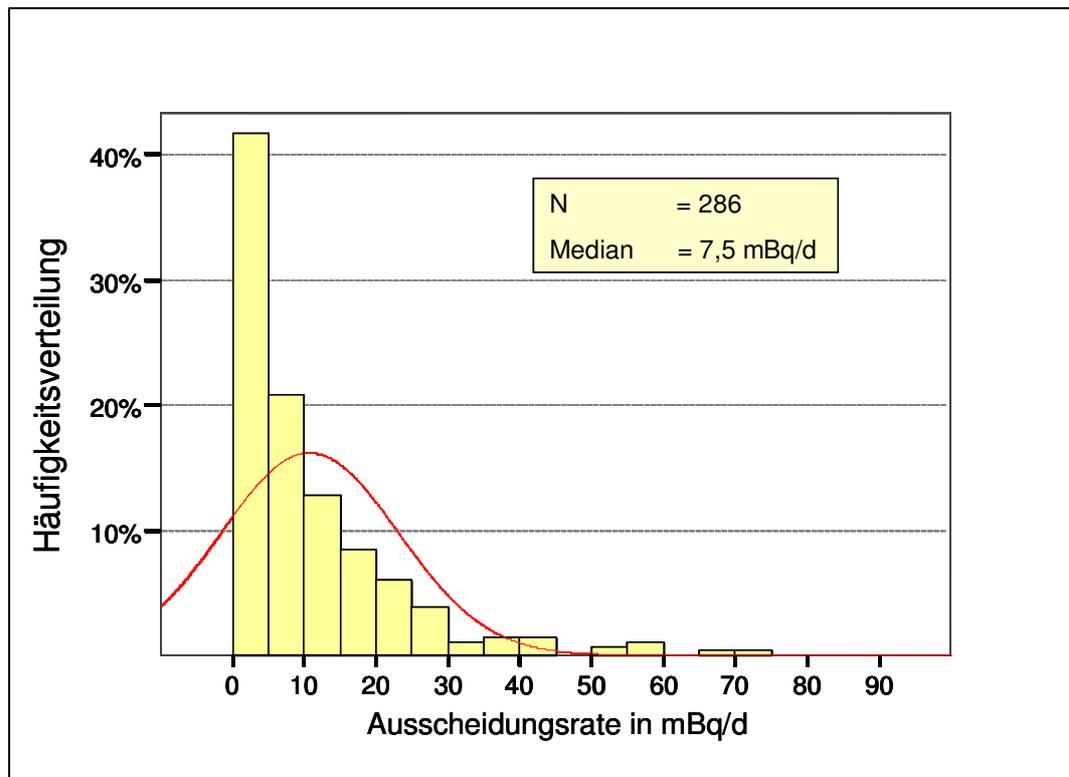


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten  $^{226}\text{Ra}$  im Urin

Die Häufigkeitsverteilung bestätigt, dass oberhalb von 30 mBq/d nur wenige Messwerte zu finden sind.

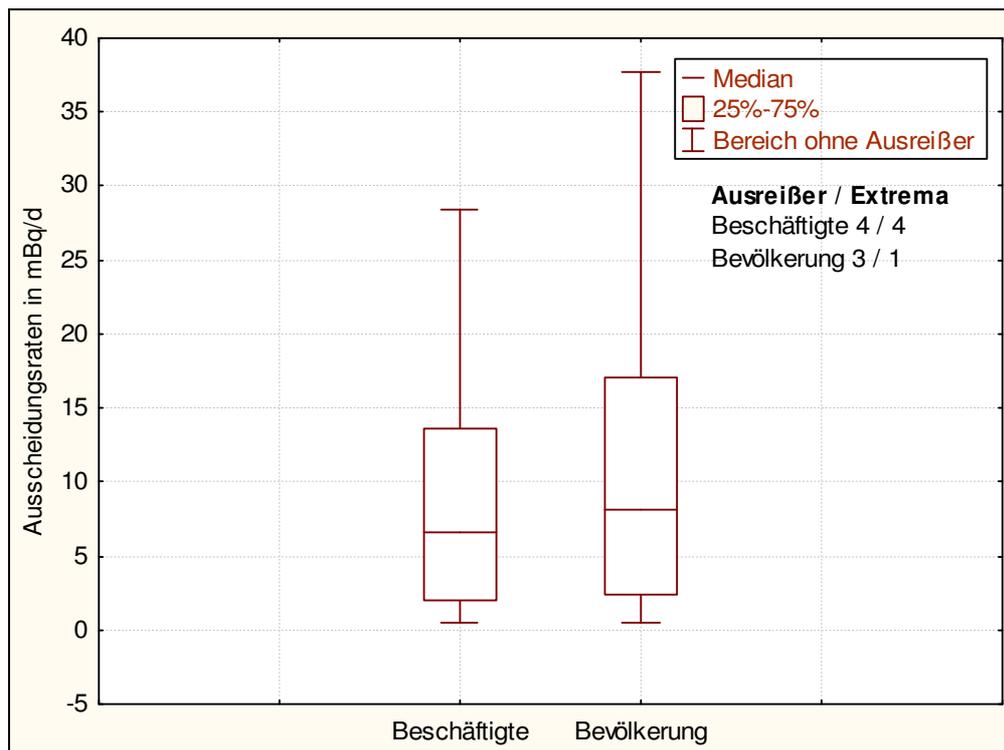


Abbildung 19: Ausscheidungsrate  $^{226}\text{Ra}$  im Urin - alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung ohne Ausreißer und Extrema

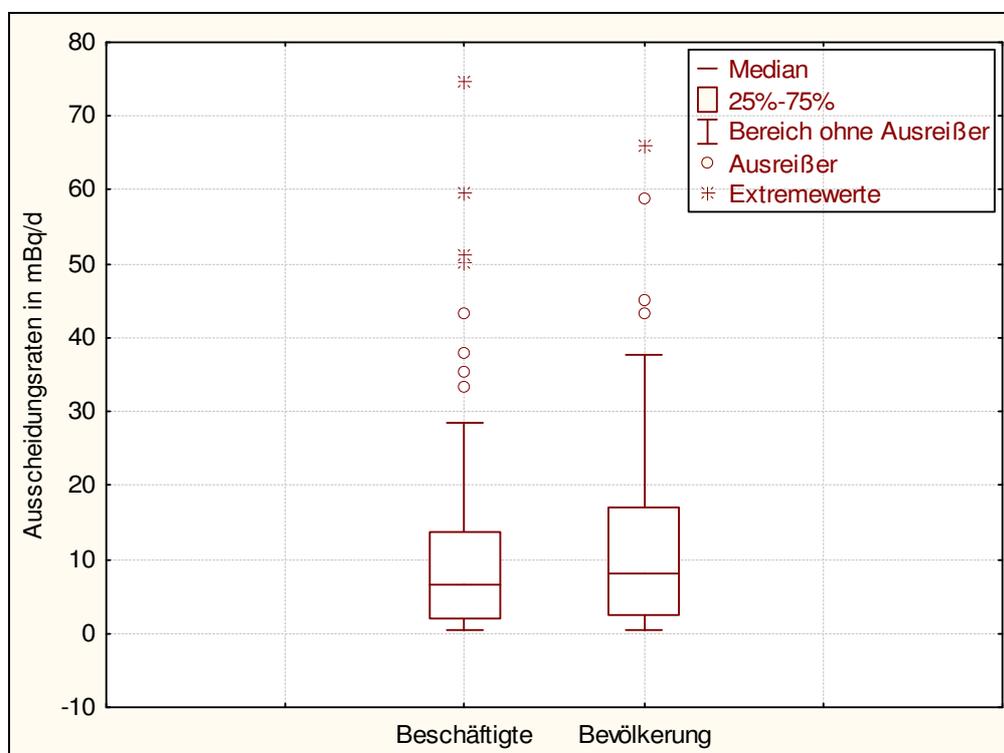


Abbildung 20: Ausscheidungsrate  $^{226}\text{Ra}$  im Urin - alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung mit Ausreißern und Extrema

Die Abbildungen 19 und 20 geben im Prinzip die gleiche Information wieder. Sie zeigen den Vergleich zwischen Beschäftigten und Bevölkerung hinsichtlich der Ausscheidungsraten von  $^{226}\text{Ra}$  in Urin als Box Plots. Wie aus Abbildung 20 zu erkennen ist, stauchen die eingefügten Ausreißer und Extrema die Box Plots und machen so die Grafik unübersichtlicher. Die Zahl der Ausreißer und Extrema liegt in diesem Fall für Beschäftigte bei 7 % und für Personen der Bevölkerung bei 4 %. Ihre Darstellung erscheint hier nicht notwendig.

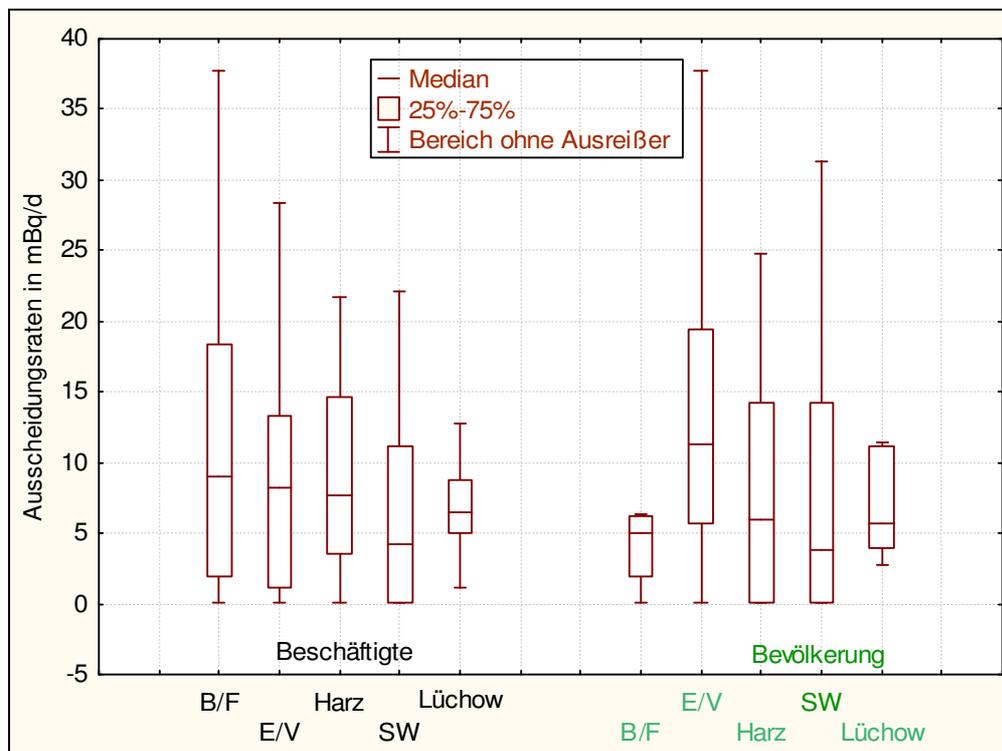


Abbildung 21: Ausscheidungsraten  $^{226}\text{Ra}$  im Urin – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

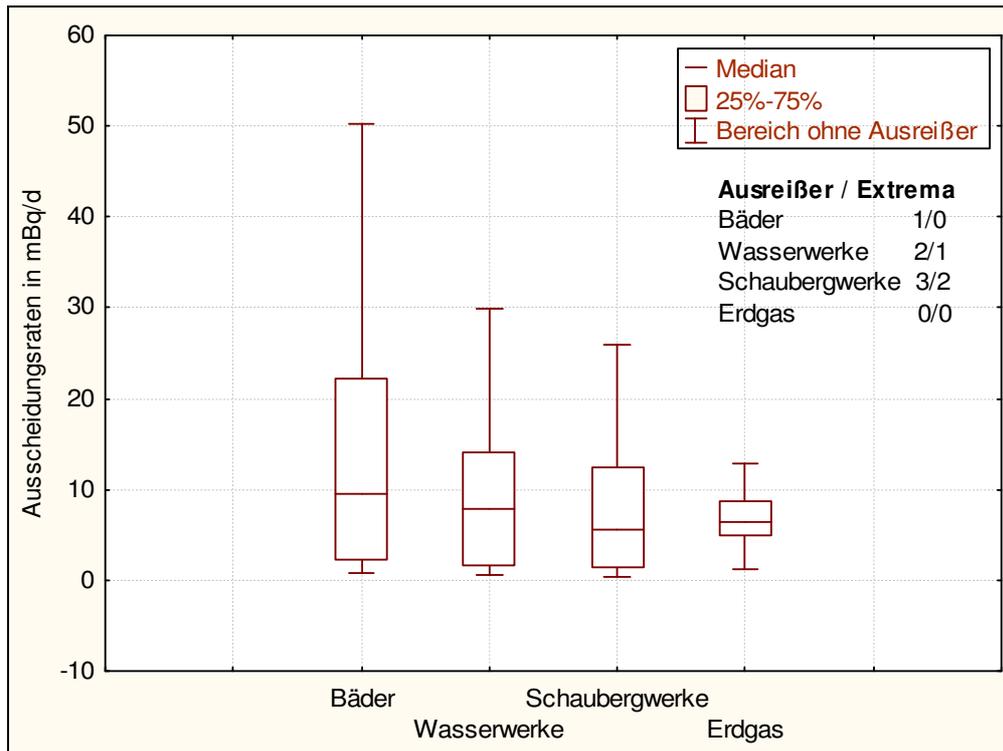


Abbildung 22: Ausscheidungsrate<sup>226</sup>Ra im Urin - alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern

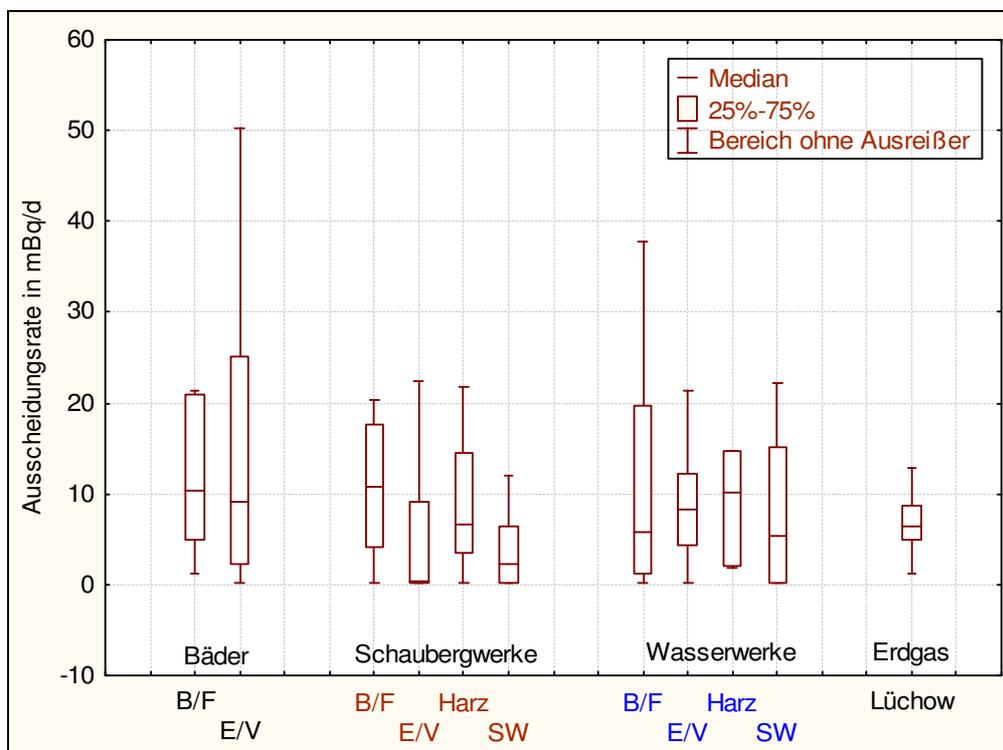


Abbildung 23: Ausscheidungsrate<sup>226</sup>Ra im Urin - Arbeitsfelder nach Regionen

Der Vergleich der Beschäftigten mit der Bevölkerung (Abbildung 20) zeigt keine wesentlichen Unterschiede im Medianwert. Der Gesamtwertebereich der Bevölkerung liegt über dem der Beschäftigten. Der regionale Vergleich der Beschäftigten mit der

Bevölkerung (Abbildung 21) ergibt wesentlich höher Werte der Beschäftigten in Bayern/Franken, wohingegen im Erzgebirge/Vogtland die Bevölkerung deutlich höhere Werte ausweist als die Beschäftigten. In den übrigen Regionen sind die Unterschiede weniger ausgeprägt.

Die Betrachtung der Arbeitsfelder (Abbildung 22) zeigt niedrige Werte bzw. eine geringere Streuung bei den Mitarbeitern der Erdgasgewinnung. Deutlich heben sich davon die Bäder ab. Dies wird auch in der Darstellung der regionalen Verteilung der Arbeitsfelder (Abbildung 23) bestätigt. Dort ist erkennbar, dass die Werte der Bäder aus dem Erzgebirge/Vogtland eine höhere Streuung und damit einen größeren Anteil höherer Werte aufweisen, wenngleich der Medianwert sogar knapp unter dem der Bäder in Bayern/Franken liegt.

Auch die übrigen Arbeitsfelder zeigen regionale Unterschiede, die im Einzelnen der Abbildung 23 und der Tabelle 22 entnommen werden können.

Tabelle 21: Ausscheidungsraten  $^{226}\text{Ra}$  im Urin – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	<b>N<sub>1</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ausscheidungsrate</b>					
	<b>Zahl der</b>	<b>Zahl der</b>	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	<b>gültigen</b>	<b>Ausreißer/</b>		Min	Max		Quartil	Quartil
	<b>Proben</b>	<b>Extrema</b>	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Arbeitsfelder</b>								
Bäder	32	2/3	15	2,0	75	<b>9,6</b>	2,4	22
Wasserwerke	72	1/1	9,8	1,9	59	<b>7,8</b>	1,7	14
Schaubergwerke	75	7/2	9,7	2,0	60	<b>5,6</b>	<2,0	12
Erdgas	9	0/0	6,7	1,8	13	<b>6,5</b>	5,0	8,7
<b>Regionen *</b>								
Bayern/Franken	41	1/1	13	2,0	75	<b>8,5</b>	2,0	18
Erzgebirge/Vogtl.	99	2/2	12	2,0	66	<b>9,0</b>	2,2	17
Harz	62	3/3	11	1,5	59	<b>6,7</b>	2,6	14
Schwarzwald	65	3/0	8,5	2,0	45	<b>4,2</b>	<2,0	12
Wendland	18	1/0	7,6	1,7	25	<b>6,5</b>	4,6	11

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 22: Ausscheidungsraten  $^{226}\text{Ra}$  im Urin - Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate							
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/ Extrema	m	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
					[mBq/d]	Min	Max	[mBq/d]	Quartil	Quartil
<b>Bevölkerung</b>										
Bayern/Franken	4	0/0	4,1	2,0	6,3	<b>5,1</b>	2,0	6,3		
Erzgebirge/Vogtl.	39	1/1	15	2,0	66	<b>11</b>	5,7	19		
Harz	26	0/0	8,0	1,5	25	<b>6,0</b>	<2,0	14		
Schwarzwald	20	2/0	8,6	2,7	25	<b>5,8</b>	4,0	11		
Wendland	9	1/0	11	1,4	45	<b>3,8</b>	<2,0	14		
<b>Bäder</b>										
Bayern/Franken	11	0/1	16	1,3	75	<b>10</b>	4,9	21		
Erzgebirge/Vogtl.	21	2/2	14	2,0	50	<b>9,2</b>	2,3	25		
<b>Schaubergwerke</b>										
Bayern/Franken	10	0/1	15	2,0	60	<b>11</b>	4,1	18		
Erzgebirge/Vogtl.	17	2/0	6,7	2,0	26	<b>2,5</b>	<2,0	9,2		
Harz	31	3/1	12	1,9	51	<b>6,7</b>	3,6	15		
Schwarzwald	18	2/0	5,0	2,0	21	<b>2,2</b>	<2,0	6,4		
<b>Wasserwerke</b>										
Bayern/Franken	16	0/0	11	1,7	38	<b>5,7</b>	1,3	20		
Erzgebirge/Vogtl.	22	0/0	8,0	2,0	21	<b>8,3</b>	4,3	12		
Harz	7	0/1	16	1,9	59	<b>10</b>	2,0	15		
Schwarzwald	26	1/0	8,3	2,0	42	<b>5,5</b>	<2,0	15		
<b>Erdgas</b>										
Wendland	9	0/0	6,7	1,7	13	<b>6,5</b>	5,0	8,7		

### 4.2.2.1.2 <sup>210</sup>Po im Urin

Tabelle 23: Ausscheidungsraten <sup>210</sup>Po im Urin

	Anteil der	Ausscheidungsrate					
	Messwerte	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	< g*		Min	Max		Quartil	Quartil
	[%]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
Gesamtwerte	0	12	0,5	248	<b>4,3</b>	2,4	10
Beschäftigte	0	15	0,8	248	<b>5,1</b>	2,7	12
Bevölkerung	0	6,8	0,5	171	<b>3,5</b>	2,0	8

g\* = Nachweisgrenze 1,0 mBq/d ( 2,1 l)

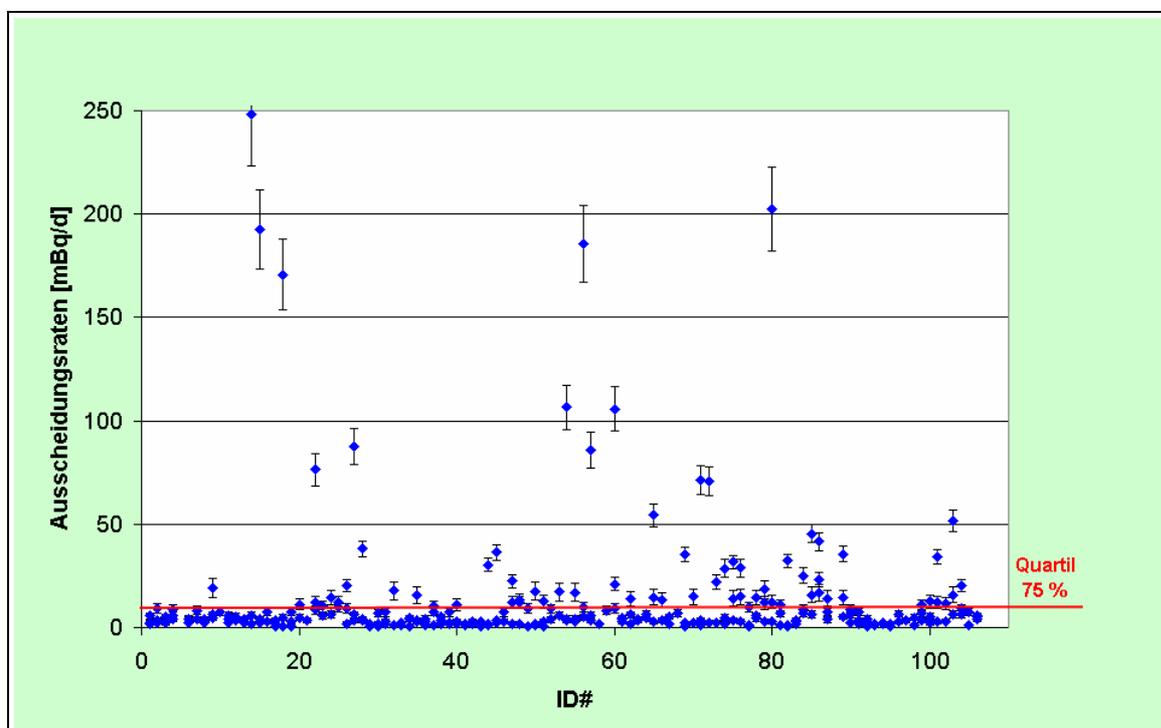


Abbildung 24: Ausscheidungsrate <sup>210</sup>Po im Urin - alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)

Gegenüber <sup>226</sup>Ra in Urin zeigen die Ergebnisse in Tabelle 23 und Abbildung 24 zwar wesentlich höhere Maximalwerte, der Medianwert mit 4,3 mBq/d ist jedoch niedriger als der für Radium. Auch der Wert des oberen Quartils ist mit 10 mBq/d sehr niedrig, gemessen an der Wertespanne. Wie die Tabelle deutlich macht, sind alle Werte größer als die Nachweisgrenze.

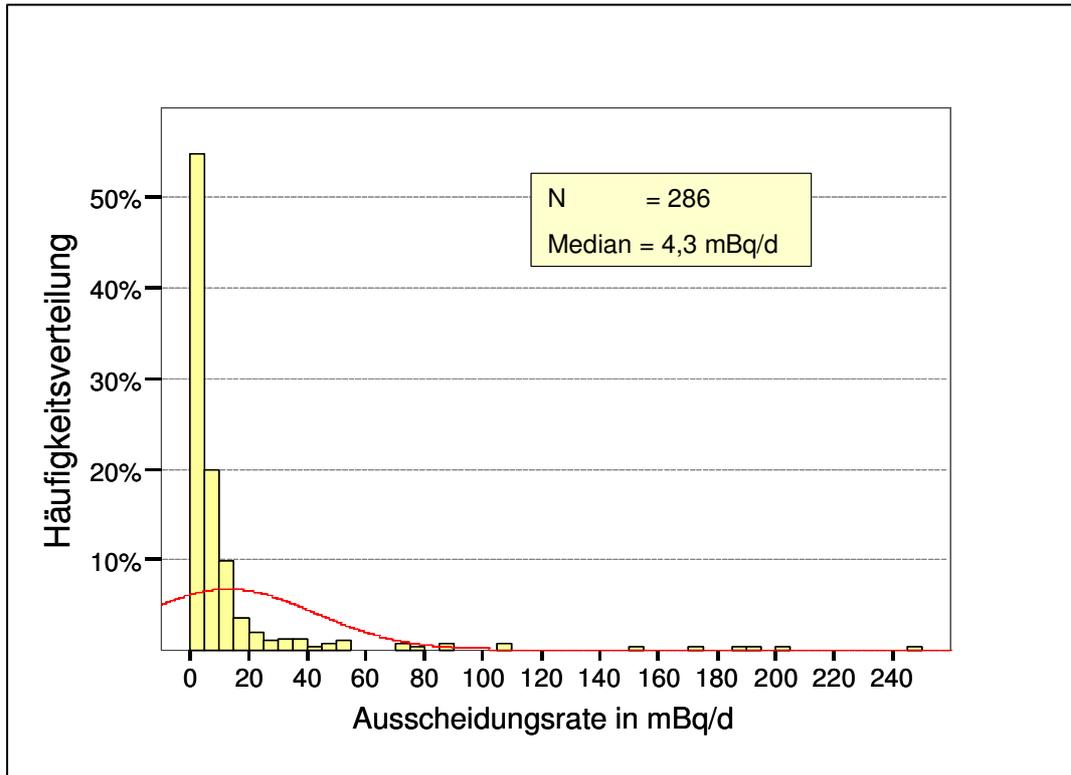


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Po}$  im Urin

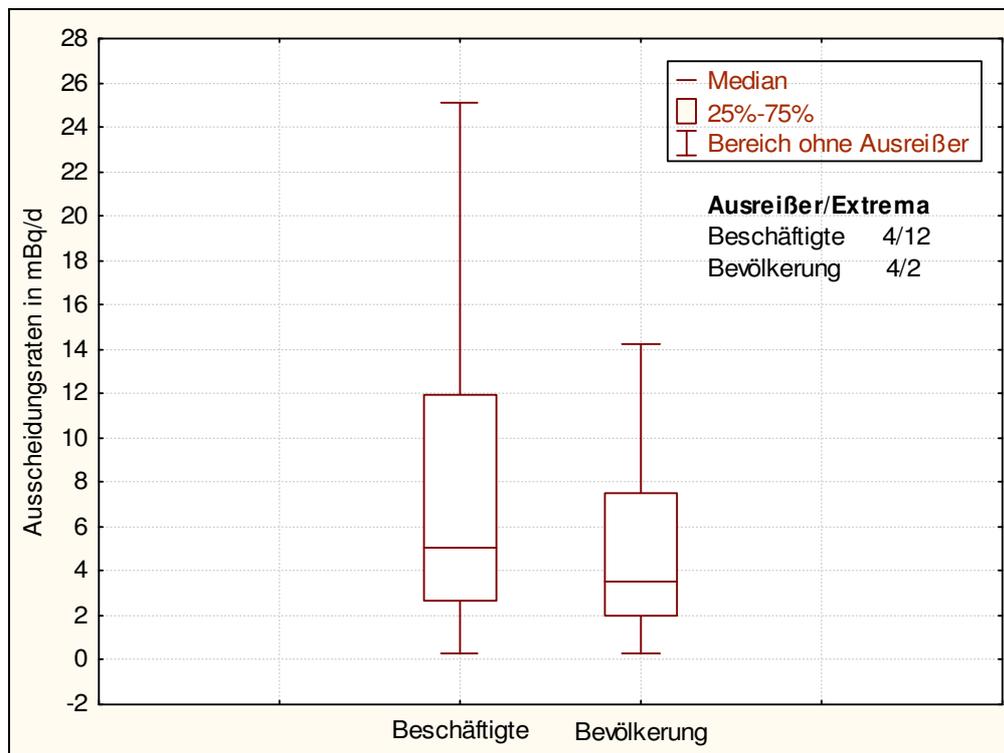


Abbildung 26: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Po}$  im Urin - alle Ergebnisse nach Beschäftigten und Bevölkerung

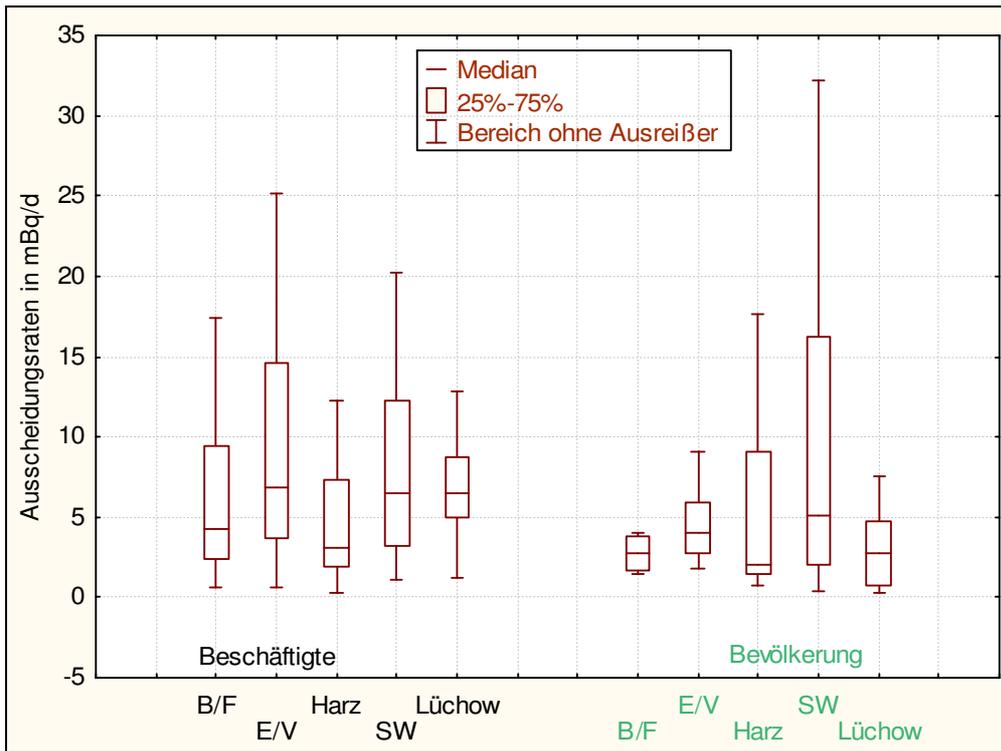


Abbildung 27: Ausscheidungsrate<sup>210</sup>Po im Urin – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

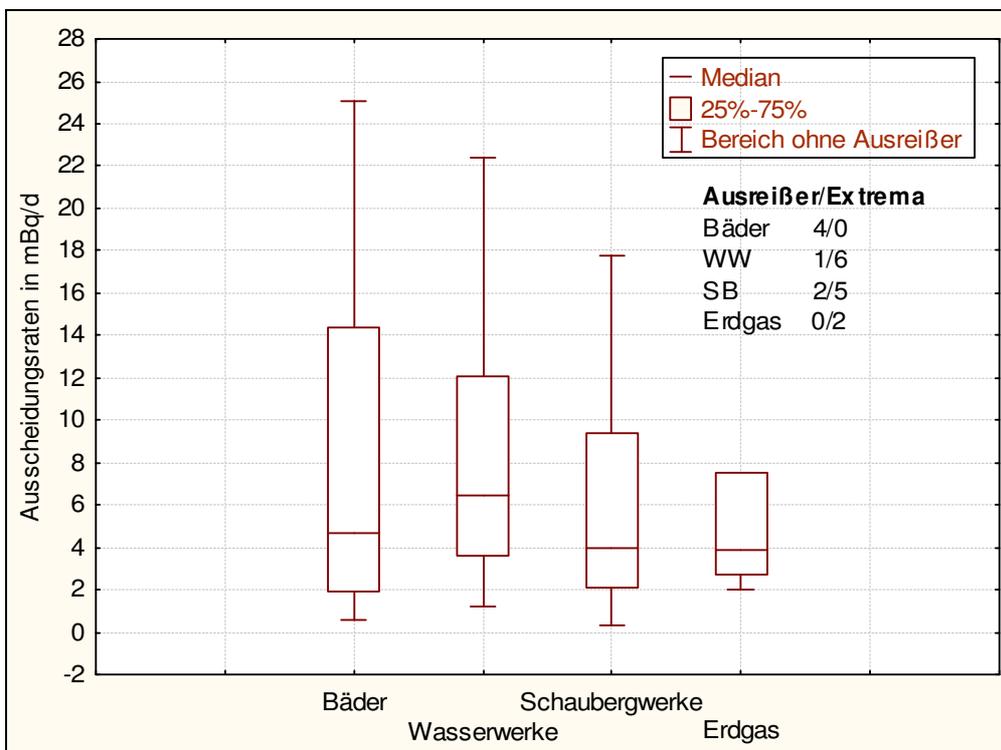


Abbildung 28: Ausscheidungsrate<sup>210</sup>Po im Urin – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern

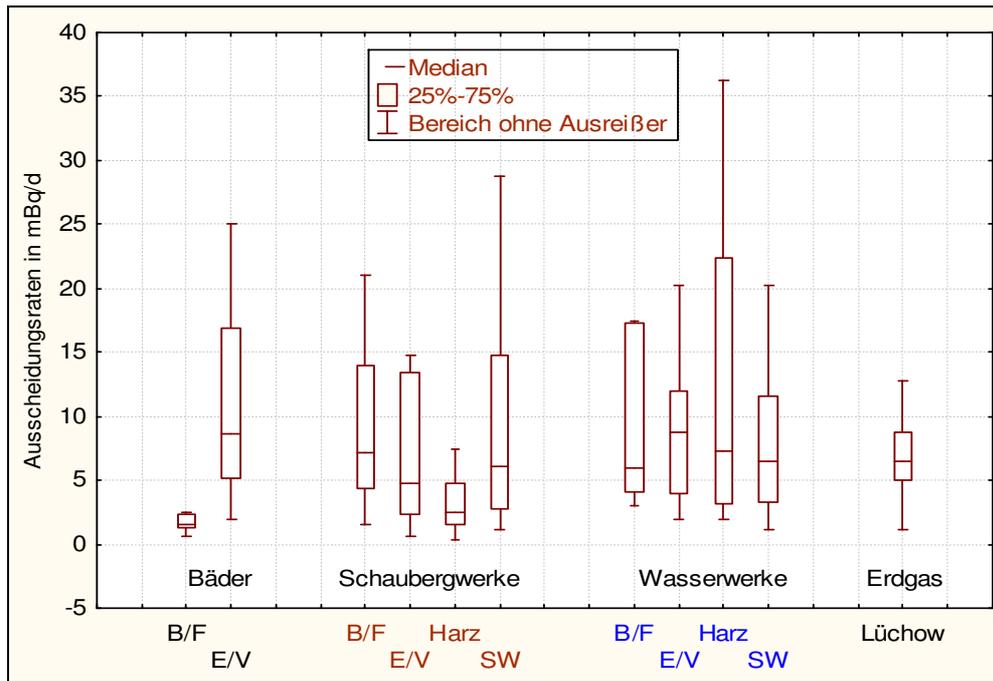


Abbildung 29: Ausscheidungsraten <sup>210</sup>Po im Urin – Arbeitsfelder nach Regionen

Aus Abbildung 26 geht hervor, dass Medianwert und Streubereich für die Beschäftigten höher sind als für die Bevölkerung. Abbildung 27 bestätigt dies auch für die einzelnen Regionen. Zu beachten ist hier die Anzahl der Extremwerte.

Bei dem Vergleich der Arbeitsfelder unterscheiden sich die Mediane für Bäder Schaubergwerke und Erdgasgewinnung kaum. Der Medianwert für Wasserwerke ist geringfügig erhöht. Allerdings ist der Streubereich bei den Bädern höher als bei den übrigen Arbeitsfeldern. Dieser beruht ebenso wie beim <sup>226</sup>Ra auf den Werten der Bäder aus dem Erzgebirge/Vogtland.

Tabelle 24: Ausscheidungsraten <sup>210</sup>Po im Urin – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate							
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/Extrema	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
						Min	Max		Quartil	Quartil
			[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	
<b>Arbeitsfelder</b>										
Bäder	32	4/0	9,9	0,6	46	<b>3,8</b>	2,0	14		
Wasserwerke	72	1/6	16	1,2	186	<b>6,5</b>	3,7	12		
Schaubergwerke	75	2/5	12	0,3	202	<b>4,0</b>	2,1	9,4		
Erdgas	9	0/2	52	2,0	248	<b>3,9</b>	2,7	7,5		
<b>Regionen *</b>										
Bayern/Franken	41	1/3	17	0,6	186	<b>4,0</b>	2,0	9,0		
Erzgebirge/Vogtl.	99	4/4	11	0,6	88	<b>2,6</b>	3,5	9,9		
Harz	62	3/2	5,4	0,3	36	<b>2,6</b>	1,5	7,3		
Schwarzwald	65	2/3	14	0,4	202	<b>6,0</b>	2,9	13		
Wendland	18	0/1	37	0,3	248	<b>3,1</b>	2,0	7,5		

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 25: Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Po}$  im Urin –Arbeitsfelder und Bevölkerung nach Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate							
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/Extrema	m	Wertebereich		Median	Unteres Quartil	Oberes Quartil
					[mBq/d]	Min	Max	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Bevölkerung</b>										
Bayern/Franken	4	0/0	2,8	1,5	4,0	<b>2,8</b>	1,7	3,9		
Erzgebirge/Vogtl.	39	0/1	4,9	1,8	19	<b>4,0</b>	2,7	5,9		
Harz	26	1/0	5,3	0,7	30	<b>2,0</b>	1,4	9,1		
Schwarzwald	20	0/0	10	0,4	32	<b>5,1</b>	2,1	16		
Wendland	9	0/1	21	0,3	171*	<b>2,7</b>	0,7	4,7		
<b>Bäder</b>										
Bayern/Franken	11	1/0	1,8	0,6	4,3	<b>1,6</b>	1,3	2,4		
Erzgebirge/Vogtl.	21	3/0	14	1,9	46	<b>8,6</b>	5,1	17		
<b>Schaubergwerke</b>										
Bayern/Franken	10	0/1	18	1,5	106	<b>7,2</b>	4,3	14		
Erzgebirge/Vogtl.	17	1/1	10	0,6	54	<b>4,8</b>	2,4	13		
Harz	31	1/1	4,0	0,3	18	<b>2,5</b>	1,5	4,8		
Schwarzwald	18	0/2	26	1,1	202	<b>6,2</b>	2,7	15		
<b>Wasserwerke</b>										
Bayern/Franken	16	0/3	29	3,0	186	<b>6,0</b>	4,1	17		
Erzgebirge/Vogtl.	22	0/3	16	2,0	88	<b>8,8</b>	3,9	12		
Harz	7	0/1	20	2,0	88	<b>7,3</b>	3,1	22		
Schwarzwald	26	1/1	9,7	1,2	51	<b>6,5</b>	3,3	12		
<b>Erdgas</b>										
Wendland	9	0/2	52	2,0	<b>248*</b>	<b>3,9</b>	2,7	7,5		

\* Die hohen Maximalwerte in der Region Wendland, sowohl für Beschäftigte als auch für die Bevölkerung, sind ungewöhnlich und resultieren aus Einzelwerten der 3. Probenahme.

### 4.2.2.1.3 $^{210}\text{Pb}$ im Urin

Tabelle 26: Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  im Urin

	Anteil der	Ausscheidungsrate					
	Messwerte	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	< $g^*$		Min	Max		Quartil	Quartil
	[%]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
Gesamtwerte	0	12	0,8	187	<b>7,5</b>	4,4	13
Beschäftigte	0	14	0,9	187	<b>8,5</b>	4,8	15
Bevölkerung	0	8,8	0,8	77	<b>6,3</b>	3,8	11

$g^*$  = Nachweisgrenze= 1,0 mBq/d (2,1 l)

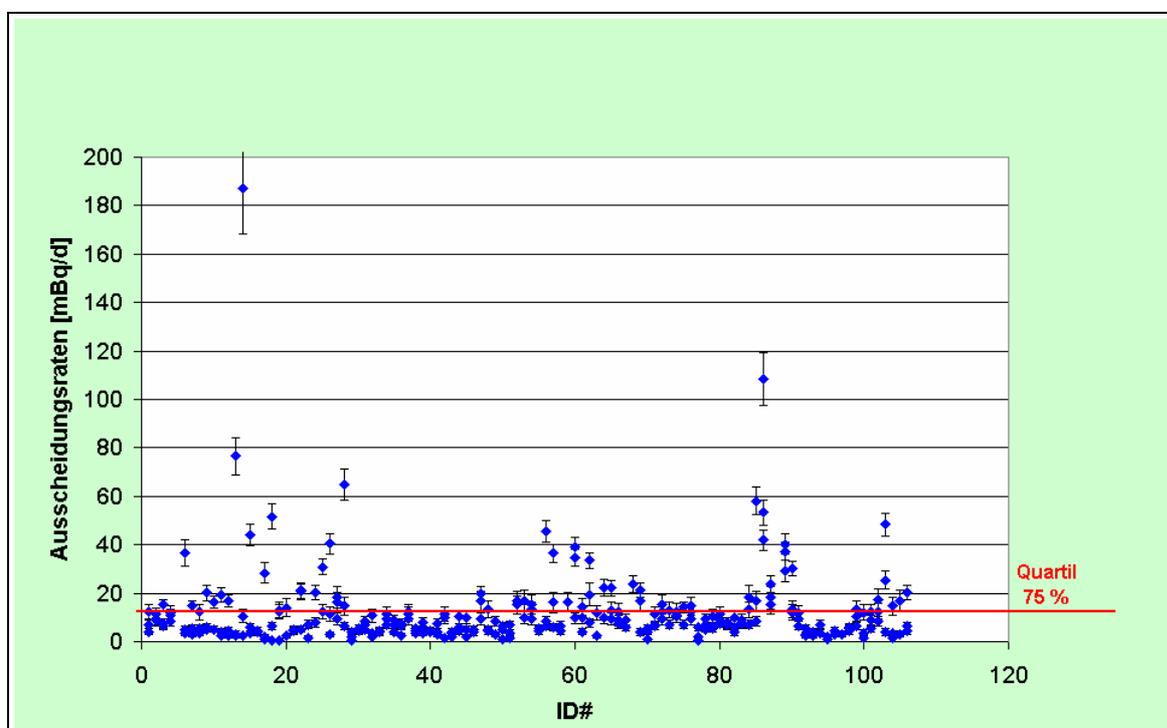


Abbildung 30: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Pb}$  im Urin - alle Werte mit einfacher Standardabweichung ( $s$ )

Bei Werten bis zu 187 mBq/d ist das obere Quartil mit 13 mBq/d niedrig. Alle Messwerte liegen oberhalb der Nachweisgrenze. Mit drei Ausnahmen sind alle Werte oberhalb 30 mBq/d Einzelwerte.

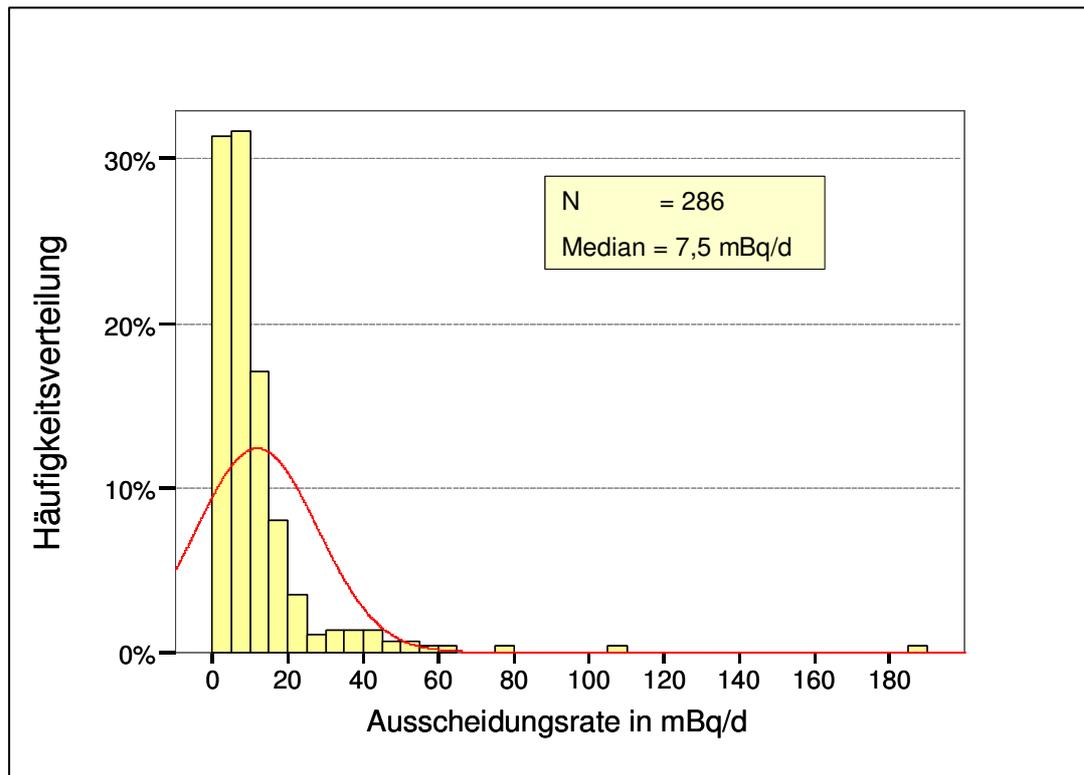


Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  im Urin

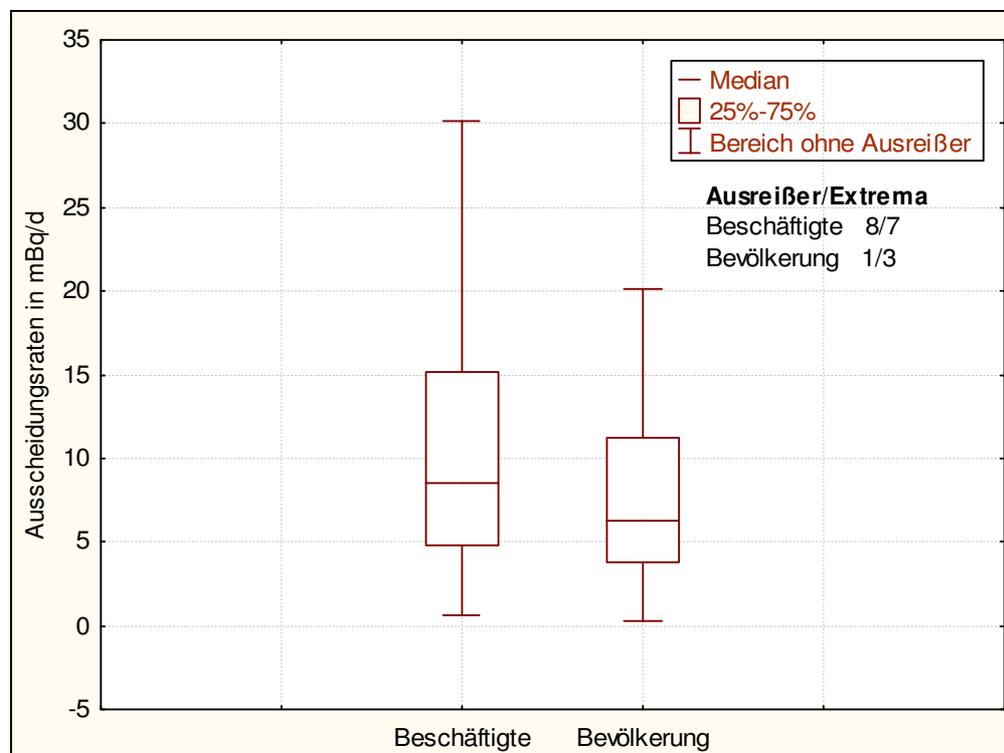


Abbildung 32: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Pb}$  im Urin – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung

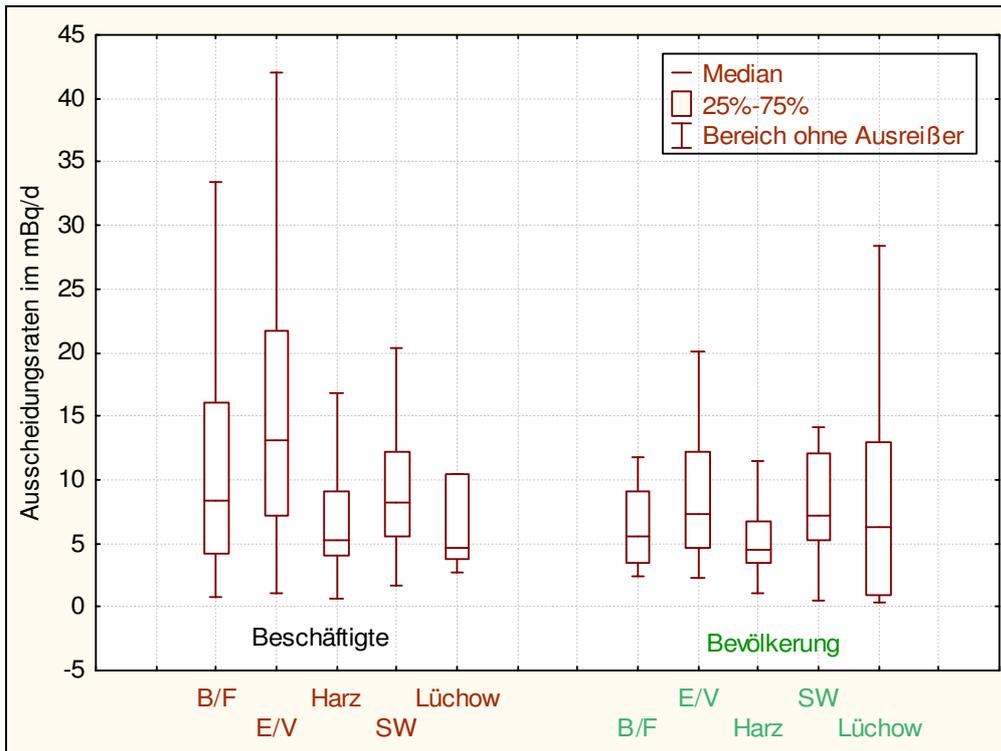


Abbildung 33: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Pb}$  im Urin – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

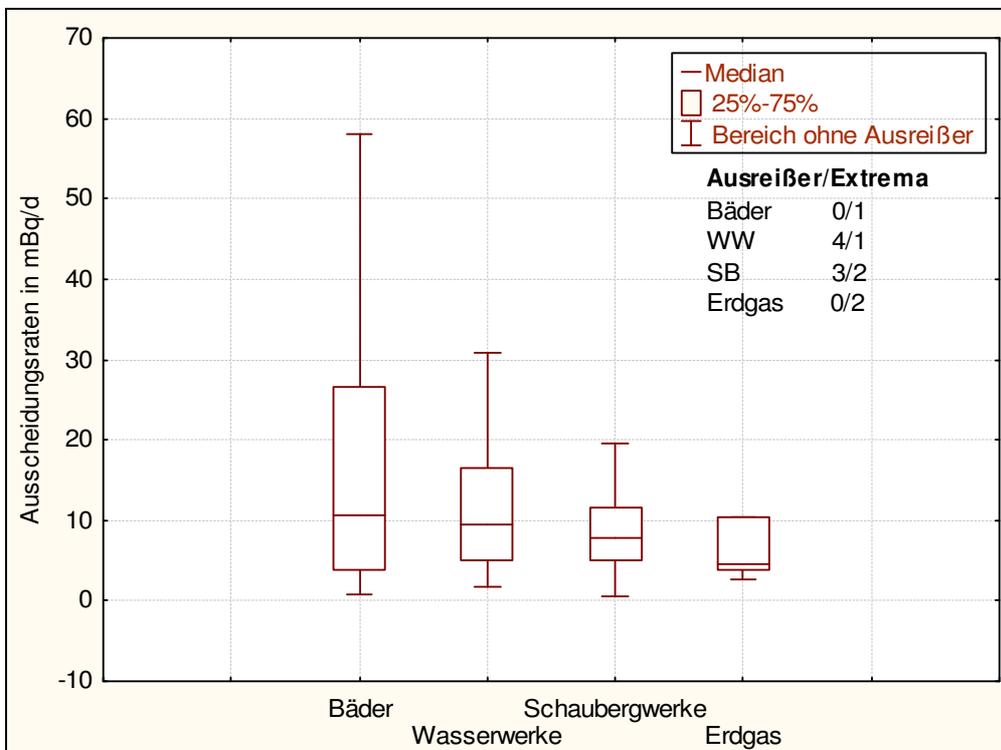


Abbildung 34: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Pb}$  im Urin – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern

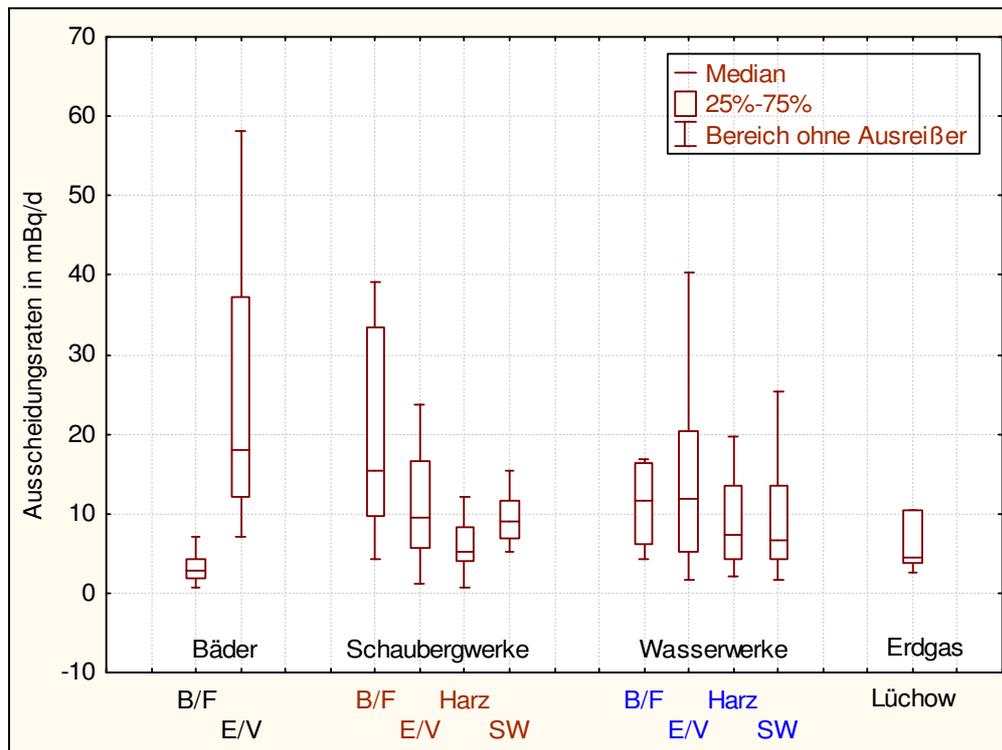


Abbildung 35: Ausscheidungsraten <sup>210</sup>Pb im Urin – Arbeitsfelder nach Regionen

Aus Abbildung 32 geht hervor, dass Medianwert und Streubereich für die Beschäftigten höher sind als für die Bevölkerung. Abbildung 33 lässt dann erkennen, dass in allen Regionen die Medianwerte für die Beschäftigten mit der Ausnahme Wendland höher sind als für die Bevölkerung. Allerdings sind die Unterschiede teilweise gering.

Bei dem Vergleich der Arbeitsfelder (Abbildung 34) sind Unterschiede in den Medianwerte, den Quartilen und Streubereichen festzustellen. Bäder und Wasserwerke weisen deutlich höhere Werte aus als Schaubergwerke und Erdgasgewinnung. Allerdings ist der Streubereich bei den Bädern höher als bei den übrigen Arbeitsfeldern. Dieser beruht auf den Werten der Bäder aus dem Erzgebirge/Vogtland.

Tabelle 27: Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  im Urin – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	<b>N<sub>1</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ausscheidungsrate</b>					
	<b>Zahl der</b>	<b>Zahl der</b>	$\bar{m}$	<b>Wertebereich</b>		<b>Median</b>	Unteres	Oberes
	<b>gültigen</b>	<b>Ausreißer/</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>		Quartil	Quartil
	<b>Proben</b>	<b>Extrema</b>	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Arbeitsfelder</b>								
Bäder	32	0/1	19	0,8	108	<b>11</b>	4,0	27
Wasserwerke	72	4/1	13	1,7	65	<b>9,4</b>	5,1	17
Schaubergwerke	75	3/2	9,7	0,6	39	<b>7,9</b>	5,1	12
Erdgas	9	0/2	30	2,7	187	<b>4,6</b>	3,8	11
<b>Regionen *</b>								
Bayern/Franken	41	4/0	12	0,8	46	<b>8,1</b>	4,3	16
Erzgebirge/Vogtl.	99	3/3	15	1,1	108	<b>10</b>	5,6	18
Harz	62	2/0	6,1	0,6	20	<b>5,0</b>	3,8	8,5
Schwarzwald	65	1/1	9,3	0,5	48	<b>7,8</b>	5,4	12
Wendland	18	0/2	21	0,3	187	<b>5,3</b>	2,7	13

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 28: Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  im Urin – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen

	<b>N<sub>1</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ausscheidungsrate</b>					
	<b>Zahl der</b>	<b>Zahl der</b>	<b>m</b>	<b>Wertebereich</b>		<b>Median</b>	<b>Unteres</b>	<b>Oberes</b>
	<b>gültigen</b>	<b>Ausreißer/</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>		<b>Quartil</b>	<b>Quartil</b>
	<b>Proben</b>	<b>Extrema</b>	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Bevölkerung</b>								
Bayern/Franken	4	0/0	6,3	2,4	12	<b>5,5</b>	3,4	9,2
Erzgebirge/Vogtl.	39	0/2	11	2,3	77	<b>7,3</b>	4,6	12
Harz	26	1/0	5,4	1,1	13	<b>4,5</b>	3,4	6,8
Schwarzwald	20	0/0	8,0	0,5	14	<b>7,1</b>	5,2	12
Wendland	9	0/1	13	0,3	52	<b>6,3</b>	0,9	13
<b>Bäder</b>								
Bayern/Franken	11	0/0	3,2	0,8	7,1	<b>2,9</b>	1,8	4,2
Erzgebirge/Vogtl.	21	1/0	27	7,1	108	<b>18</b>	12,1	37
<b>Schaubergwerke</b>								
Bayern/Franken	10	0/0	19	4,2	39	<b>15</b>	9,7	34
Erzgebirge/Vogtl.	17	0/0	12	1,1	24	<b>9,5</b>	5,7	17
Harz	31	0/0	6,1	0,6	12	<b>5,3</b>	4,1	8,2
Schwarzwald	18	0/0	9,4	5,1	16	<b>9,0</b>	7,0	12
<b>Wasserwerke</b>								
Bayern/Franken	16	2/0	14	4,3	46	<b>12</b>	6,1	16
Erzgebirge/Vogtl.	22	1/0	15	1,7	65	<b>12</b>	5,1	20
Harz	7	0/0	9,0	2,1	20	<b>7,3</b>	4,3	13
Schwarzwald	26	0/1	10	1,7	48	<b>6,6</b>	4,3	14
<b>Erdgas</b>								
Wendland	9	0/2	30	2,7	<b>187*</b>	<b>4,6</b>	3,8	11

\* Die hohen Maximalwerte in der Region Wendland sowohl für Beschäftigte als auch für die Bevölkerung sind ungewöhnlich und resultieren aus Einzelwerten der 3. Probenahme.

#### 4.2.2.1.4 $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$ - Verhältnis im Urin

Tabelle 29: Verhältnis der Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$  im Urin

Verhältnis $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$					
$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	Min	Max		Quartil	Quartil
1,3	0,1	23	0,7	0,4	1,3

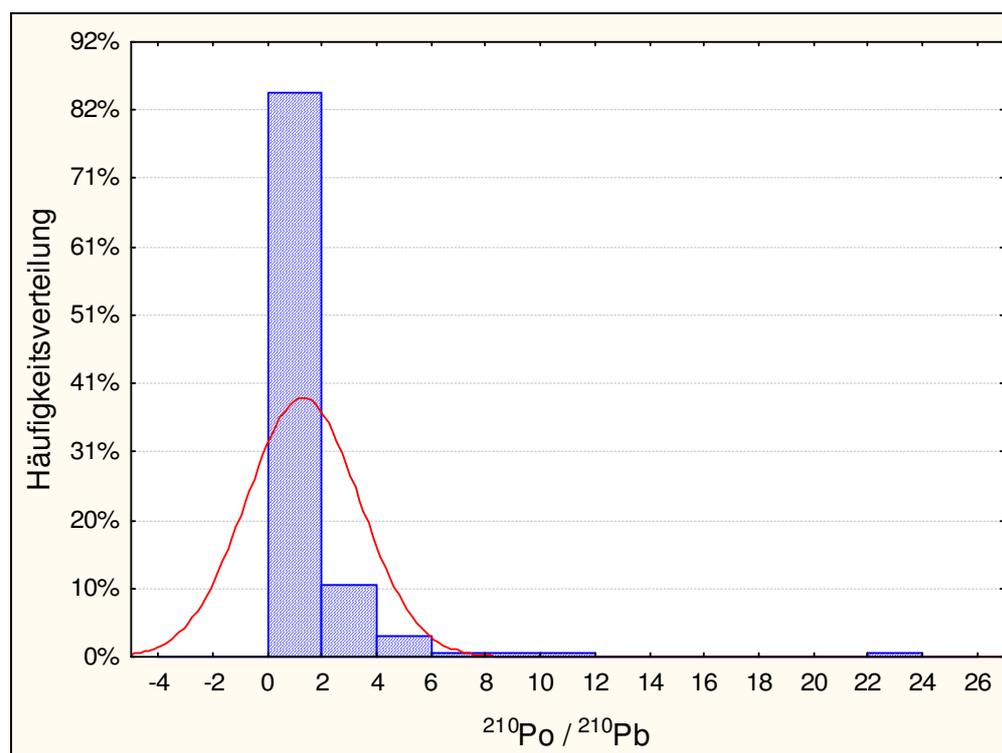


Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung des Verhältnissen der Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$  im Urin (N= 286)

Für das Verhältnis  $^{210}\text{Po} / ^{210}\text{Pb}$  im Urin ergibt sich aus den Ergebnissen dieser Studie ein Mittelwert von 1,3 und ein Medianwert von 0,7 (s. Tabelle 29).

In der Literatur sind Mittelwerte zwischen 0,9 und 8,7 (Tabelle 5) beschrieben.

Zu beachten ist allerdings die in der vorliegenden Studie große Zahl (286) von Untersuchungsergebnissen gegenüber den Literaturwerten.

## 4.2.2.2 Ausscheidungsrate von <sup>230</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb im Stuhl

### 4.2.2.2.1 <sup>230</sup>Th im Stuhl

Tabelle 30: Ausscheidungsrate <sup>230</sup>Th im Stuhl

	Anteil der	Ausscheidungsrate					
	Messwerte	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	< g*		Min	Max		Quartil	Quartil
	[%]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
Gesamtwerte	16,4	6,5	0,2	34	5,1	2,8	8,5
Beschäftigte	12,1	6,8	0,2	34	5,5	3,0	8,9
Bevölkerung	25	5,9	0,4	26	4,1	2,5	7,8

g\* = NWG= 2,5 mBq/d (4,9 g AM)

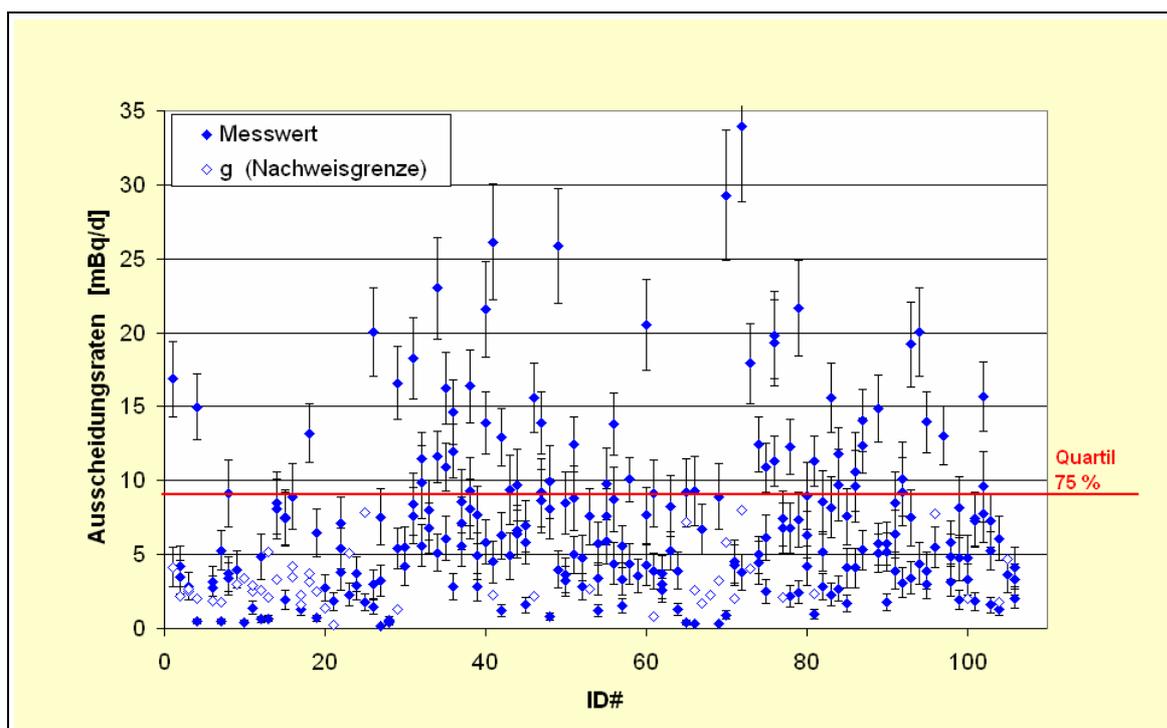


Abbildung 37: Ausscheidungsrate <sup>230</sup>Th im Stuhl - alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)

Tabelle 30 und Abbildung 37 zeigen für <sup>230</sup>Th im Stuhl einen Wertebereich von < 1,0 bis 34 mBq/d. Über 16 % der Messwerte sind kleiner als die Nachweisgrenze.

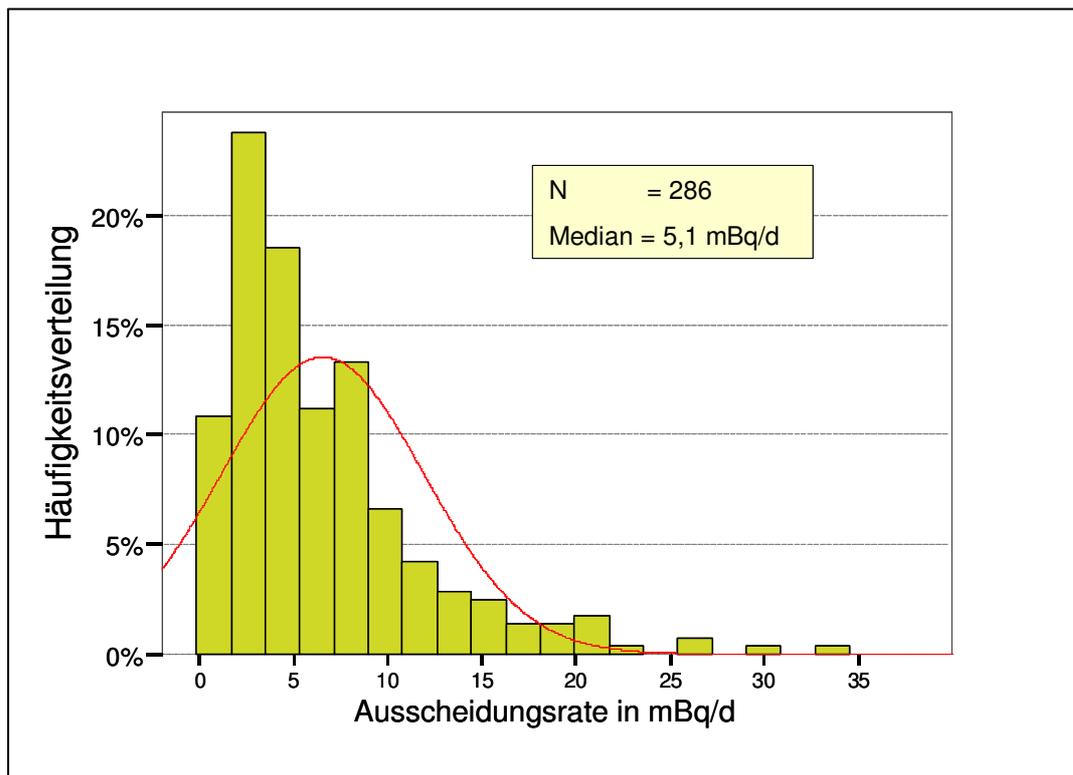


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung  $^{230}\text{Th}$  in Stuhl

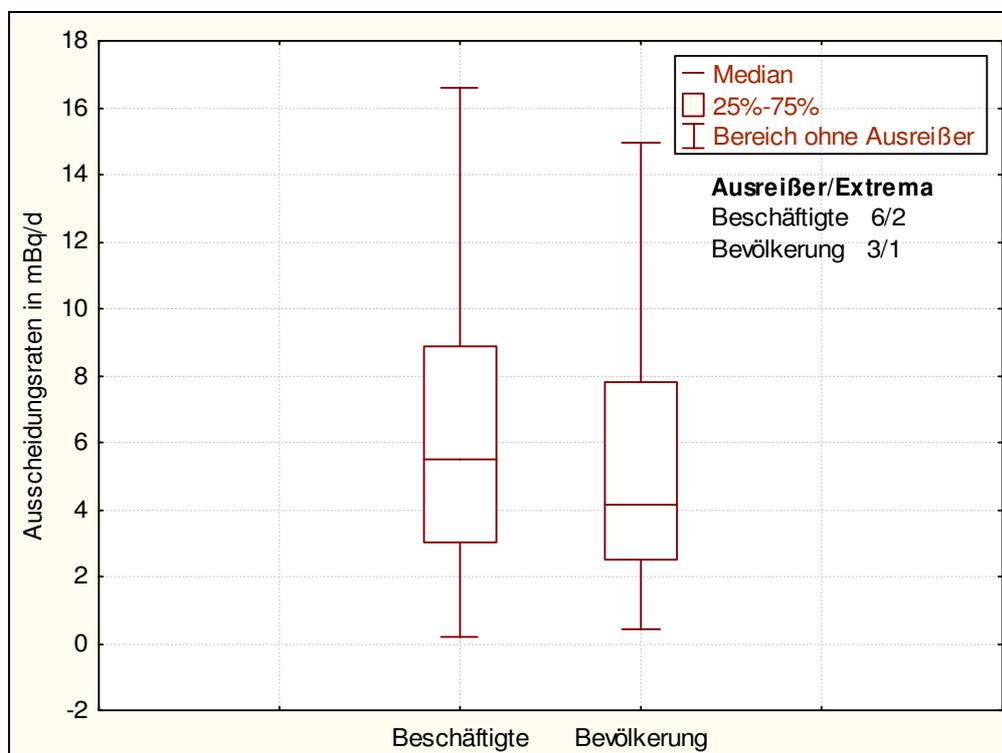


Abbildung 39: Ausscheidungsrate  $^{230}\text{Th}$  im Stuhl – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung

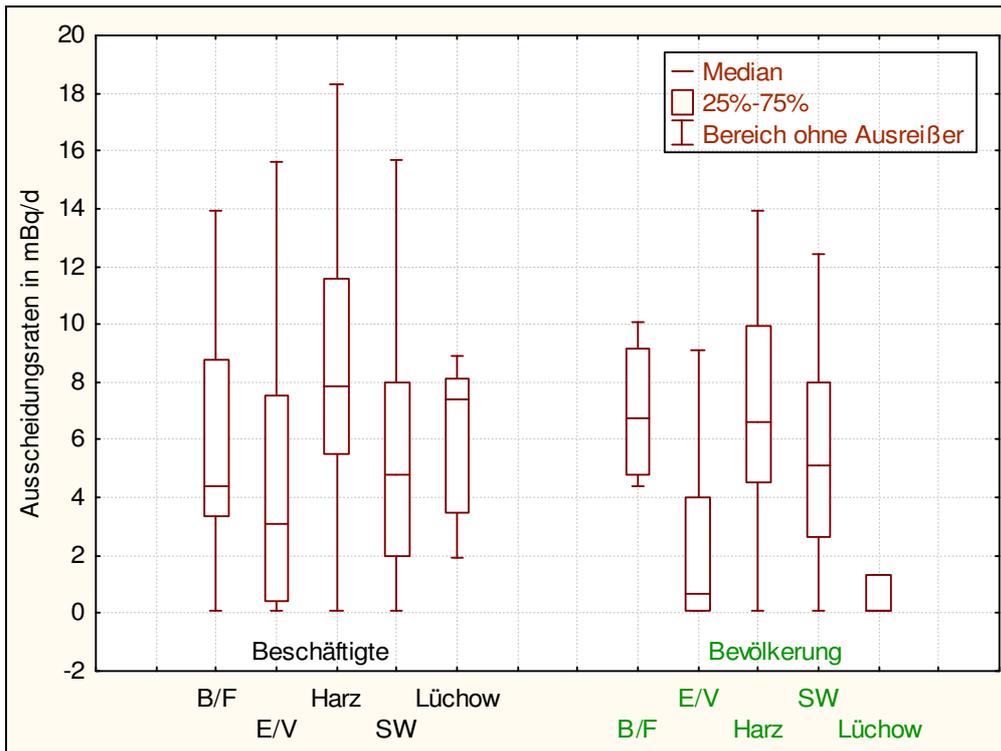


Abbildung 40: Ausscheidungsrate <sup>230</sup>Th im Stuhl – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

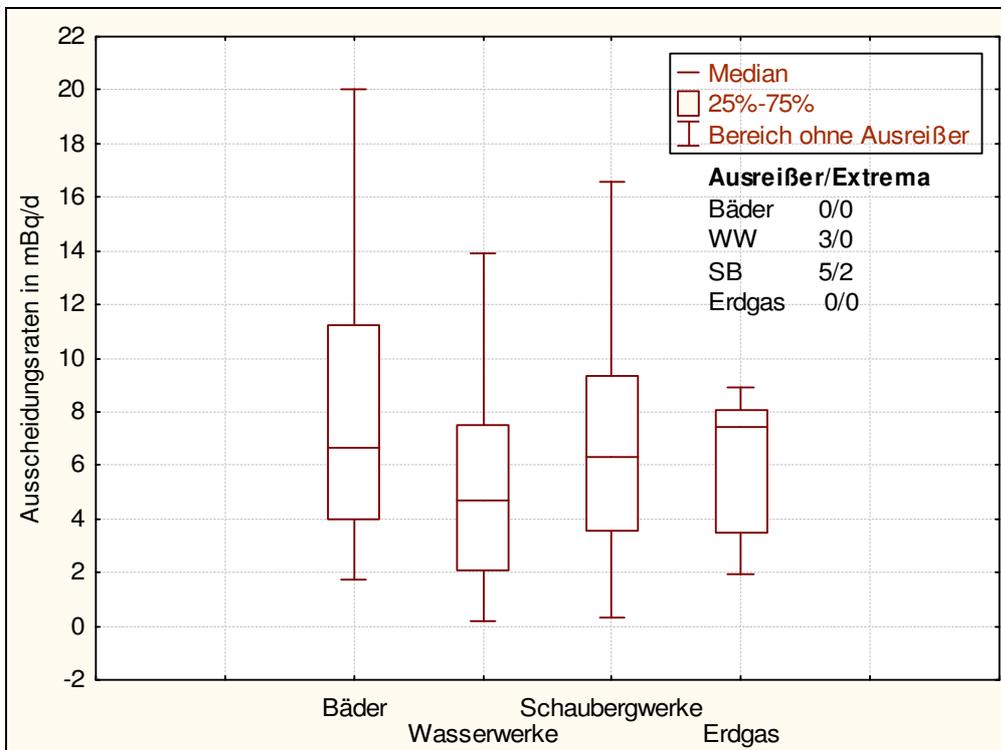


Abbildung 41: Ausscheidungsrate <sup>230</sup>Th im Stuhl – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern

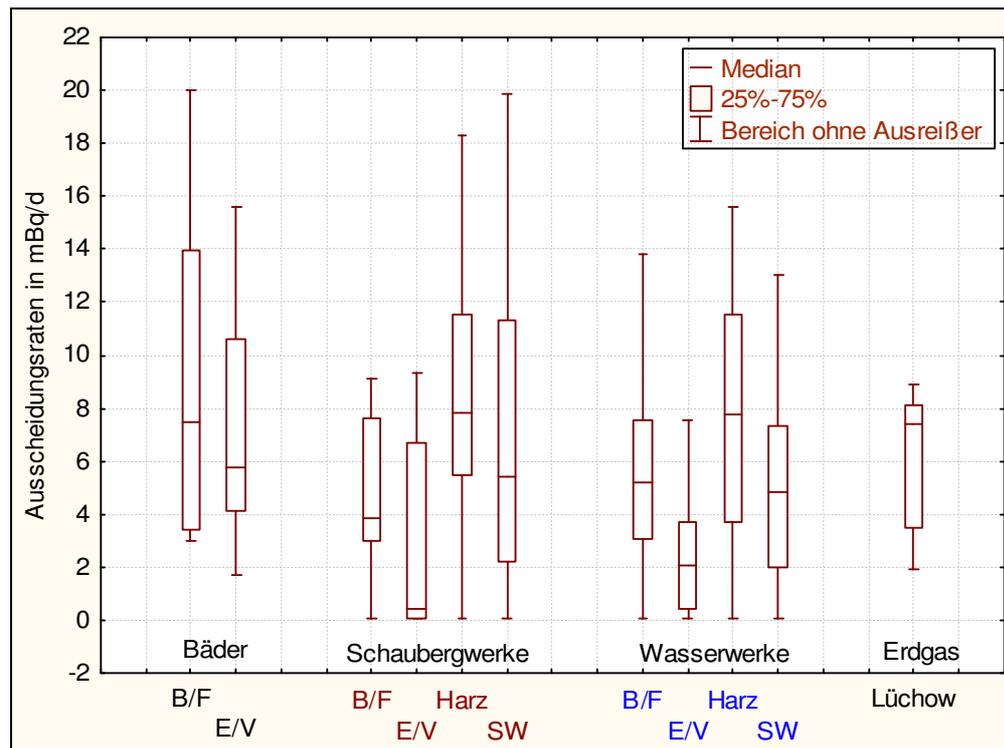


Abbildung 42: Ausscheidungsraten  $^{230}\text{Th}$  im Stuhl –Arbeitsfelder nach Regionen

Aus Abbildung 39 geht hervor, dass Medianwert und Streubereich für die Beschäftigten höher sind als für die Bevölkerung. In der regionalen Verteilung zeigt Abbildung 40, dass dies nur für Erzgebirge/Vogtland, für den Harz und für das Wendland zutrifft.

Bei dem Vergleich der Arbeitsfelder (Abbildung 41) sind Unterschiede in den Medianwerte, den Quartilen und Streubereichen festzustellen. Es dominiert der Medianwert der Erdgasverarbeitung, gefolgt von dem der Bäder, wo aber wiederum der Streubereich am größten ist. Den niedrigsten Medianwert weisen die Wasserwerke auf. Weitere Einzelheiten sind der Abbildung 42 zu entnehmen.

Interessant ist, dass die Abbildungen 40 und 42 hinsichtlich der regionalen Verteilung sowohl für die Bevölkerung als auch für Schaubergwerke und die Wasserwerke im Harz die höchsten Medianwerte aufweisen.

Tabelle 31: Ausscheidungsraten  $^{230}\text{Th}$  in Stuhl –Arbeitsfelder und Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate						
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/ Extrema	$\bar{m}$ [mBq/d]	Wertebereich Min Max [mBq/d] [mBq/d]		Median [mBq/d]	Unteres Quartil [mBq/d]
<b>Arbeitsfelder</b>									
Bäder	32	0/0	8,0	1,7	20	<b>6,6</b>	4,0	11	
Wasserwerke	72	1/1	5,3	0,2	20	<b>4,7</b>	2,1	7,5	
Schaubergwerke	75	3/1	7,8	0,3	34	<b>6,3</b>	3,6	9,3	
Erdgas	9	0/0	5,9	1,9	8,9	<b>7,4</b>	3,5	8,1	
<b>Regionen *</b>									
Bayern/Franken	41	1/0	6,7	1,2	21	<b>4,8</b>	3,4	8,8	
Erzgebirge/Vogtl.	99	1/3	4,9	0,4	29	<b>3,4</b>	2,5	6,4	
Harz	62	4/0	8,8	0,8	26	<b>7,7</b>	5,1	12	
Schwarzwald	65	4/0	7,0	1,0	34	<b>5,2</b>	3,2	8,1	
Wendland	18	0/2	4,9	0,7	13	<b>3,6</b>	2,5	7,5	

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 32: Ausscheidungsraten  $^{230}\text{Th}$  im Stuhl – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate							
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/ Extrema	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
					[mBq/d]	Min	Max	[mBq/d]	Quartil	Quartil
<b>Bevölkerung</b>										
Bayern/Franken	4	0/0	7,0	4,4	10	<b>6,7</b>	4,8	9,2		
Erzgebirge/Vogtl.	39	1/1	2,8	2,5	17	<b>2,7</b>	<2,5	4,0		
Harz	26	3/0	8,8	2,8	26	<b>6,7</b>	4,5	9,9		
Schwarzwald	20	2/0	6,5	1,9	22	<b>5,1</b>	2,7	8,0		
Wendland	9	0/2	2,5	1,0	13	<b>&lt;2,0</b>	<1,5	1,3		
<b>Bäder</b>										
Bayern/Franken	11	0/0	8,9	3,0	20	<b>7,5</b>	3,4	14		
Erzgebirge/Vogtl.	21	0/0	7,5	1,7	16	<b>5,8</b>	4,1	11		
<b>Schaubergwerke</b>										
Bayern/Franken	10	1/0	5,8	2,5	21	<b>3,8</b>	3,0	7,6		
Erzgebirge/Vogtl.	17	0/1	4,2	2,0	29	<b>2,5</b>	<1,5	6,7		
Harz	31	1/0	8,9	1,9	23	<b>7,9</b>	5,5	12		
Schwarzwald	18	1/0	8,4	2,2	34	<b>5,4</b>	2,2	11		
<b>Wasserwerke</b>										
Bayern/Franken	16	0/0	5,4	2,6	14	<b>5,2</b>	3,1	7,6		
Erzgebirge/Vogtl.	22	0/1	3,1	2,0	20	<b>2,5</b>	2,1	3,7		
Harz	7	0/0	7,7	1,8	16	<b>7,8</b>	3,7	12		
Schwarzwald	26	1/0	5,1	2,1	16	<b>4,8</b>	2,3	7,3		
<b>Erdgas</b>										
Wendland	9	0/0	5,9	1,9	8,9	<b>7,4</b>	3,5	8,1		

### 4.2.2.2 <sup>226</sup>Ra im Stuhl

Tabelle 33: Ausscheidungsrate <sup>226</sup>Ra im Stuhl

	Anteil der Messwerte < g* [%]	Ausscheidungsrate					
		$\bar{m}$ [mBq/d]	Wertebereich		Median [mBq/d]	Unteres Quartil [mBq/d]	Oberes Quartil [mBq/d]
			Min [mBq/d]	Max [mBq/d]			
Gesamtwerte	30,4	54	2,4	443 (1053)*	32	<4,9	69
Beschäftigte	27,7	59	2,9	443 (1053)*	37	<5,1	72
Bevölkerung	39,2	43	2,4	375	21	<4,6	60

g\* =NWG= 5,0 mBq/d (4,9 g AM)

\* Ein nicht reproduzierter Einzelwert von 1053 mBq/d wird für die weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt (siehe Abbildung 43).

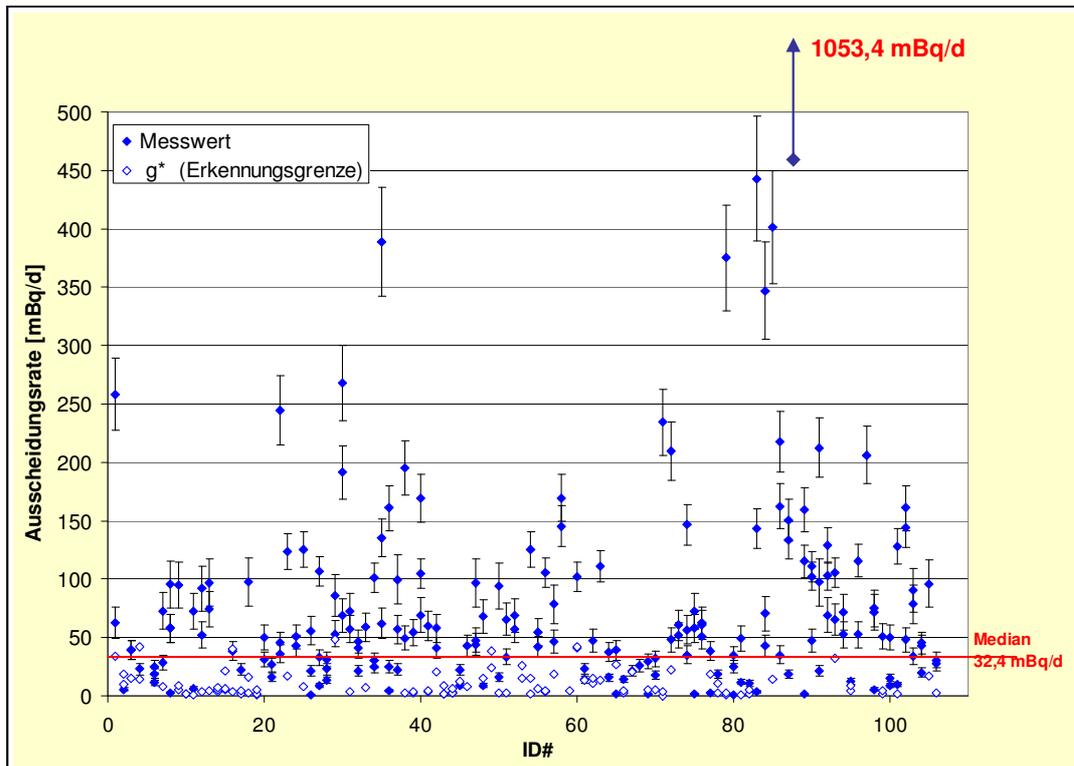


Abbildung 43: Ausscheidungsrate <sup>226</sup>Ra im Stuhl - alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)

Tabelle 33 und Abbildung 43 zeigen für <sup>226</sup>Ra im Stuhl einen Wertebereich von < 1,0 mBq/d bis 443 mBq/d. Über 30 % der Messwerte sind kleiner als die Nachweisgrenze. Oberhalb des oberen Quartils (68,9 mBq/d) befinden sich zahlreiche Messwerte, die nicht als Ausreißer gewertet werden können, ein Einzelwert von 1053,4 mBq wurde jedoch nicht in die weiteren Berechnung einbezogen.

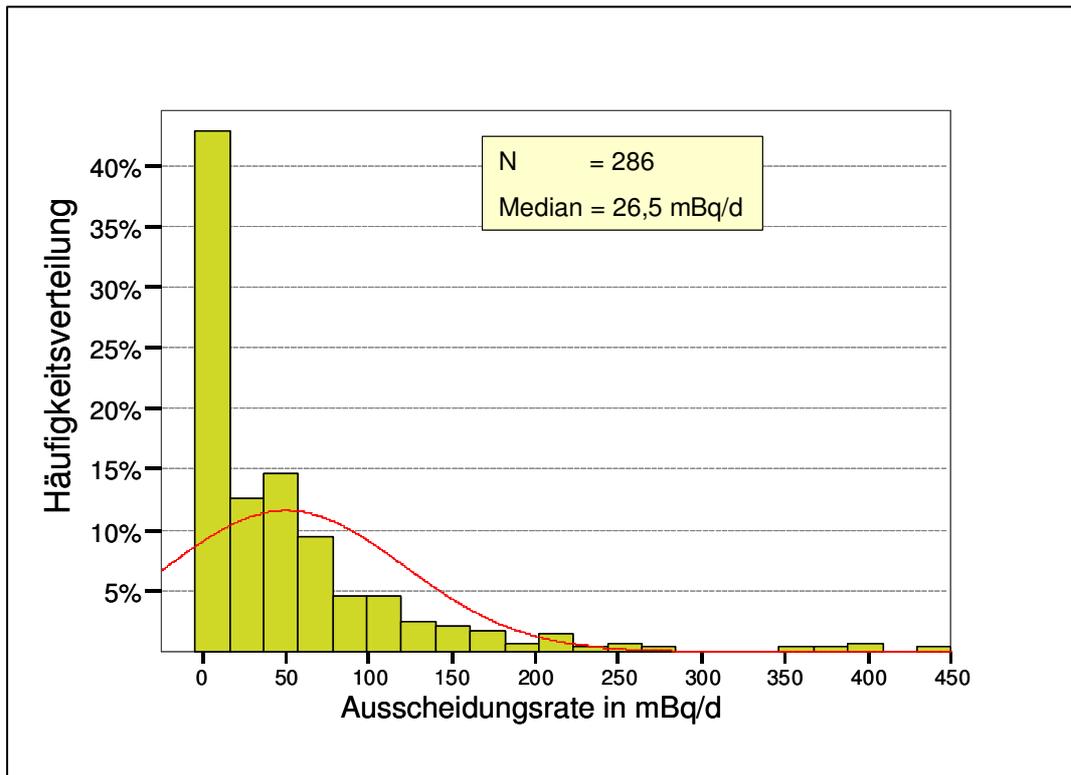


Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten  $^{226}\text{Ra}$  im Stuhl

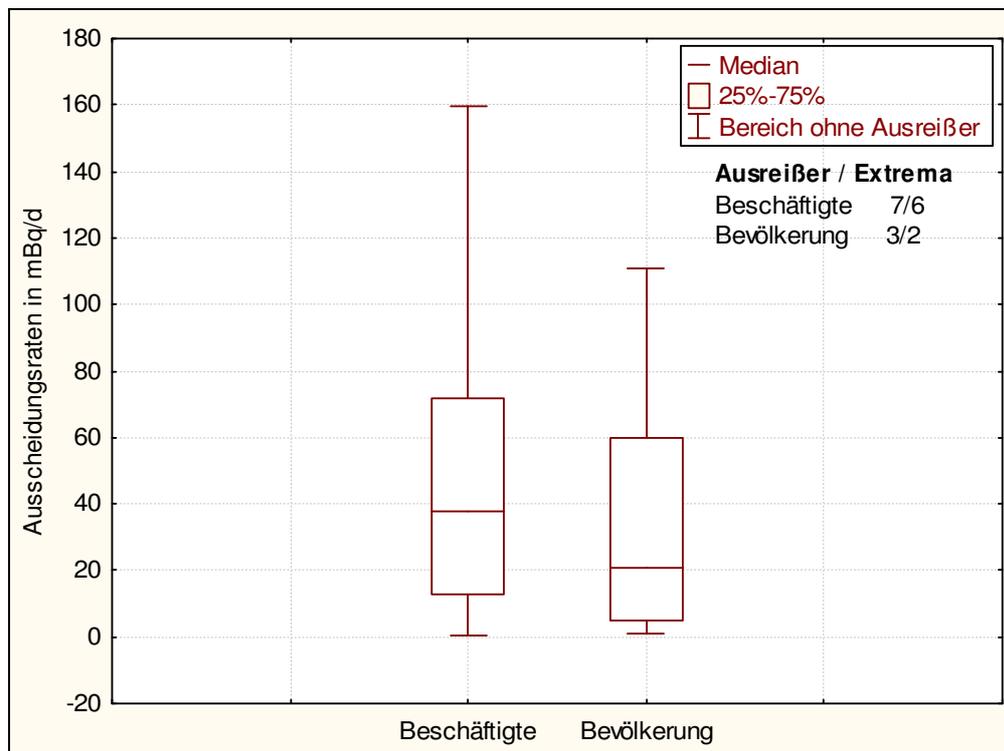


Abbildung 45: Ausscheidungsrate  $^{226}\text{Ra}$  im Stuhl – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung

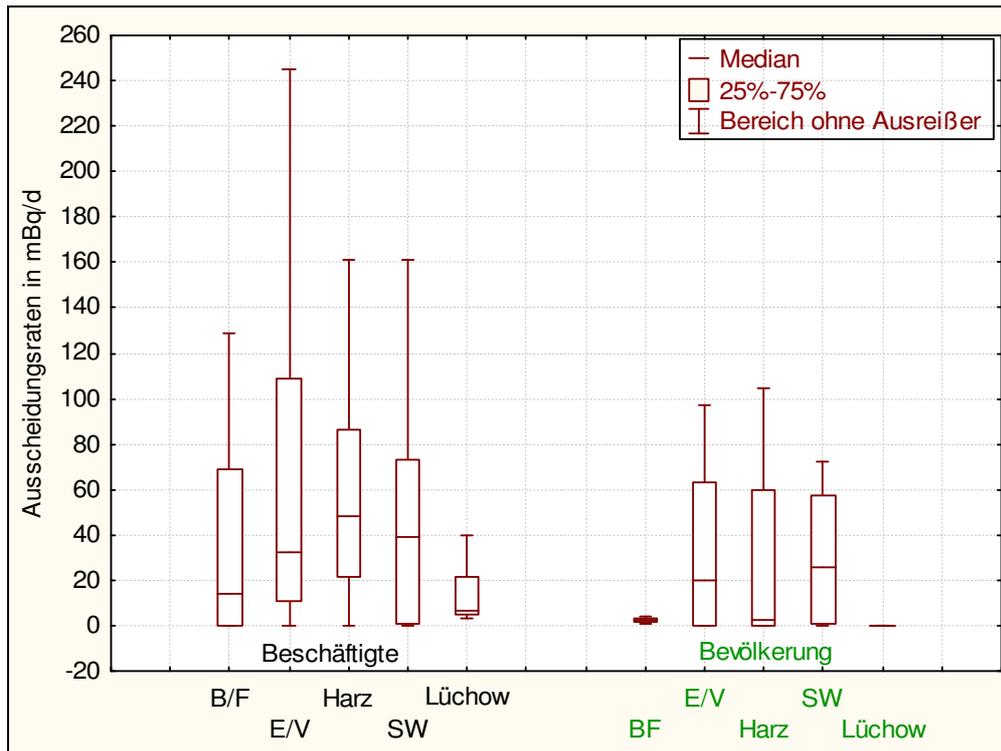


Abbildung 46: Ausscheidungsraten <sup>226</sup>Ra in Stuhl – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

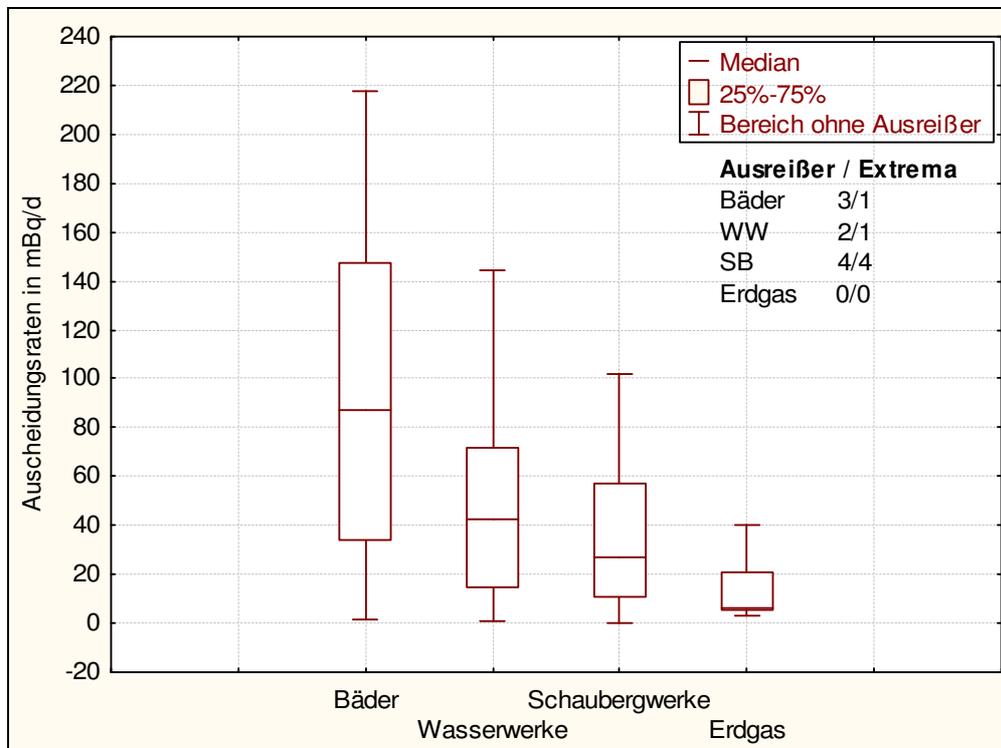


Abbildung 47: Ausscheidungsraten <sup>226</sup>Ra im Stuhl- alle Beschäftigten nach Arbeitsfelder

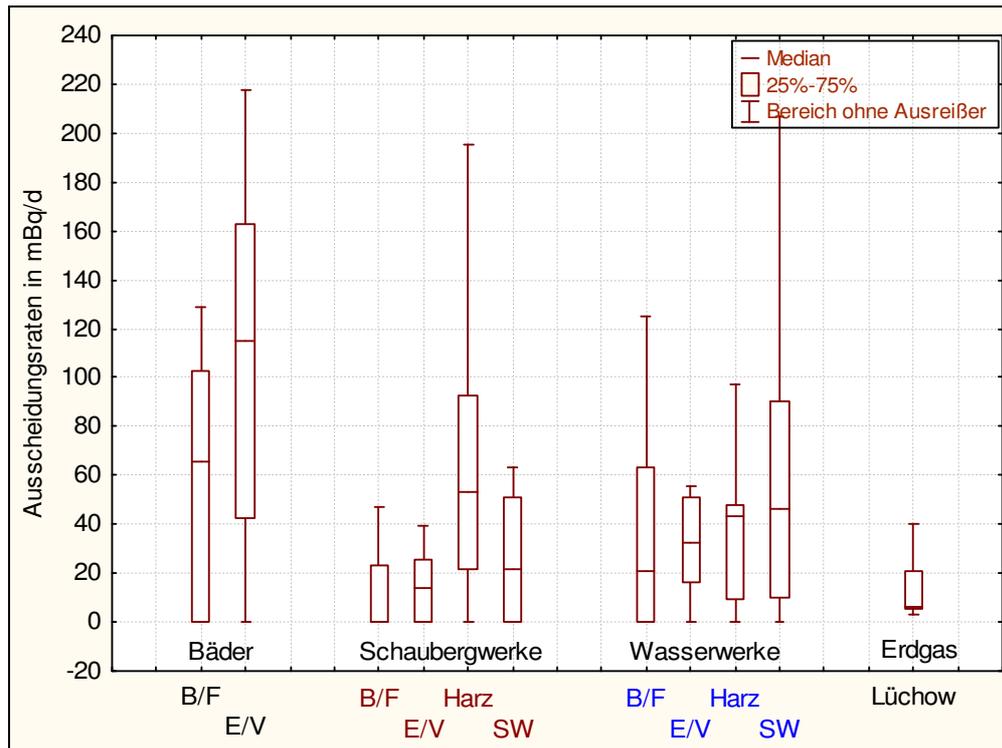


Abbildung 48: Ausscheidungsrate  $^{226}\text{Ra}$  im Stuhl- Arbeitsfelder nach Regionen

Aus Abbildung 45 geht hervor, dass Medianwert und Streubereich für die Beschäftigten höher sind als für die Bevölkerung. Dieses gilt auch für alle Regionen. (Abbildung 46).

Bei dem Vergleich der Arbeitsfelder (Abbildung 47) sind Unterschiede in den Medianwerte, den Quartilen und Streubereichen festzustellen. Der Medianwert in den Bädern ist erheblich höher als in den übrigen Arbeitsfeldern, wobei die Wasserwerke sich deutlich von den Schaubergwerken und diese wiederum von der Erdgasverarbeitung unterscheiden.

Die regionale Aufteilung der Arbeitsfelder in Abbildung 48 bestätigt die hohen Medianwerte und Streubereiche der Beschäftigten aus den Bädern.

In der Region Lüchow/Wendland liegen die die Medianwerte für  $^{226}\text{Ra}$  im Stuhl sowohl bei der Bevölkerung als auch bei den Beschäftigten in der Erdgasverarbeitung um etwa eine Größenordnung niedriger als in den anderen Untersuchungsregionen.

Tabelle 34: Ausscheidungsraten  $^{226}\text{Ra}$  im Stuhl - alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate					
	Zahl der	Zahl der	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	gültigen	Ausreißer/		Min	Max		Quartil	Quartil
	Proben	Extrema	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Arbeitsfelder</b>								
Bäder	32	1,0	109	5,1	443(1053)	<b>72</b>	33	144
Wasserwerke	72	0/1	51	5,0	245	<b>42</b>	15	72
Schaubergwerke	75	1,0	51	5,0	389	<b>27</b>	<5,0	57
Erdgas	9	1/0	15	2,4	40	<b>6,5</b>	<2,4	<5,0
<b>Regionen *</b>								
Bayern/Franken	41	0/0	51	5,0	170	<b>42</b>	<5,0	72
Erzgebirge/Vogtl.	99	2,0	60	5,1	443(1053)	<b>31</b>	14	73
Harz	62	0/1	56	5,0	389	<b>41</b>	<5,0	69
Schwarzwald	65	1,0	54	5,0	375	<b>35</b>	<5,0	62
Wendland	18	1,0	16	2,2	98	<b>5,3</b>	<5,0	<5,0

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 35: Ausscheidungsraten <sup>226</sup>Ra in Stuhl – Bevölkerung und Arbeitsfelder nach Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate					
	Zahl der	Zahl der	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	gültigen	Ausreißer/		Min	Max		Quartil	Quartil
	Proben	Extrema	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Bevölkerung</b>								
Bayern/Franken	4	0/0	2,5	1,8	4,0	<b>2,5</b>	1,5	3,5
Erzgebirge/Vogtl.	39	3/0	41	3,9	258	<b>20</b>	5,0	63
Harz	26	0/1	31	1,9	169	<b>2,3</b>	<2,0	60
Schwarzwald	20	1/0	49	5,0	375	<b>25</b>	5,0	57
Wendland	9	0/1	13	2,0	98	<b>&lt;2,5</b>	<2,0	<5,0
<b>Bäder</b>								
Bayern/Franken	11	0/0	55	4,8	129	<b>65</b>	<5,0	103
Erzgebirge/Vogtl.	20	2/1	135	3,9	443(1053)	<b>113</b>	39	161
<b>Schaubergwerke</b>								
Bayern/Franken	10	0/0	19	5,0	102	<b>&lt;5,0</b>	<5,0	23
Erzgebirge/Vogtl.	17	1/1	14	2,9	39	<b>14</b>	<5,0	26
Harz	31	0/0	74	4,3	389	<b>54</b>	22	93
Schwarzwald	18	0/0	45	3,6	235	<b>22</b>	<5,0	51
<b>Wasserwerke</b>								
Bayern/Franken	16	0/0	36	4,2	125	<b>21</b>	<5,0	63
Erzgebirge/Vogtl.	22	0/0	49	5,0	245	<b>32</b>	16	51
Harz	7	0/0	40	2,9	97	<b>43</b>	9,0	48
Schwarzwald	26	0/1	59	3,1	207	<b>47</b>	9,8	90
<b>Erdgas</b>								
Wendland	9	1/0	15	1,6	40	<b>6,5</b>	5,2	21

### 4.2.2.2.3 <sup>210</sup>Pb im Stuhl

Tabelle 36: Ausscheidungsraten <sup>210</sup>Pb im Stuhl

	Anteil der	Ausscheidungsrate					
	Messwerte	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	< g*		Min	Max		Quartil	Quartil
	[%]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
Gesamtwerte	0,0	46	0,5	395	<b>34</b>	21	56
Beschäftigte	0,0	51	1,1	395	<b>40</b>	23	62
Bevölkerung	0,0	36	0,5	160	<b>30</b>	17	45

g\* = NWG = 2,5 mBq/d (4,9 g AM)

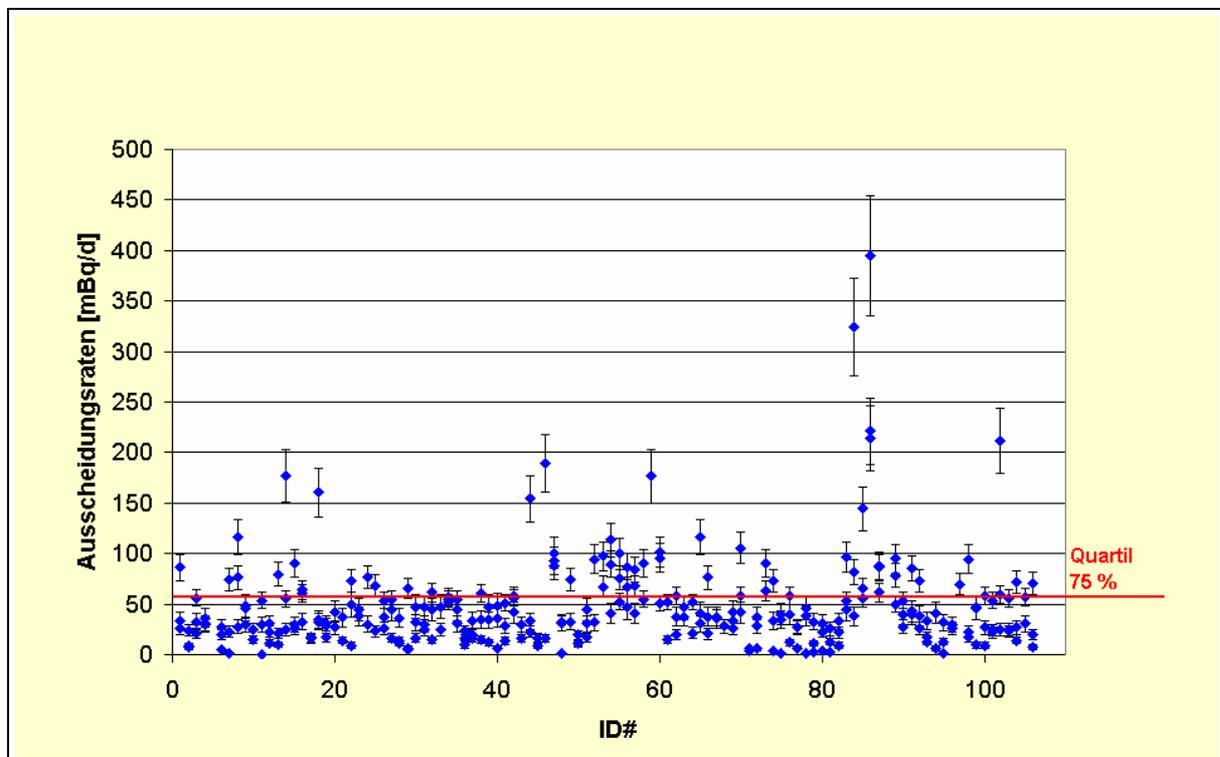


Abbildung 49: Ausscheidungsrate <sup>210</sup>Pb im Stuhl – alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)

Bei Werten bis zu 395 mBq/d ist das obere Quartil mit 56 mBq/d immer noch recht niedrig. Alle Messwerte liegen oberhalb der Nachweisgrenze. Mit wenigen Ausnahmen sind alle Werte oberhalb 100 mBq/d Einzelwerte.

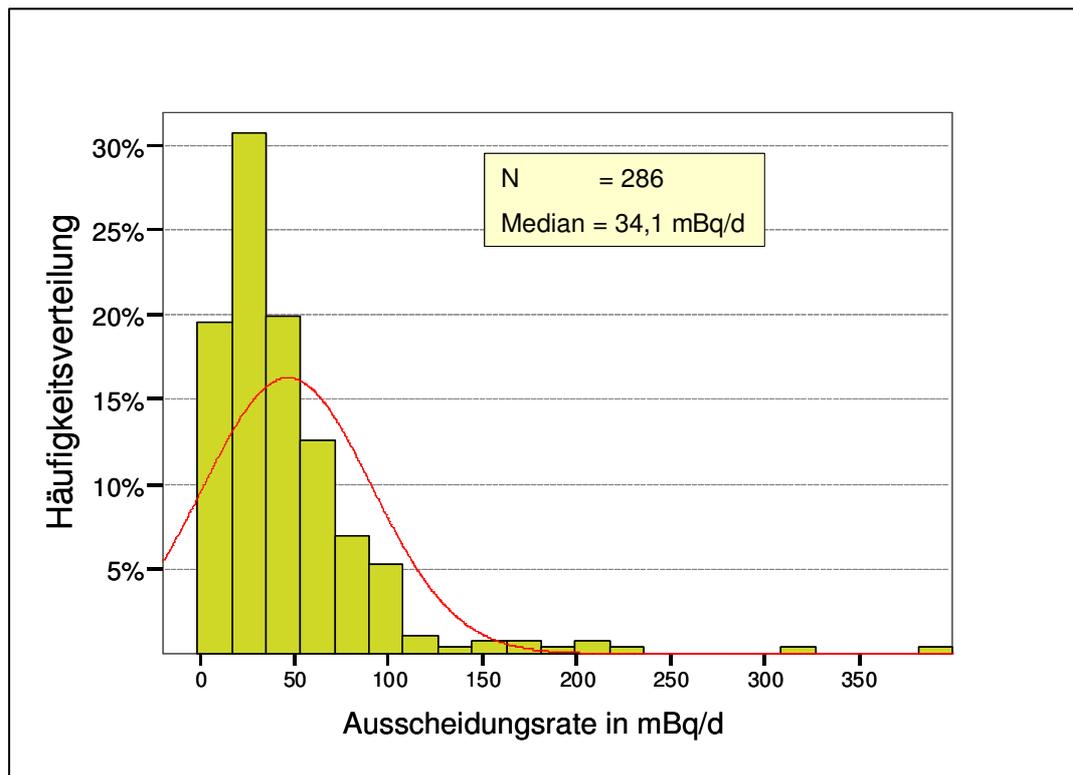


Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  im Stuhl

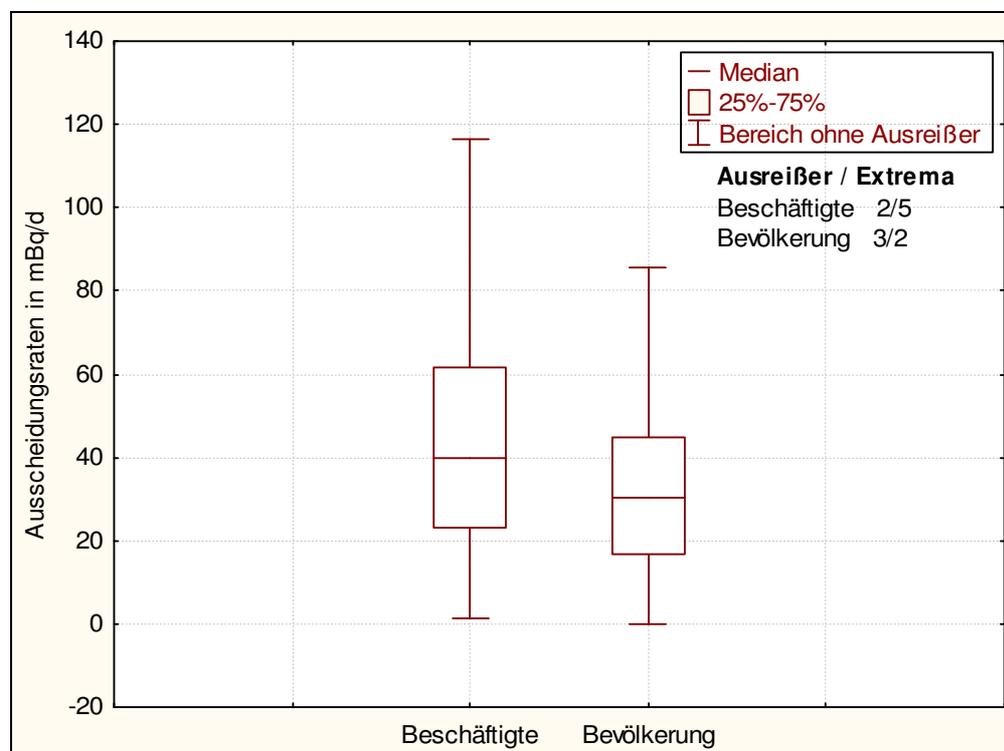


Abbildung 51: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Pb}$  im Stuhl- alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung

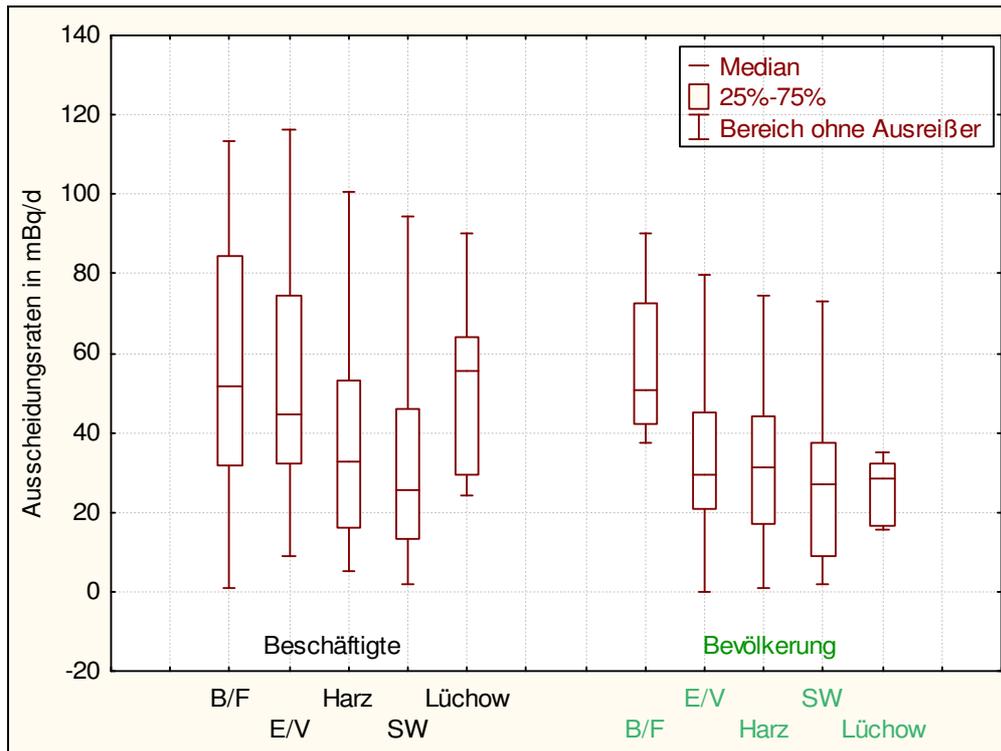


Abbildung 52: Ausscheidungsrate<sup>210</sup>Pb im Stuhl- Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

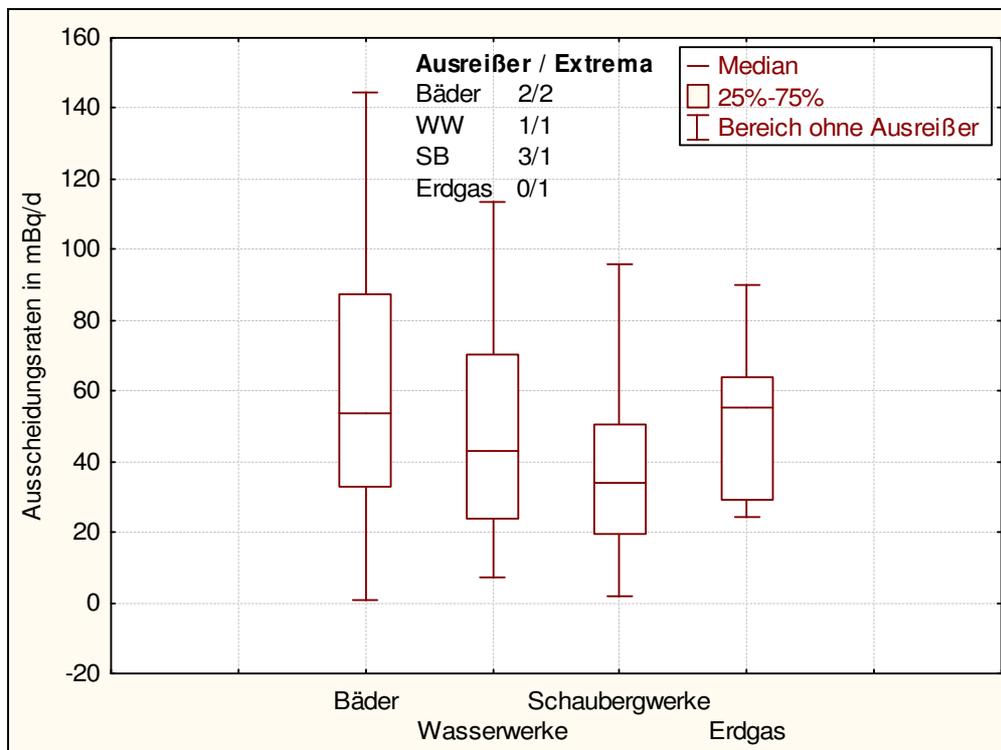


Abbildung 53: Ausscheidungsrate<sup>210</sup>Pb im Stuhl- alle Beschäftigte nach Arbeitsfeldern

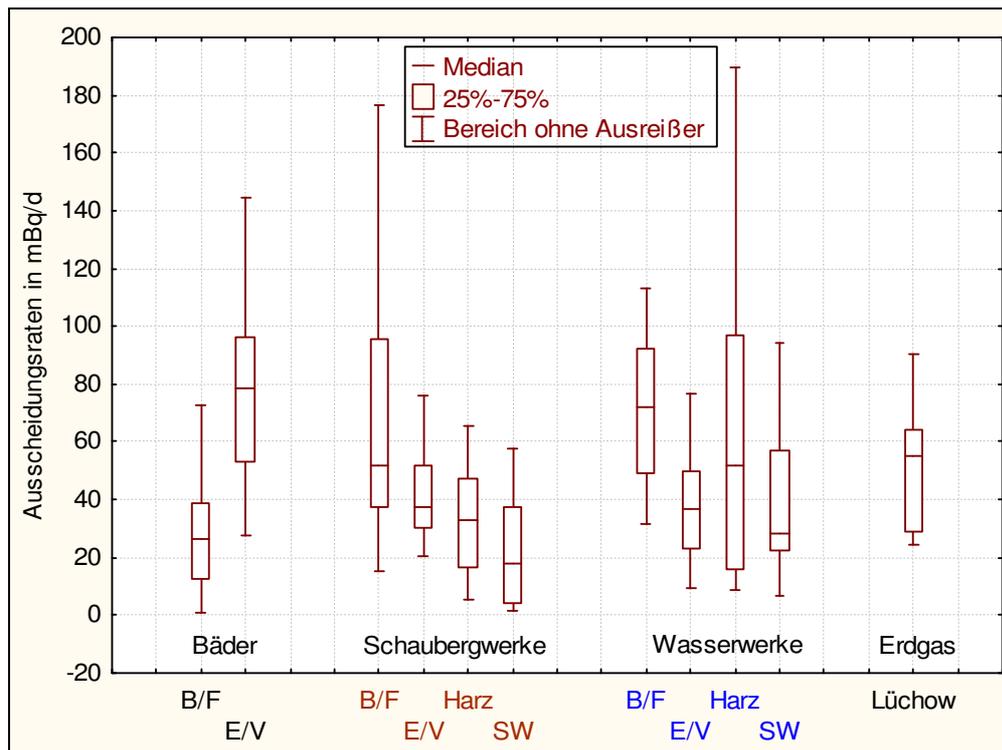


Abbildung 54: Ausscheidungsrate  $^{210}\text{Pb}$  im Stuhl- Arbeitsfelder nach Regionen

Aus Abbildung 51 geht hervor, dass Medianwert und Streubereich für die Beschäftigten höher ist als für die Bevölkerung, wenngleich dies aus Abbildung 52 für die einzelnen Regionen nur im Fall des Wendland wirklich deutlich wird.

Bei dem Vergleich der Arbeitsfelder (Abbildung 53) sind Unterschiede in den Medianwerten, den Quartilen und Streubereichen festzustellen, aber schwächer ausgeprägt als bei anderen Nukliden. Nähere Einzelheiten über die regionale Verteilung können der Abbildung 54 entnommen werden. Auch hier zeigt sich der hohe Medianwert bei den Bädern im Erzgebirge/Vogtland.

Tabelle 37: Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  im Stuhl – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Ausscheidungsrate							
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/ Extrema	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
						Min	Max		Quartil	Quartil
					[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Arbeitsfelder</b>										
Bäder	32	1,0	82	1,5	395	<b>54</b>	33	87		
Wasserwerke	72	1,0	51	1,7	212	<b>43</b>	24	70		
Schaubergwerke	77	1,0	38	1,7	177	<b>34</b>	20	51		
Erdgas	9	1,0	62	24	177	<b>55</b>	29	64		
<b>Regionen *</b>										
Bayern/Franken	41	0/0	57	1,1	177	<b>52</b>	34	84		
Erzgebirge/Vogtl.	99	0,6	54	1,5	395	<b>38</b>	26	62		
Harz	62	1/0	39	1,1	190	<b>32</b>	16	48		
Schwarzwald	65	1,0	33	1,7	212	<b>27</b>	11	46		
Wendland	18	0,5	51	16	177	<b>32</b>	24	61		

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 38: Ausscheidungsraten  $^{210}\text{Pb}$  in Stuhl – Bevölkerung und Arbeitsfelder in den Untersuchungsregionen

	<b>N<sub>1</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ausscheidungsrate</b>					
	<b>Zahl der</b>	<b>Zahl der</b>	<b>m</b>	<b>Wertebereich</b>		<b>Median</b>	<b>Unteres</b>	<b>Oberes</b>
	<b>gültigen</b>	<b>Ausreißer/</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>		<b>Quartil</b>	<b>Quartil</b>
	<b>Proben</b>	<b>Extrema</b>	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
<b>Bevölkerung</b>								
Bayern/Franken	4	0/0	57	38	90	<b>51</b>	42	73
Erzgebirge/Vogtl.	39	0/2	36	1,5	116	<b>29</b>	21	45
Harz	26	1/0	36	1,1	154	<b>31</b>	17	44
Schwarzwald	20	1/0	30	1,7	90	<b>27</b>	9,2	38
Wendland	9	0/1	39	16	160	<b>28</b>	17	32
<b>Bäder</b>								
Bayern/Franken	11	0/0	27	1,1	73	<b>26</b>	13	39
Erzgebirge/Vogtl.	21	2/2	110	28	395	<b>78</b>	53	96
<b>Schaubergwerke</b>								
Bayern/Franken	10	0/0	66	15	177	<b>52</b>	38	96
Erzgebirge/Vogtl.	17	1/1	47	21	117	<b>37</b>	31	52
Harz	31	0/0	34	5,2	66	<b>33</b>	16	47
Schwarzwald	18	0/0	21	1,7	58	<b>18</b>	4	38
<b>Wasserwerke</b>								
Bayern/Franken	16	0/0	72	32	113	<b>72</b>	50	92
Erzgebirge/Vogtl.	22	0/0	38	9,2	77	<b>37</b>	23	50
Harz	7	0/0	66	8,6	190	<b>52</b>	16	97
Schwarzwald	26	0/1	45	7,1	212	<b>28</b>	23	57
<b>Erdgas</b>								
Wendland	9	1/1	62	24	177	<b>55</b>	29	64

### 4.2.2.3 Spezifische Aktivität von <sup>226</sup>Ra und <sup>210</sup>Pb im Haar

#### 4.2.2.3.1 <sup>226</sup>Ra im Haar

Tabelle 39: Spezifische Aktivität <sup>226</sup>Ra im Haar

	Anteil der	a <sub>i</sub>					
	Messwerte	$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
	< g*		Min	Max		Quartil	Quartil
	[%]	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
Gesamtwerte	49,2	4,8	0,8	67	<1,0	<1,0	5,9
Beschäftigte	50,0	4,5	1,0	67	<1,0	<1,0	4,4
Bevölkerung	47,4	5,5	0,8	48	<1,0	<1,0	8,4

g\* = NWG = 1,0 mBq/g

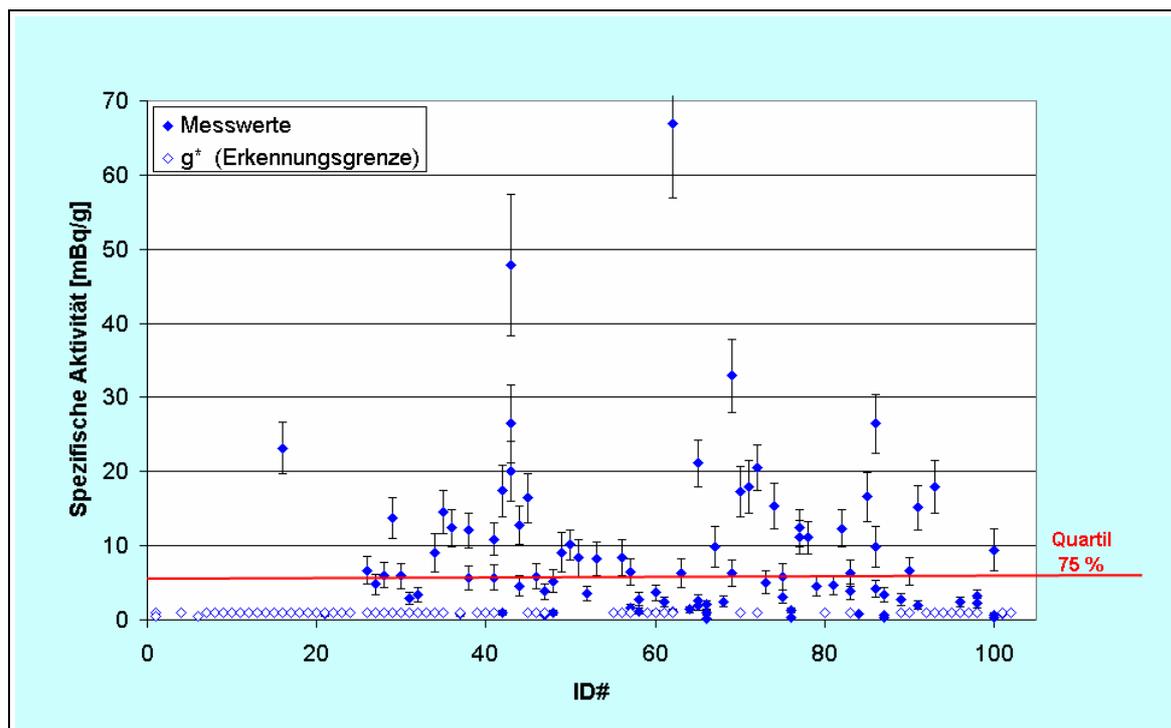


Abbildung 55: Spezifische Aktivität von <sup>226</sup>Ra im Haar - alle Werte mit einfacher Standardabweichung (s)

Tabelle 39 und Abbildung 55 zeigen für <sup>226</sup>Ra im Haar einen Wertebereich von < 1,0 mBq/g bis 66,9 mBq/g. Etwa 50 % der Messwerte sind kleiner als die Nachweisgrenze, insgesamt liegen 75 % der Werte unter 6 mBq/g. Die höheren Werte sind Einzelwerte und nur bei drei Probanden lassen sich Werte oberhalb des oberen Quartils durch eine zweite oder dritte Probenahme bestätigen.

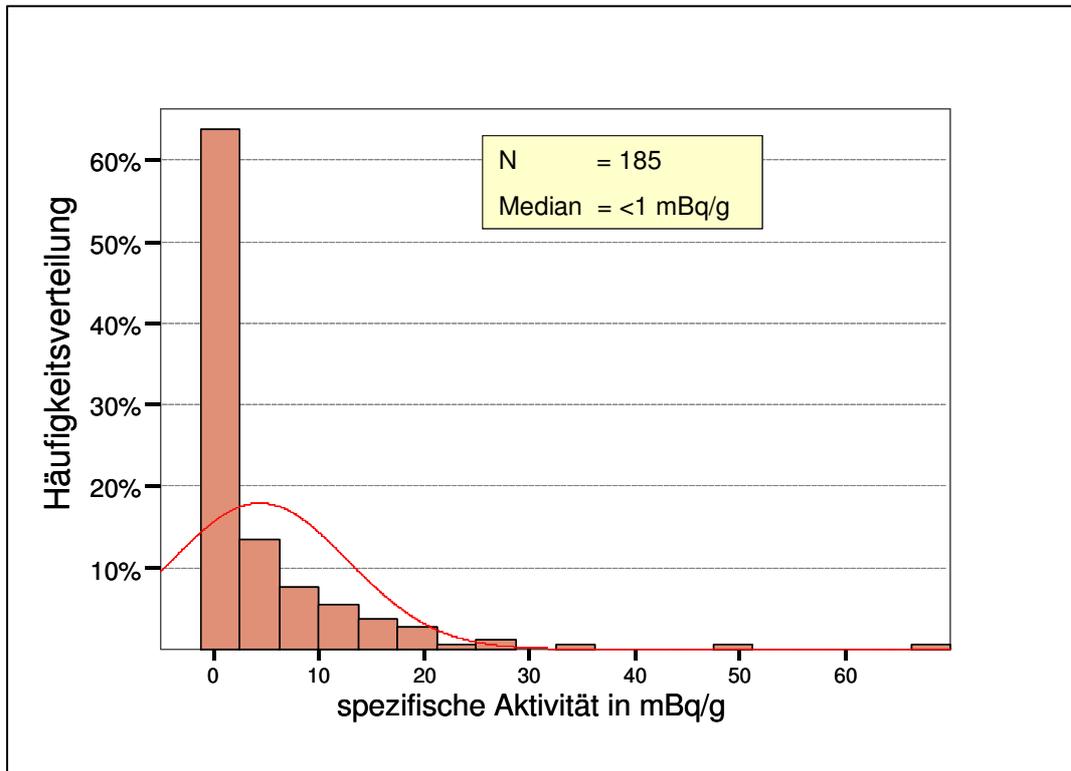


Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Aktivität <sup>226</sup>Ra im Haar

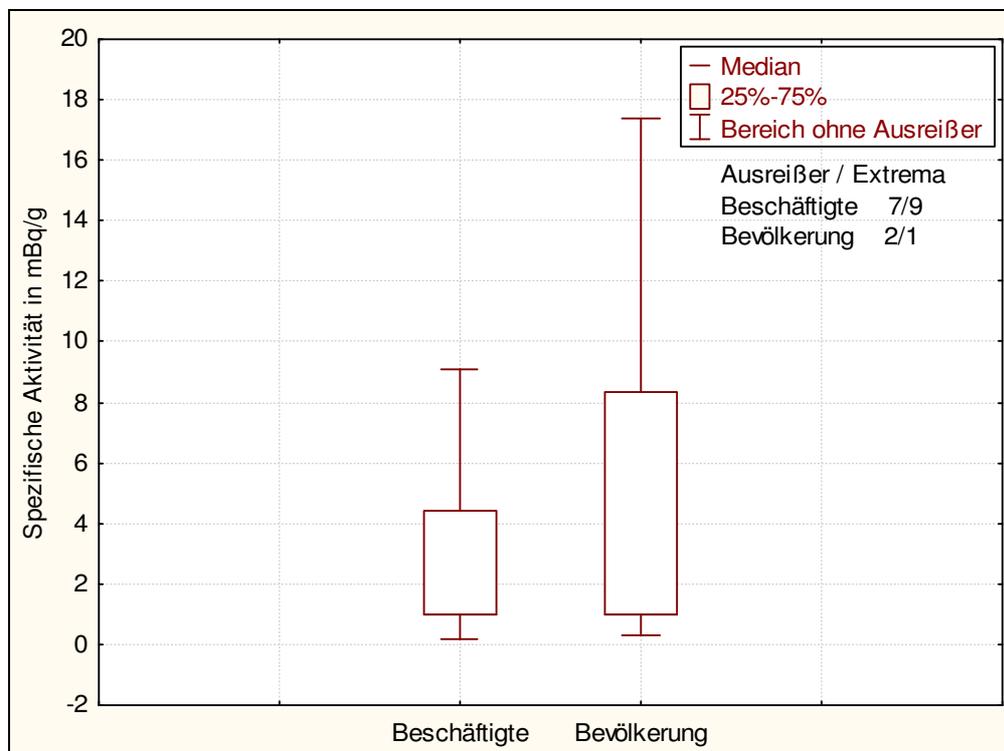


Abbildung 57: Spezifische Aktivität <sup>226</sup>Ra im Haar- alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung

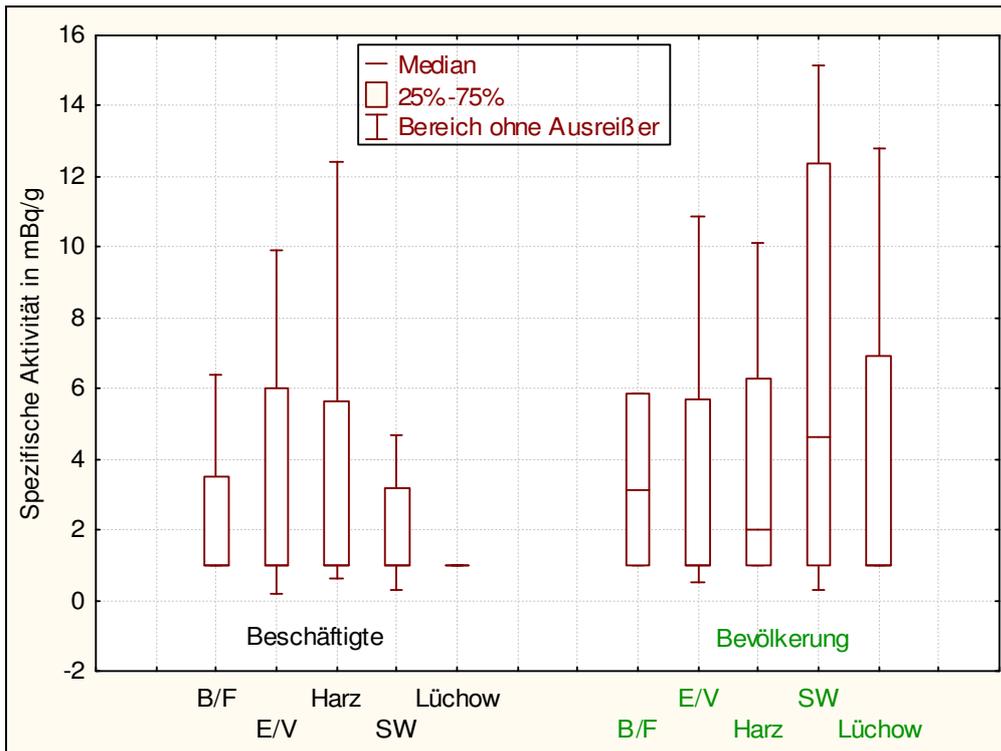


Abbildung 58: Spezifische Aktivität  $^{226}\text{Ra}$  im Haar- Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

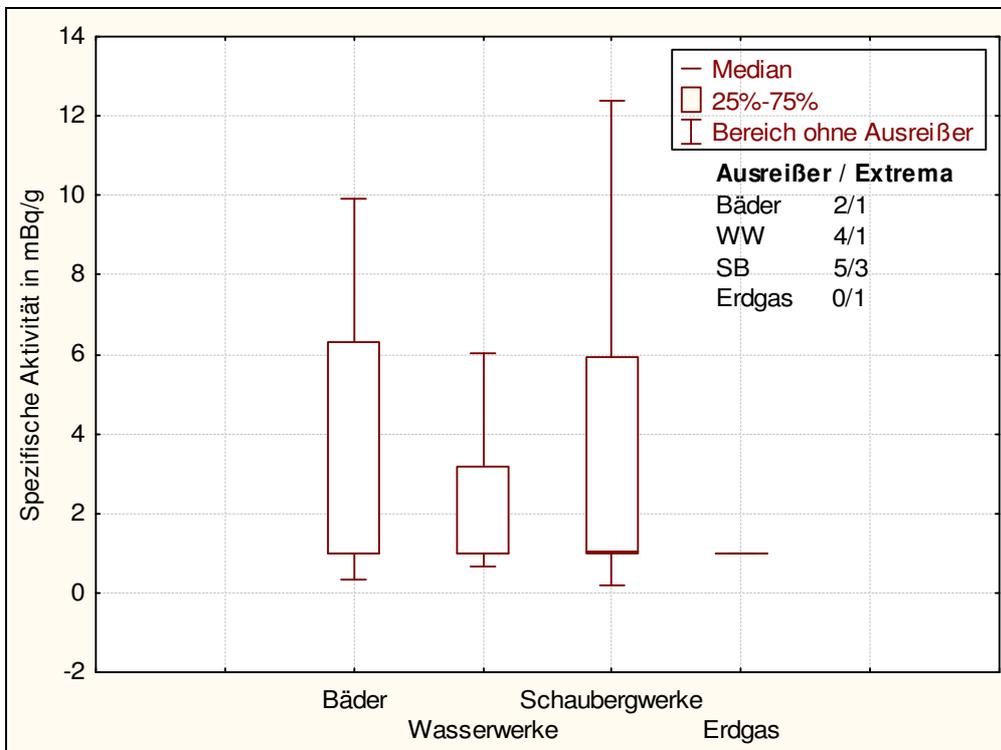


Abbildung 59: Spezifische Aktivität  $^{226}\text{Ra}$  im Haar- alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern

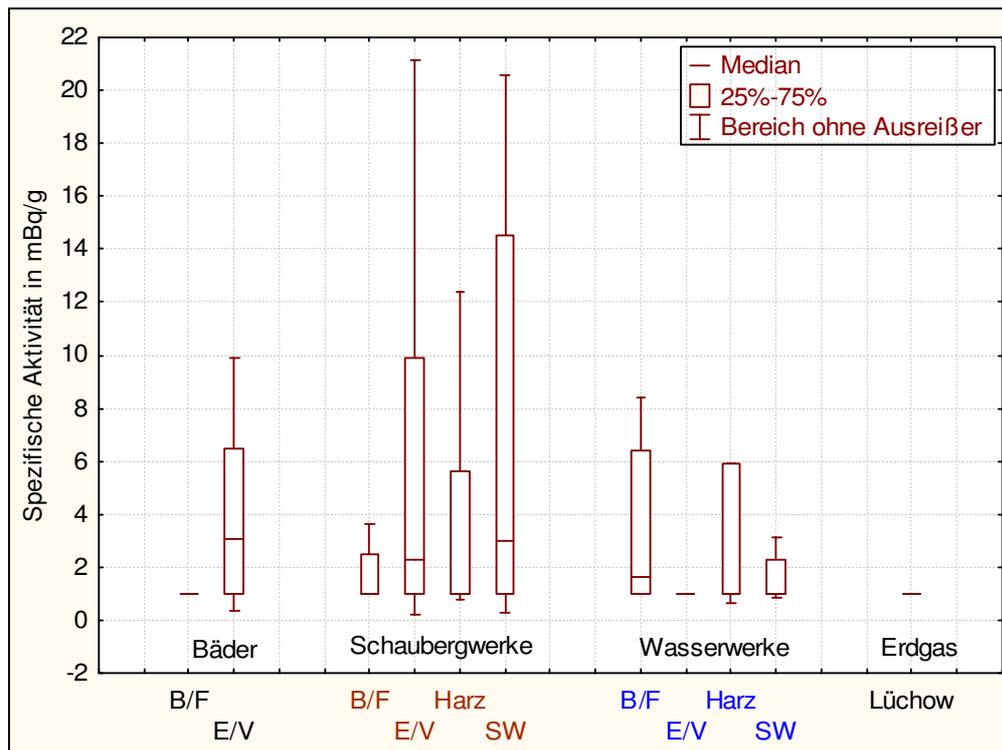


Abbildung 60: Spezifische Aktivität  $^{226}\text{Ra}$  im Haar- Arbeitsfelder nach Regionen

Unterschiede zwischen den Ergebnissen für Beschäftigte und Personen der Bevölkerung lassen sich aus Abbildung 57 erkennen. Allerdings sind im Gegensatz zu anderen Ergebnissen dieser Studie 75 % der Werte für Beschäftigte < 4 mBq/g Haar, für Personen der Bevölkerung ist diese Schwelle bei < 8 mBq/g zu finden.

Die Medianwerte sind in den meisten Box Plots nicht zu erkennen, da sie kleiner als die methodische Nachweisgrenze sind. Obgleich für Beschäftigte auch der Mittelwert kleiner als für Personen der Bevölkerung ist, zeigen die Box Plots deutlich, dass es bei Beschäftigten eine erhöhte Zahl an Ausreißern und Extremwerten gibt.

Tabelle 40: Spezifische Aktivität <sup>226</sup>Ra im Haar – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	a <sub>i</sub>						
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/Extrema	$\bar{m}$ [mBq/g]	Wertebereich Min Max [mBq/g] [mBq/g]		Median [mBq/g]	Unteres Quartil [mBq/g]
<b>Arbeitsfelder</b>									
Bäder	23	2/1	4,8	1,0	26	<1,7	<1,5	6,0	
Wasserwerke	42	4/1	2,5	1,0	16	<1,6	<1,5	3,2	
Schaubergwerke	58	5/3	5,8	0,8	67	<1,8	<1,0	5,9	
Erdgas	5	0/1	5,4	0,9	23	<1,8	<1,0	<1,9	
<b>Regionen *</b>									
Bayern/Franken	29	2/2	5,0	1,0	67	<1,7	<1,5	3,5	
Erzgebirge/Vogtl.	68	3/4	5,3	0,9	48	<1,0	<1,0	5,9	
Harz	51	4/0	4,0	0,8	16	<1,1	<1,0	5,9	
Schwarzwald	28	0/0	5,1	0,8	21	<1,2	<1,0	<1,0	
Wendland	9	0/2	4,8	1,0	23	<1,8	<1,2	<1,5	

\* Beschäftigte und Bevölkerung

### 4.2.2.3.2 $^{210}\text{Pb}$ im Haar

Tabelle 41: Spezifische Aktivität  $^{210}\text{Pb}$  im Haar

	Anteil der Messwerte < $g^*$ [%]	$a_i$					
		$\bar{m}$	Wertebereich		Median	Unteres	Oberes
		[mBq/g]	Min [mBq/g]	Max [mBq/g]	[mBq/g]	Quartil [mBq/g]	Quartil [mBq/g]
Gesamtwerte	0,0	12	0,7	245	<b>5,8</b>	2,7	11
Beschäftigte	0,0	15	0,8	245	<b>7,2</b>	4,2	14
Bevölkerung	0,0	5,2	0,7	40	<b>3,2</b>	1,9	5,7

$g^* = \text{NWG} = 0,5 \text{ mBq/g}$

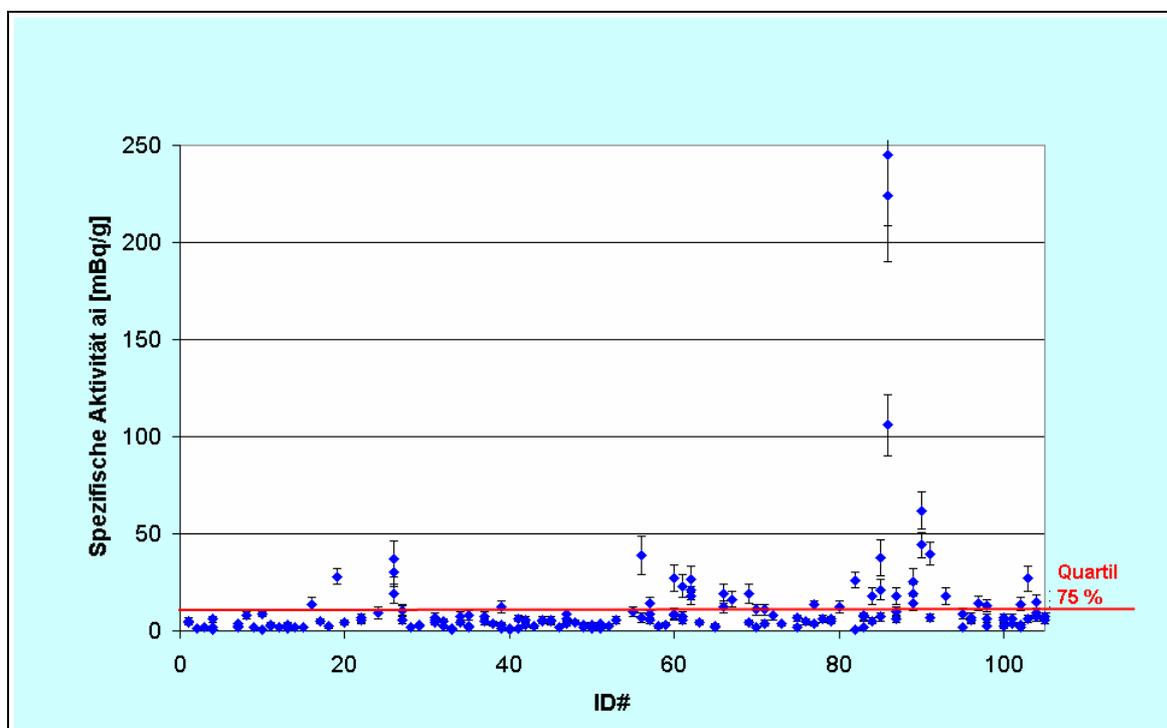


Abbildung 61: Spezifische Aktivität von  $^{210}\text{Pb}$  im Haar alle Werte mit einfacher Standardabweichung ( $s$ )

Bei 6 Werten über 11 mBq/d (oberes Quartil) bestätigen sich die Ergebnisse durch mehrere Probenahmen, alle anderen erhöhten Werte sind Einzelwerte.

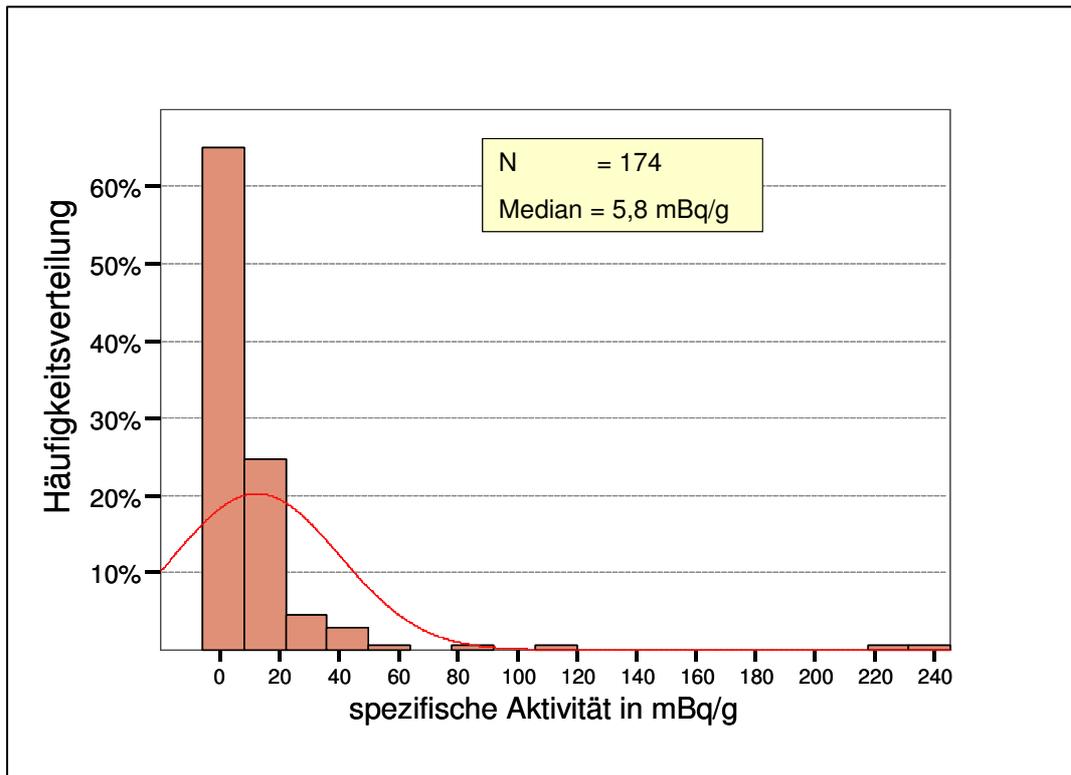


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Aktivität  $^{210}\text{Pb}$  im Haar

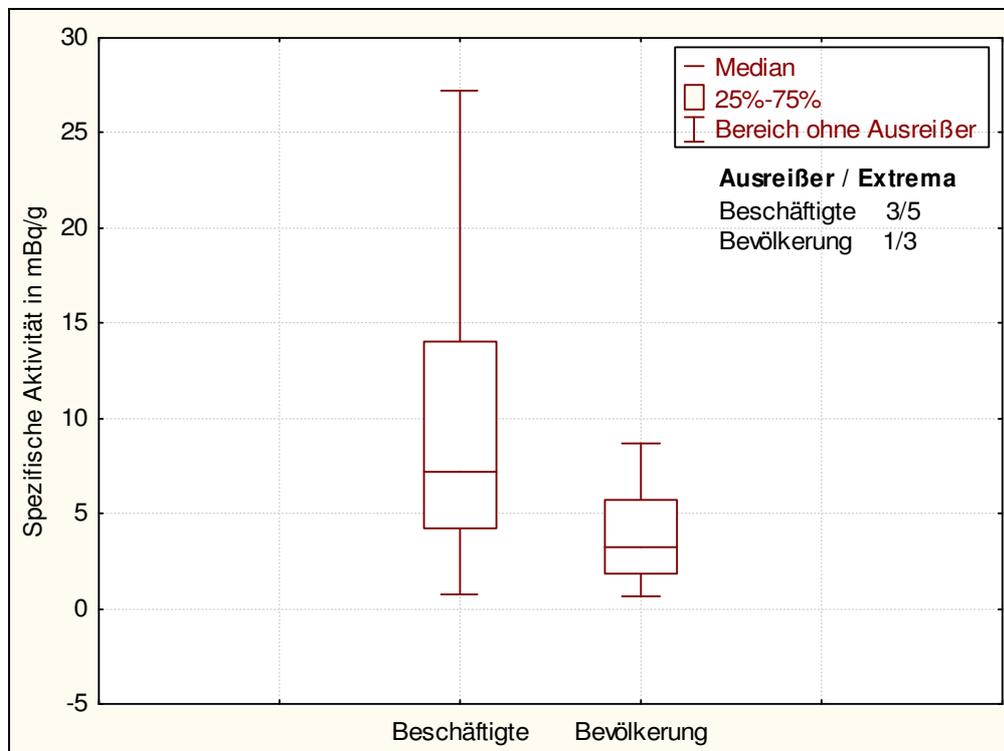


Abbildung 63: Spezifische Aktivität  $^{210}\text{Pb}$  im Haar – alle Ergebnisse unterschieden nach Beschäftigten und Bevölkerung

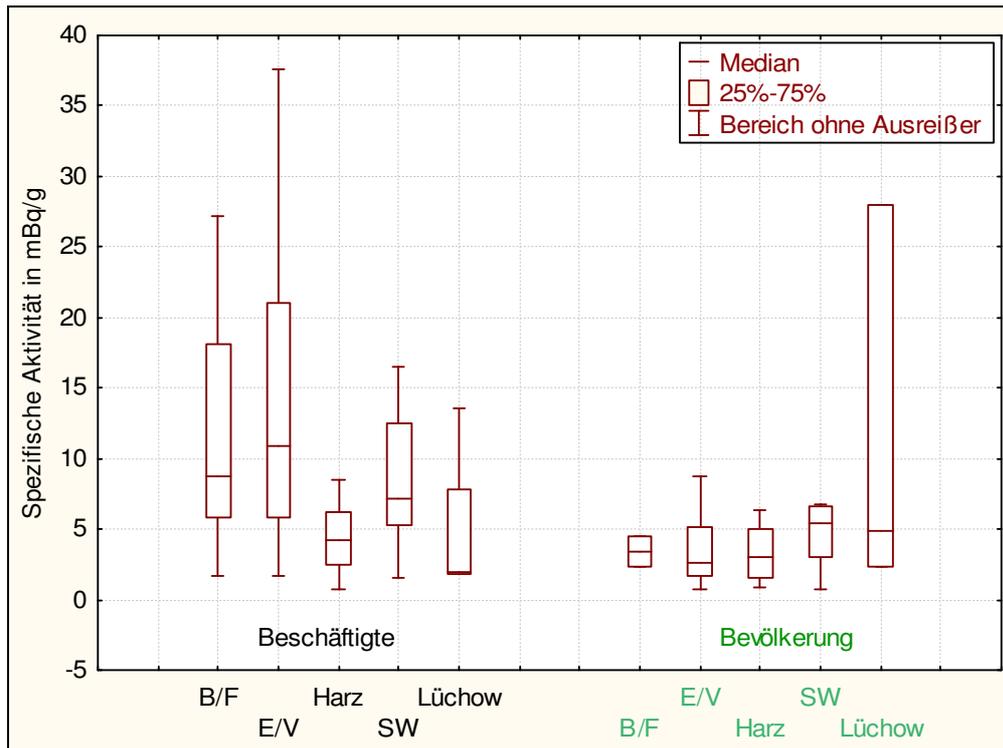


Abbildung 64: Spezifische Aktivität <sup>210</sup>Pb im Haar – Beschäftigte und Bevölkerung nach Regionen

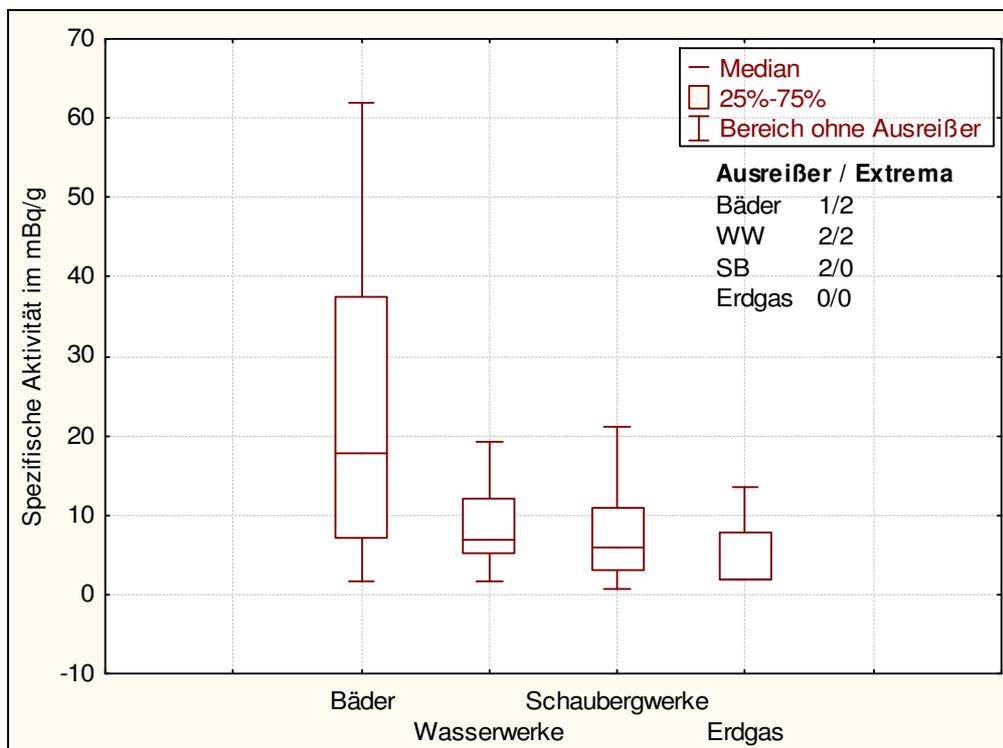


Abbildung 65: Spezifische Aktivität <sup>210</sup>Pb im Haar – alle Beschäftigten nach Arbeitsfeldern

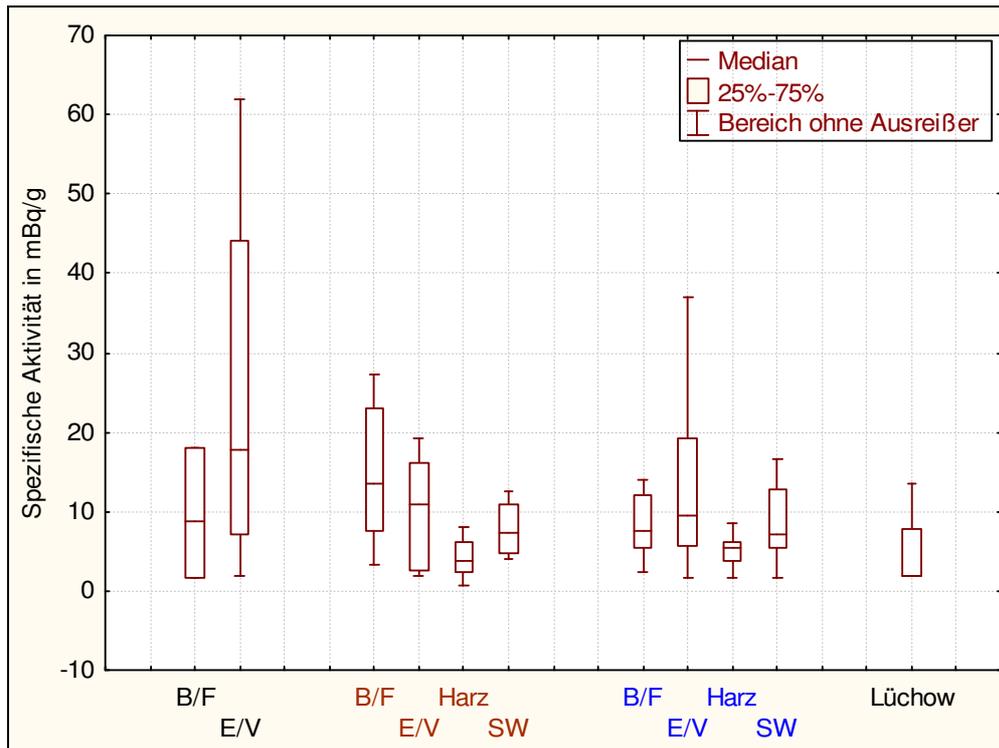


Abbildung 66: Spezifische Aktivität <sup>210</sup>Pb im Haar – Arbeitsfelder nach Regionen

Im Gegensatz zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von <sup>226</sup>Ra im Haar ist die spezifische Aktivität von <sup>210</sup>Pb im Haar in allen Proben nachweisbar. Bei Beschäftigten sind die Werte wesentlich höher als bei Personen der Bevölkerung. Besonders auffällig sind die Ergebnisse bei Beschäftigten in Bädern im Erzgebirge/Vogtland.

Tabelle 42: Spezifische Aktivität <sup>210</sup>Pb im Haar – alle Werte nach Arbeitsfeldern und Regionen

	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	a <sub>i</sub>							
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/Extrema	m [mBq/g]	Wertebereich		Median [mBq/g]	Unteres Quartil [mBq/g]	Oberes Quartil [mBq/g]
						Min [mBq/g]	Max [mBq/g]			
<b>Arbeitsfelder</b>										
Bäder	22	1/2	41	1,7	245	<b>18</b>	7,2	38		
Wasserwerke	46	2/0	9,9	1,6	39	<b>6,8</b>	5,3	12		
Schaubergwerke	45	1/0	8,3	0,5	27	<b>5,8</b>	3,1	11		
Erdgas	4	1/1	4,8	1,8	14	<b>1,9</b>	1,8	7,8		
<b>Regionen *</b>										
Bayern/Franken	23	1/0	12	1,7	39	<b>8,5</b>	5,3	18		
Erzgebirge/Vogtl.	60	1/3	20	0,5	245	<b>7,0</b>	2,7	18		
Harz	44	1/0	4,0	0,5	12	<b>3,6</b>	2,0	5,7		
Schwarzwald	39	2/1	8,2	0,5	27	<b>6,4</b>	4,0	12		
Wendland	8	1/1	18	1,8	90	<b>3,6</b>	1,9	21		

\* Beschäftigte und Bevölkerung

Tabelle 43: Spezifische Aktivität  $^{210}\text{Pb}$  im Haar –Arbeitsfelder und Bevölkerung in den Regionen

	$N_1$	$N_2$	$a_i$					
			Zahl der gültigen Proben	Zahl der Ausreißer/Extrema	$\bar{m}$	Wertebereich		Median
			[mBq/g]	Min	Max	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
<b>Bevölkerung</b>								
Bayern/Franken	2	0/0	3,4	2,3	4,5	<b>3,4</b>	2,3	4,5
Erzgebirge/Vogtl.	21	0/1	5,1	1,0	40	<b>2,6</b>	1,7	5,2
Harz	18	0/0	3,3	1,0	6,4	<b>3,0</b>	1,5	5,0
Schwarzwald	12	1/1	6,8	1,0	26	<b>5,4</b>	3,0	6,7
Wendland	3	0/0	12	2,3	28	<b>4,9</b>	2,3	28
<b>Bäder</b>								
Bayern/Franken	3	0/0	9,5	1,7	18	<b>8,8</b>	1,7	18
Erzgebirge/Vogtl.	19	1/2	46	1,8	245	<b>17,8</b>	7,2	44
<b>Schaubergwerke</b>								
Bayern/Franken	10	0/0	15	3,2	27	<b>13,5</b>	7,6	23
Erzgebirge/Vogtl.	9	0/0	9,8	1,8	19	<b>11,0</b>	2,7	16
Harz	20	1/0	4,4	1,0	12	<b>3,9</b>	2,5	6,2
Schwarzwald	6	0/0	7,8	4,0	13	<b>7,3</b>	4,8	11
<b>Wasserwerke</b>								
Bayern/Franken	8	1/0	11	2,4	39	<b>7,7</b>	5,4	12
Erzgebirge/Vogtl.	11	0/0	13	1,7	37	<b>9,4</b>	5,6	19
Harz	6	0/0	5,1	1,7	8,5	<b>5,4</b>	3,7	6,2
Schwarzwald	21	1/0	9,2	1,6	27	<b>7,2</b>	5,4	13
<b>Erdgas</b>								
Wendland	5	1/1	4,8	1,8	13,6	<b>1,9</b>	1,8	7,8

## 5 Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide muss zwischen den natürlichen Anteilen und denjenigen durch berufliche Tätigkeiten unterschieden werden. Diese Notwendigkeit stellt gegenüber der Bewertung der Strahlenexposition mit künstlichen Radionukliden eine zusätzliche Schwierigkeit dar, da natürliche Strahlenquellen ein untrennbarer Bestandteil der menschlichen Lebensumwelt darstellen und in ihrem Vorkommen und Wirkungsszenarien großen Schwankungen unterliegen.

Vor dieser Schwierigkeit steht auch die Inkorporationskontrolle durch Ausscheidungsanalytik, da die in Stuhl, Urin und Haaren analysierbaren natürlichen Radionuklide eine Summe der Aufnahme durch Ingestion (von Wasser, Nahrung, Boden und Staub) und durch beruflichen Umgang mit erhöhten Konzentrationen von natürlichen Radionukliden darstellen. Gleiches gilt für die Inhalation von Stäuben und Gasen.

Die in der Literatur verfügbaren Daten bezüglich der Ausscheidungsraten (Bq/d) natürlicher Radionuklide in Urin und Stuhl und der spezifischen Aktivitäten (Bq/g) in Haaren lassen deutliche Defizite erkennen. Dadurch wird eine Bewertung der Strahlenexposition von Beschäftigten an Arbeitsplätzen mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radionuklide erschwert.

Deshalb bestand die Aufgabenstellung der vorliegenden Studie darin, typische Wertebereiche der

- Ausscheidungsraten von  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{210}\text{Pb}$  in Stuhl
- Ausscheidungsraten von  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$  in Urin
- Spezifische Aktivitäten von  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{210}\text{Pb}$  in Haaren

zu bestimmen.

Die für die Ermittlung der Strahlenexposition gleichfalls relevanten natürlich vorkommenden Nuklide  $^{238}\text{U}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  waren nicht Gegenstand dieser Studie.

Zum Erreichen des Studienzieles wurden:

- **Arbeitsfelder mit einer erhöhten Strahlenexposition** durch natürliche Radionuklide (Erdgas-Industrie, Wasserwerke, Schaubergwerke, Heilbäder) und
- **Geografische Regionen** mit unterschiedlichen spezifischen Aktivitäten natürlicher Radionuklide im Boden (Bayern, Schwarzwald, Erzgebirge, Harz, Wendland)

in die Untersuchungen einbezogen. Aufgabengemäß wurden alle Arbeitsfelder im Zusammenhang mit dem Bergbau und der Sanierungstätigkeit der WISMUT GmbH von der Bearbeitung innerhalb dieser Studie ausgeklammert.

Unter der Annahme, dass die Familienangehörige der an einem Arbeitsplatz mit erhöhter Exposition durch natürliche Radionuklide Beschäftigten vergleichbare Ernährungsgewohnheiten besitzen, sollte der mögliche Einfluss einer beruflichen Exposition auf die Ausscheidungsraten geprüft werden. Wo Partner aus der Familie nicht gewonnen werden konnten wurden Personen aus dem regionalen Umfeld der Beschäftigten untersucht.

Die Gewinnung von insgesamt 104 Probanden aus verschiedenen Arbeitsumfeldern und geografischen Regionen erfolgte unter Federführung des Instituts für Strahlenschutz der BGFE und der BG Chemie. Durch intensive Betreuung der Probandengruppen konnte erreicht werden, dass diese sich über einen Zeitraum von 3 Jahren an insgesamt 3 Probenahmen beteiligten. 70 der Probanden sind durch ihre Berufstätigkeit potentiell einer erhöhten Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide ausgesetzt (Gruppe „Beschäftigte“). Die restlichen 34 Probanden (Gruppe „Bevölkerung“) sind beruflich nicht exponiert.

Insgesamt wurden 809 Proben (286 Urin, 286 Stuhl, 237 Haar) gesammelt und an diesen 2102 unabhängige Analysen durchgeführt. Um die geforderten Nachweisgrenzen zu erreichen, kam sowohl für  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{230}\text{Th}$  als auch für  $^{210}\text{Pb}$  die  $\alpha$ -Spektrometrie nach radiochemischer Trennung zum Einsatz. Die Bestimmung des  $\beta$ -Strahlers  $^{210}\text{Pb}$  erfolgte durch Messung des nachgebildeten  $\alpha$ -Strahlers  $^{210}\text{Po}$ .

Neuland wurde mit der Bestimmung des  $^{226}\text{Ra}$  mittels Massenspektrometrie mit induktiv-gekoppeltem Plasma (ICP-MS) beschritten. War bisher diese Methode auf langlebige Radionuklide ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) mit langen Halbwertszeiten von  $10^5$  –  $10^9$  a begrenzt, wurde mit der Masse-Bestimmung des  $^{226}\text{Ra}$  mit einer Halbwertszeit von 1600 a ein neues analytisches Verfahren in den Routinebetrieb eingeführt.

Aus den erfassten Ausscheidungsvolumina und -massen konnte die mittleren Ausscheidungsrate von Stuhl mit  $(4,9 \pm 3,9)$  g AM/d und die mittleren Urinvolumina mit  $(2,1 \pm 1,5)$  l/d bestimmt werden.

Die Tabellen 44 und 46 zeigen die nuklidspezifischen Ergebnisse der Studie im Überblick. Gleichzeitig sind Wertebereiche aus der Literatur zum Vergleich eingefügt.

In den Tabellen 45 und 47 werden das obere Quartil und das 90 % Perzentil gegenübergestellt. Dabei werden erhöhte Einzelwerte ausgeschlossen und ohne Anspruch auf Repräsentativität sind somit die Bereiche der Ausscheidungsrate bzw. spezifische Aktivitäten (Haar) bei der untersuchten Kohorte eingrenzbar.

*Tabelle 44: Medianwerte der Ausscheidungsrate in den Matrices Urin (n = 286) und Stuhl (n = 286), differenziert nach Beschäftigten und Bevölkerung, Wertebereiche der Studie und aus der Literatur*

Matrix	Nuklid	Ausscheidungsrate [mBq/d]				
		Beschäftigte	Bevölkerung	Alle	Wertebereich	Literatur Wertebereich
Urin	$^{226}\text{Ra}$	6,6	8,1	<b>7,5</b>	2,0 - 75	1,0 - 20
	$^{210}\text{Pb}$	8,5	6,3	<b>7,5</b>	1,0 - 187	3,5 - 16
	$^{210}\text{Po}$	5,1	3,5	<b>4,3</b>	1,0 – 248	1,0 - 15
Stuhl	$^{230}\text{Th}$	5,5	4,1	<b>5,1</b>	1,0 – 34	0,9 - 47
	$^{226}\text{Ra}$	37	21	<b>32</b>	2,0 – 442	38 - 120
	$^{210}\text{Pb}$	40	30	<b>34</b>	1,0 - 395	97 - 110

Tabelle 45: Oberes Quartil (75%) und 90 % Perzentil der Ausscheidungsraten von Urin und Stuhl

Matrix	Nuklid	Ausscheidungsraten [mBq/d]	
		Oberes Quartil	90 % Perzentil
Urin	<sup>226</sup> Ra	15	26
	<sup>210</sup> Pb	13	21
	<sup>210</sup> Po	10	24
Stuhl	<sup>230</sup> Th	8,5	14
	<sup>226</sup> Ra	69	130
	<sup>210</sup> Pb	57	90

Die Urin-Ausscheidungsraten der untersuchten Radionuklide <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb und <sup>210</sup>Po liegen im Bereich von einigen mBq/d, wobei 90% der Werte kleiner als 25 mBq/d sind. <sup>210</sup>Po befindet sich nicht im radioaktiven Gleichgewicht mit dem Mutternuklid <sup>210</sup>Pb.

Bei den Stuhlausscheidungen konnte mit ca. 30 mBq/d gegenüber der Ausscheidung über Urin etwa die 5fache Menge der Radionuklide <sup>226</sup>Ra und <sup>210</sup>Pb beobachtet werden. 90% der Werte für <sup>226</sup>Ra sind < 130 mBq/d bzw. für <sup>210</sup>Pb < 90 mBq/d.

Tabelle 46: Medianwerte der spezifischen Aktivitäten für <sup>226</sup>Ra und <sup>210</sup>Pb im Haar (n = 237) differenziert nach Beschäftigten und Bevölkerung, Wertebereiche der Studie und aus der Literatur

Matrix	Nuklid	Spezifische Aktivität [mBq/g TM]				
		Beschäftigte	Bevölkerung	Alle	Wertebereich	Literatur Wertebereich
Haar	<sup>226</sup> Ra	< 1,0	< 1,0	<b>&lt; 1,0</b>	1,0 - 67	-
	<sup>210</sup> Pb	7,2	3,2	<b>5,8</b>	1,0 - 245	0,7 - 30

Tabelle 47: Oberes Quartil (75%) und 90 % Perzentil der spezifischen Aktivitäten im Haar

Matrix	Nuklid	Spezifische Aktivität [mBq/g TM]	
		Oberes Quartil	90 % Perzentil
Haar	<sup>226</sup> Ra	5,8	14
	<sup>210</sup> Pb	11	24

<sup>226</sup>Ra konnte in der Matrix Haar oberhalb der Nachweisgrenze von 1 mBq/d nicht nachgewiesen werden. Die spezifische Aktivität von <sup>210</sup>Pb beträgt 6 mBq/g wobei 90% der Werte < 25 mBq/g beobachtet wurden.

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen die in der Literatur veröffentlichten Angaben, wobei durch die hohe Zahl der hier analysierten Proben die statistische Sicherheit gegenüber den Literaturwerten verbessert werden konnte.

Eine Differenzierung der Daten nach den Gruppen „Bevölkerung“ und „Beschäftigte“ zeigt, dass mit Ausnahme der Werte <sup>226</sup>Ra in Urin die Medianwerte für die Gruppe der

Beschäftigten größer sind als diejenigen der Bevölkerung. Diese Aussage ist auch für andere statistische Parameter (oberes Quartil, 90% Perzentil) gültig. Bei der Analyse nach Arbeitsfeldern wird deutlich, dass die erhöhten Werte der Beschäftigten hauptsächlich durch die Arbeitsfelder „Bäder“ und „Wasserwerke“ bedingt werden.

Die regionalen Vergleiche zeigen weder für die Bevölkerung noch für die Beschäftigten einheitliche Charakteristika. Generell ist jedoch festzustellen, dass sich trotz der großen Schwankungsbereiche die Einflüsse bezüglich des geogenen Untergrundes in den Regionen daran erkennen lassen, dass die niedrigsten Medianwerte vor allem im Wendland und im Harz, die höchsten in den Regionen Erzgebirge/Vogtland und Bayern/Franken festgestellt wurden.

Die Studie zeigt eine Reihe von Unterschieden hinsichtlich der Untersuchungsparameter auf. Ein äußerst interessanter Aspekt ist beispielsweise die Frage der Differenzierung zwischen Aufnahme der Radionuklide mit der Nahrung und am Arbeitsplatz. Weitergehende Untersuchungen erscheinen auch interessant im Hinblick auf die Ermittlung der resultierenden Dosis und des daraus ableitbaren Risikos.

Die systematische Untersuchung und die Extraktion von kausalen Zusammenhängen bleiben weiteren Untersuchungen vorbehalten, die aber ein anderes Studiendesign benötigen.

## 6 Danksagung

An erster Stelle möchten wir den Probanden danken für ihr Interesse, ihr Verständnis und die aufwendige und zuverlässige Mitarbeit bei der Beprobung und Protokollierung, die Voraussetzung für den Erfolg der vorliegenden Studie war.

Frau M. Hartmann (Fachbetreuerin BfS) danken wir für ihre Unterstützung, zahlreiche fachliche Diskussionen und ihr Interesse am Fortgang des Projektes.

Einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen des Projektes haben Frau B. Liebscher und Frau P. Werner mit der Durchführung der zahlreichen radiochemischen Analysen für das Projekt geleistet. Frau B. Gleisberg hat in Vorbereitung der Methoden die radiochemischen Analysen durch fachliche Beratung betreut.

Herr W. Boden hat durch die Einführung der  $^{226}\text{Ra}$  -Analyse mittels ICP-MS diese schnelle und präzise Methode auch für die große Zahl von Urin-, Stuhl- und Haarproben einsetzbar gemacht.

Den nachfolgend genannten Kolleginnen und Kollegen danken wir stellvertretend für alle anderen Kollegen des VKTA, die durch Verständnis und vielfältige Unterstützung während der Laufzeit des Projektes die Durchführung der aufwendigen Studie mit ermöglicht haben:

Frau J. Schubert  
Frau M. Franke  
Frau I. Schlenkrich  
Frau Y. Dienhold  
Herrn A. Liebscher

Dank an Herrn Dr. Knappik für die Durchsicht der Endfassung des Berichtes und fachliche Hinweise.

Herr Dr. M. Köhler (VKTA) hat während der gesamten Laufzeit des Projektes durch zahlreiche Diskussionen, konstruktive Vorschläge und die kritische Durchsicht der Manuskripte zu einem erfolgreichen Abschluss der Untersuchungen beigetragen.

## 7 Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> DIN 25482 Teil 1, Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Zählende Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses, Beuth-Verlag, Berlin, April 1989
- <sup>2</sup> Protokolle Statusgespräche vom 10.07.2001 (nicht veröffentlicht)
- <sup>3</sup> Burkhardt, J.; Tillmanns, G.: Daten zur Umgebungs- und Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1990 Bis 1992 , Neuerberg: BfS-Institut für Strahlenhygiene, 1993
- <sup>4</sup> Will, W.; Sarenio, O.: Ortsdosisleistung der Terrestrischen Gammastrahlung in den östlichen Bundesländern Deutschlands. Hrsg: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, 1997
- <sup>5</sup> Will, W.; Mielcarek, J.; Schkade, U.-K.: Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in ausgewählten Regionen Deutschlands. Hrsg: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, 2003
- <sup>6</sup> Daiber, D.: IMIS: Tagesaktuelle Gamma-Ortsdosisleistung und Aerosol-Aktivität, Tagesmittelwerte. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter. <http://www.bfs.de/ion/imis>
- <sup>7</sup> Radon in der Bodenluft, Geologisches Institut Universität Göttingen 1999
- <sup>8</sup> Strahlenexposition an Arbeitsplätzen durch natürliche Radionuklide, Radiation Exposure at Working Places by natural Radionuclides. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 147. Sitzung der SSK am 3./4. Juli 1997. Hrsg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des BMU ; H. 10. Stuttgart (u.a.): G. Fischer, 1997
- <sup>9</sup> <http://www.bfs.de>
- <sup>10</sup> Maushart, R. in <http://www.FS.de>
- <sup>11</sup> Zingler, J., Paschke, M., Hille, R. Natürliche Zufuhr und Ausscheidung von Thorium und Uran. Radioaktivität in Mensch und Umwelt. 30. Jahrestagung des FS, Lindau 1998; Köln TÜV-Verlag S. 171-176
- <sup>12</sup> Zingler, J., „Der Aktivitätstransport von natürlich bedingtem Thorium in der Inkorporationsüberwachung“ Dissertation TH Aachen, 27.11.2001
- <sup>13</sup> Riedel, W., Gawlik, D., Tschammer, A. Die Ausscheidung von Thorium im Urin bei nichtexponierten Personen. Radioaktivität in Mensch und Umwelt. 30. Jahrestagung des FS, Lindau 1998; Köln TÜV-Verlag S. 199-204
- <sup>14</sup> Grosche, B., Henrichs, K., Thoriumbelastung der Allgemeinbevölkerung in Deutschland , Radioaktivität in Mensch und Umwelt. 30. Jahrestagung des FS, Lindau 1998; Köln TÜV-Verlag S. 205-209
- <sup>15</sup> Dalheimer, A. Hartmann, M. König, K. Körperaktivität durch natürliche Quellen: Neuerberg 1998, Institut für Strahlenhygiene (ISH 183/98)
- <sup>16</sup> Dalheimer, A.; Hartmann, M.; König, K.: Körperaktivität durch natürliche Quellen. Berücksichtigung des Beitrages der aus natürlichen Quellen aufgenommenen Radionuklide bei der Ausscheidungsanalyse. 3. Fachgespräch am 25. und 26. November 1996, Fachbereich Strahlenschutz des BfS, Berlin, 1998

- 18 Bünge, T. et al.: Materialienband 1997, Zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen. Ergänzung zum Jahresbericht 1997 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung". Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, 2000
- 19 Werner, E.; Oeh, U.; Höllriegel, V.; Roth, P.; Regulla, D.: Monitoring of Workers and Members of the General Public for the Incorporation of Thorium and Uranium in the EU and Selected Countries outside the EU. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg. GSF-Bericht; 09/03., 2003
- 20 Santos, P. L.; Gouvea, R. C.; Dutra, I. R., Human Occupational Radioactive Contamination from the use of Phosphated Fertilizers, Science of the total Environment, Vol. 162, No. 1, pages 19-22
- 21 Santos, P. L.; Gouvea, R. C.; Dutra, I. R., Concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in Hair and Urine of Workers, of the Uranium Mine At Pocos De Caldas (Brazil), Science of the Total Environment, Vol. 148, No. 1, pages 61-65
- 22 Juan, N.B.; Ballelos, E. [Philippines], Determination of Polonium in Urine of Filipino Non-Smokers and Smokers. Philippine Atomic Energy Commission, Diliman, Quezon City PAEC(D)—76004 Mar 1976. 4 p.
- 23 Wenger P; Cosandey M., Retention and Excretion of Radium-226 and Strontium-90 in two doubly Contaminated Persons. Service Cantonal de Controle des Irradiations, Geneve, Switzerland. Health Phys, (1976) 31 (3) 225-229.
- 24 Antonova V A; Shvydko N S., Hair-Biological Indicator of the Ra226 Content of the Human Organism, Gigiena I Sanitariia, (1971 May) 36 (5) 109-11.
- 25 Kozlova M V; Korenkov I P; Novikov Iu V; Korzunova R A; Pedchenko V I., Po210 Content in the Environment and in the Human Body. Issledovanie soderzhaniia Gigiena I Sanitariia, (1971 Apr) 36 (4) 44-7
- 26 Kuroda T., Distribution of Naturally Occurring Radionuclides Belonging to Uranium Decay Series. 3. Po210, Ra226 and uranium contents in the human urine. Medicine And Biology, (1967 Dec 10) 75 (6) 234-6.
- 27 Brooks, R. O. R., Biological Monitoring of Persons Working with Radioelements, At. Energy Res. Estab., Harwell, UK, Brit. J. Clin. Pract. (1960), 14, 465-73
- 28 Sax, N. Irving; Beigel, Mary; Daly, James C.; Gabay, J. J., Determination of Environmental Levels of Radium, N.Y. State Dept. of Health, Albany, U.S. At. Energy Comm. (1960), Volume Date 1959, ANL-6637, 59-84
- 29 Okabayashi, H. A Study on the Excretion of Pb-210 and Po-210, Journal of radiation research, Vol 23(2), 242,
- 30 Naumann, M., Hänisch, K., Hartmann, M. Normalgehalte an Uran und Thoriumisotopen in Stuhlproben von Personen aus Berlin. Körperaktivität durch natürliche Quellen, BfS-ISH-183/98, 70-75
- 31 Schönmuth, T. Helling, K., Sahre, P. Incorporation Surveillance of Uranium and Thorium Exposed Persons by Means of Analytical Methods for Estimation Activity in Excreta and Arrangement with Measured Values of Non-Exposed Persons, Proc. 30<sup>th</sup> annual meeting of the Swiss-German Radioprotection Association FS-98-98-T, (1998) 194-198
- 32 Beyer, D., Biehl, R. The Significance of Natural Faecal Thorium Excretions for the Surveillance of Inhaled Thorium Class Y Compounds. Jahrestagung Fachverband für Strahlenschutz, Visvy, FS-89-48-Z, 82-87

- 33 Shiraishi et al., Health Phys. 66 (1994), 30-35
- 34 Beyer, D., Dalheimer,A., Riedel,W., Neudert, N. Die Bedeutung der natürlichen Ausscheidung bei der Inkorporationsüberwachung auf U-238, Th-232, Sr-90 und Ra-226, FS-98-98-T,210-215
- 35 Naumann, M. Hänisch, K. Hartmann, M.Levels of Natural Radionuclides in Human Excreta in Berlin Area, Workshop on Intakes of Radionuclides, Avignon/F, 15.-18.10.1997
- 36 Naumann, M. Hänisch, K. Hartmann, M., Schönherr, H., Natürliche Und Künstliche Radionuklide In Urin- Und Stuhlproben Von Personen Aus Der Bevölkerung, FS-98-98-T, 216.221
- 37 ICRP Publication 23 Oxford:Pergamon Press (1975)
- 38 Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publication 23 Oxford:Pergamon Press (1975)
- 39 Sources and Effects of Ionizing Radiation UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, New York:United Nations (1993)
- 40 Santos,P.L.,Gouvea,R.C., Dutra,I.R., Human Occupational Radioactive Contamination from the use of Phosphated Fertilizers, The Science of the Total Environment 162(1995), 19-22
- 41 Yamamoto, M., Yamauchi, KY., Kawamura, H. Komura, K. Ueno, K. Measurements of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in Japanese human hair, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 157, No.1 (1992), 37-45
- 42 Landinskayaya,L.A., Arch. Environ.Health 27(1973) 254
- 43 Hartmann, M. Bundesamt für Strahlenschutz, Persönliche Mitteilung 2002
- 44 Radford, E.P., Science 143 (1964), 247-249
- 45 Gotchy, R.L., Schiager, K.J., Bioassay Methods for Estimating Current Exposures to Short-Lived Radon Progeny, Health Phys.,17 (1969) 199-218
- 46 Lorant, M. Ist Po Der Krebsauslösende Faktor bei übermäßigem Zigaretten - Konsum, Med. Klin.59 (1964) Nr. 27
- 47 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP 60 Oxford:Pergamon Press (1990),
- 48 Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie des Rats 96/29/EURATOM zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen.EU-Richtlinie 1996
- 49 Strahlenschutzverordnung Deutschland 2001
- 50 Frenzel, H.; Scherpenberg, H. v.; Zimmer, R.: Epidemiologische Untersuchung radon-exponierter Bergleute Nordostbayerischer Mineralbergwerke unter Verwendung Chromosomendosimetrischer Methoden. Forschungsbericht T 80-117. München: Bayerisches Landesinstitut für Arbeitsmedizin, 1980 72 S. #1536 pap0536
- 51 Urban, M.: Ergebnisse von Untersuchungen zur Strahlenexposition durch Radon und Zerfallsprodukte in den Alten Bundesländern (Menzenschwand, Ellweiler). 2. Biophysikalische Arbeitstagung Schlema (1992) , S. 60-70 1992 #5019 SS 3,3
- 52 Jacobi, W.; Henrichs, K.; Barclay, D.: Verursachungs-Wahrscheinlichkeit von Lungenkrebs durch die berufliche Strahlenexposition von Uran-Bergarbeitern der WISMUT AG. Gutachterliche Stellungnahme im Auftrage der Berufsgenossenschaften ("Jacobi I"). Köln: Institut für Strahlenschutz (IfS), 1992 67 S. #1227 SS 20,5

- 53 Müller, W.-U.; Streffer, C.; Schabronath, J.: Die Radonexposition im Steinkohlenbergbau des Ruhrgebiets. Strahlenrisiko durch Radon (1992) S. 61-70 1992 #7251 SS 18,33
- 54 Schmitz, J.; Nickels, R.; Fritsche, R.: Radonexposition am Arbeitsplatz: Radon- und Radonfolgeprodukt- Messungen in deutschen Untertagebetrieben (Besucherbergwerke, Besucherhöhlen, Therapiestationen). Forschung zum Problemkreis 'Radon', 12. Statusgespräch, Berlin Oktober 1999 (1999)
- 55 Deetjen, P.: Radon-Balneotherapie - Neue Aspekte. 2. Biophysikalische Arbeitstagung Schlemma (1992) , S. 135-141 1992 #5027 SS 3,3
- 56 Frame, P. W.: Natural Radioactivity In Curative Devices And Spas. In: Health Physics 62 (1992) 6, p. S80-S82 1992 #438
- 57 Schwarz, E.-R.; Nürnberger, E.; Martignoni, K.: Radon als Heilmittel - Strahlenbiologische und Medizinische Aspekte -Risiko. Wiss. Umwelt (1995) 3, S. 141-144 1995 #5232 SS 7,1995
- 58 Haninger, T.; Grunewald, W.; Philipsborn, H. v.: Die Strahlenexposition des Personals in einem Radon-Heilbad. Untersuchungen in Sibyllenbad zeigen keine Gefährdung. StrlSchP (1998) 3, S. 30-36 1998 #7564 pap1493
- 59 Soto, J.; Gomez, J.: Occupational Doses From Radon In Spanish Spas. Health Physics 76 (1999) 4, p. 398-401 1999 #8078
- 60 Lambeck, M.: Bewertung des Radonrisikos durch Vergleich mit Radonkurorten. Forschung zum Problemkreis 'Radon', 12. Statusgespräch, Berlin Oktober 1999 (1999)#8875 ST 99/10
- 61 Brandmaier, P.: Strahlenschutz im Gasteiner Heilstollen . StrlSchP 8 (2002) 4, S. 31-32 2002 #10366
- 62 Just, G.; Philipsborn, H. v.: Strahlenschutzuntersuchungen in Radon-Heilbädern. StrlSchP 8 (2002) 4, S. 29-31 2002 #10365
- 63 Becker, D. E.; Reichelt, A.; Riepl, S.: Berufsbedingte Strahlenexposition in einer Trinkwasseraufbereitungsanlage. Umweltradioaktivität - Radioökologie - Strahlenwirkungen 1 (1993) , S. 79-84 1993
- 64 Raff, O. et al.: Radon-Entfernung in Wasserwerken mit hoher Radonbelastung. Radioaktivität in Mensch und Umwelt 1/92 (1998) , S. 526-531 1998 #7742 SS 21,23,1
- 65 Trautmannsheimer, M.; Eder, E.: Flächendeckende Erhebung der Radonexposition in Bayerischen Wasserwerken. Forschung zum Problemkreis 'Radon', 12. Statusgespräch, Berlin Oktober 1999 (1999) , 1999 #8873 ST 99/10
- 66 Bünger, T.: Der Radongehalt des Trinkwassers in der Bundesrepublik Deutschland - Untersuchungen in Wasserwerken. Forschung zum Problemkreis 'Radon', 12. Statusgespräch, Berlin Oktober 1999 (1999) , #8872 ST 99/10
- 67 Stüber, J.; Wisser, S.: Radon in Wasserwerken - Ursache möglicher externer Strahlenexposition. Anreicherung natürlicher Radionuklide in Luftentfeuchtern. StrlSchP 7 (2001) 4, S. 46-49 2001 #9936
- 68 Franke, P.; Hermann, E.; Weiß, A.: Massnahmen zur Reduzierung der Radonexposition in Wasserwerken. StrlSchP 8 (2002) 4, S. 24-28 2002 #10364
- 69 Hingmann, H.; Ehret, K. K.; Hegenbart, L.:

- Radonexpositionen der Beschäftigten bei Reinigungsarbeiten in Wasserkammern. Praxis des Strahlenschutzes: Messen, Modellieren, Dokumentieren. 34. Jahrestagung des FS, Kloster Seeon (2002), S. 453-460 2002 #11165 SS 21,31
- 70 Bauer, E.; Schupfner, R.; Roßbacher, B.; Trautmannsheimer, M.: Beurteilung der Radiologischen Situation durch die Radonexposition von Beschäftigten in Bayerischen Wasserwerken. Praxis des Strahlenschutzes: Messen, Modellieren, Dokumentieren. 34. Jahrestagung des FS, Kloster Seeon (2002), S. 509-515 2002 #11166 SS 21,31
- 71 Schreiber, S.: Arbeitsbereiche mit erhöhter Radon-222-Exposition in Anlagen der Wasserversorgung - Gefährdung und Präventionsansätze. Exposition Natürlich; Radon; Arbeitsplatz; Strahlenexposition; Strahlenschäden; Messung., StrlSchP 2003 38 S. #10597 pap1478
- 72 Untersuchung der Radonbelastung für das Personal in Wasserwerken. Konzept zur Reduktion der Exposition der Beschäftigten. Pressemeldung des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz LfU vom 11.8.2002. In: StrlSchP 9 (2003) 1, S. 53 2003 #10433
- 73 Kolb, W.; Wojcik, M.: Strahlenschutzprobleme bei der Gewinnung und Nutzung von Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, 1985 69 S. : zahlr. Tab., graph. Darst. #5099 SM 41
- 74 Koelzer, W.: Strahlenexposition durch fossile Energieträger Die Strahlenexposition des Menschen (2004), S. 14-16 2004 #11323 E11322
- 75 Sporkert, F. Anwendung der Headspace-Festphasenmikroextraktion in der Forensischen Analytik unter besonderer Berücksichtigung der Haaranalyse, Diss. HU Berlin, 7.12.2001
- 77 Brucik, I. Separation of Ra, Th, U and Pu on oston anion exchanger in atmospheric precipitation samples, J. Radioanal. And Nucl. Chem.,Art.,Vol. 121, No. 2 (1988) 258-293
- 78 Brooks, R.O.R., A biological monitoring of persons working with radioelements, Brit. J. Clin. Pract. 14 (1960) 465-473
- 79 Ishikawa, Y., Murakami, H., Sekine, T., Saito, T., Yoshihara, K., Non-destructive determination of low-level  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{226}\text{Ra}$  with an ordinary high-purity Ge-detector, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol. 178, No. 2,1994, 301 – 310.
- 80 Hussain, N., , G., Church, T. M., Carey, W.: A simplified technique for Gamma-Spectrometric Analysis of  $^{210}\text{Pb}$  in sediment samples, Appl. Radiat. Isot. Vol. 47, No. 4 (1996) 473 – 477.
- 81 Köhler, M. Preuße, W. Gleisberg, B. Schäfer, I. Heinrich, T. Knobus, B. Comparison methods for the analysis of  $^{226}\text{Ra}$  in water samples Appl. Rad. and Isotopes 56(2003) 387-392
- 82 Gleisberg, B., Loos, G., Niese, S., Schäfer, I., Bestimmung langlebiger Radionuklide in Roh- und Prozesswässern, Klarwasser, Absorbermaterialien und Deponieprodukten aus Prozessen der Uran- und Arsenabtrennung aus Bergbauwässern, BMFT-Forschungsbericht FE-Vertrag Z/A-78 (1993)
- 83 Yong-Jae Kim, Chang-Kyu Kim and Jong-In Lee, Simultaneous Determination of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in Groundwater and Soil Samples by using the Liquid Scintillation Counter - Suspension Gel Method, Appl. Radiat. and Isot., Volume 54, Issue 2, February 2001, Pages 275-281.

- 84 Burnett, C.B.; Tai, Wie-Chieh,  
Determination of Radium in Natural Waters by Alpha Liquid Scintillation,  
Anal.Chem. 1992,64
- 85 Aupiais J., Fayolle P. Dacheux N.,  
Determination of  $^{226}\text{Ra}$  in Mineral Drinking Waters by Alpha Liquid  
Scintillation with Rejection of Beta-Gamma Emitters,  
Anal.Chem. 1998, 70
- 86 Manjon G. Vioque Il Morenao H. Garcia-Tenorio R. Garcia-Leon M.  
Determination of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{224}\text{Ra}$  in Drinking Waters by Liquid Scintillation  
Counting,  
Appl. Rad. and Isot. Vo. 48,4 1997
- 87 Higuchi, H. Masaki U. Satoh K. Ohashi N. Noguchi M.  
Determination of Radium in Water by Liquid Scintillation Counting after  
Preconcentration with Ion-Exchange Resin, Anal. Chem. 1984, 56 a
- 88 Wallner, G., Irlweck, K., Determination of Lead-210 and its progenies  
in Aerosol Fractions of Different Particle Sizes,  
Radiochimica Acta, 78 (1997) 173 – 176.
- 89 Chang-Kyu Kim u.a.  
Application of a high Resolution Inductively Coupled Plasma Mass  
Spectrometer to the Measurement of Long-Lived Radionuclides,  
Journal of Analytical Spectrometry, April 1991, Vol 6
- 90 Epov, N.V. Lariviere, D., Evans, R.D., Li, C., Cornett, R.J.,  
Direct Determination of  $^{226}\text{Ra}$  in Environmental Matrices Usin-Collision Cell  
Inductively Coupled Plasma Mass-Spectrometry,  
Journal of Radioanalytical and Nuclear chemistry, Vol. 256, No. 1 82003) 53-60
- 91 Gegusch, H. Bundesamt für Strahlenschutz, persönliche Mitteilung 1992
- 92 Godoy, de Oliveira, J.M. Entwicklung einer Analysenmethode für die  
Bestimmung von U-238, U-234, Th-232, Th-230, Th-228, Ra-228, Ra-226,  
Pb-210, Po-210 und ihre Anwendung auf Umweltproben, KFK 3502(1983)
- 93 Messanleitung für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und  
zur Erfassung Radioaktiver Emissionen aus Kerntechnischen Anlagen,  
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York 1992
- 94 Verfahren Zur Bestimmung von natürlichen Radionukliden in der Umwelt  
zur Erfüllung der Richtlinien zur Emissions- Und Immissionsüberwachung  
bei Bergbaulichen Tätigkeiten (REI Bergbau),  
Interne ST-Berichte St-IB-2, Berlin, Juli 1999
- 95 Cannizzaro, F., Greco, G., Raneli, M., Spitale, M. C. and Tomarchio, E.,  
A Low-Level Spectrometer with a Planar Low-Energy Hpge: Shielding  
Arrangement Tests and System Performance for  $^{210}\text{Pb}$  Determination in Air  
Filter Samples, Appl. Radiat. and Isot., Volume 55, Issue 1, July 2001, Pages  
129-133.
- 96 Köhler, M., Niese, S., Gleisberg, B., Jenk, U., Nindel, K.  
Simultaneous Determination of Ra and Th Nuclides,  $^{238}\text{U}$  and  $^{227}\text{Ac}$  in Uranium  
Mining Waters by  $\gamma$ -Ray Spectrometry,  
Appl. Rad. and Isot. 52 (2000) 717
- 97 M. Köhler, B. Gleisberg, Ermittlung der  $^{210}\text{Pb}$ -Deposition auf der Vegetation  
– Ein Beitrag zum Biomonitoring am Standort Ronneburg Abschlussbericht  
Labor für Umwelt- und Radionuklidanalytik, VKTA Rossendorf e.V. für Wismut  
GmbH Januar 2005
- 98 Yong-Jae Kim, Chang-Kyu Kim, e.a. Journal of Radioanalytical

- and Nuclear Chemistry, Vol 240, No.2 (1999) 613-618
- 99 Jarvis, KE et al.: Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. Glasgow and London: Blackie & Son Ltd., 1992
- 100 Epov, N.V., Larivière, D., Evans, R.D., Li, C., Cornett, R.J.,  
Direct Determination of  $^{226}\text{Ra}$  in Environmental Matrices Using Collision Cell Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry,  
Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 256, No. 1 (1999) 53-60
- 101 Clayton, R. F., Bradley, E. J.: A Cost Effective Method for the Determination of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in Environmental Samples, Science of the Total Environment, 173/174, 23 (1995).
- 102 Karali, T., Ölmez, S., Yener, G.,  
Study of spontaneous Deposition of  $^{210}\text{Po}$  on various Metals and Application for Activity Assessment in Cigarette Smoke,  
Appl. Radiat. and Isot., Volume 47, Issue 4, April 1996, Pages 409-411.
- 103 Messanleitungen für die Überwachungen der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung Radioaktiver Emissionen aus Kerntechnischen Anlagen, Hrsg.: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, Jena, Dezember 1993

## 8 Anlagen

Anlage 1: Anleitung zur Probenahme.....	115
Anlage 2: Fragebogen.....	116
Anlage 3: Probandenkohorte .....	117
Anlage 4: Analytische Einzelergebnisse .....	120
1    Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ und $^{210}\text{Po}$ im Urin .....	121
1.1 $^{226}\text{Ra}$ im Urin .....	121
1.2 $^{210}\text{Pb}$ im Urin .....	124
1.3 $^{210}\text{Po}$ im Urin .....	127
2    Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ und $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl .....	130
2.1 $^{230}\text{Th}$ im Stuhl .....	130
2.2 $^{226}\text{Ra}$ in Stuhl.....	133
2.3 $^{210}\text{Pb}$ in Stuhl.....	136
3    Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ und $^{210}\text{Pb}$ im Haar .....	139
3.1 $^{226}\text{Ra}$ im Haar .....	139
3.2 $^{210}\text{Pb}$ im Haar .....	142

## Anlage 1: Anleitung zur Probenahme

### Hinweise zur Durchführung der Probenahme für Urin- und Stuhlproben

Die Urin- und Stuhlproben sollen mindestens 24 Stunden gesammelt werden.

#### **Wichtig:**

#### **1. Urinproben**

Bei Beginn der Sammlung das Anfangsdatum mit Uhrzeit auf den Probengefäßen vermerken. Nach der letzten Probenahme ebenfalls den Zeitpunkt auf den Probengefäßen angeben.

Z.B	Beginn	Datum: 1.10.01	Uhrzeit	7.00
	Ende	Datum: 2.10.01	Uhrzeit	8.00

Nach Beschriftung des Probengefäßes jeden Urin während des Sammelzeitraumes in das Probengefäß ablassen. Nach Beendigung der Probenahme das Gefäß beschriften und sehr gut verschließen.

#### **2. Stuhlproben**

Für die Studie ist die Erfassung der gesamten Stuhlmenge während des Sammelzeitraumes erforderlich.

**Zu jeder Probenahme ist das Datum und die Uhrzeit auf dem Behälter zu notieren.**

Die Stuhlprobe ist in der entsprechenden Tüte zu sammeln. Bei mehrmaligem Stuhlgang sind neue Tüten zu verwenden. Die Tüten sind mit Clips zu verschließen und in die Kunststoff-Schraubdose zu geben und diese gut zuzuschrauben. Anschließend ist die Dose in den Transportbeutel zu geben.

**Wichtig: Stuhlproben dürfen kein Toilettenpapier enthalten!**

#### **Ansprechpartner:**

Fachbereich Analytik	
<b>Dr. Ingrid Schäfer</b>	
PF 510 119 D-01314 Dresden	Telefon: (0351) 260-2124 / <b>4116269</b> Telefax: (0351) 260-3190 / <b>4116237</b>

## Anlage 2: Fragebogen

**Fragebogen** (wird vom Interviewer ausgefüllt)

1AWE1

<b>Allgemeine Angaben:</b> <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich				
Name:	<b>Ernährungsgewohnheiten:</b>			
Geburtsdatum:	<input type="checkbox"/> spezielle Ernährungsform z.B. vegetarisch			
Größe:	<input type="checkbox"/> zurzeit folgende Diät:			
Gewicht:	<b>Nahrungsmittel:</b>	wenig (1x Mo)	mittel (1x wö)	viel (>1x wö)
Wohnhaft in der Region seit:	Fisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Obst	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Raucher: <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja wieviel: <5 >20	Gemüse (eigener Anbau) <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Wasserversorgung:</b> <input type="checkbox"/> öffentlich <input type="checkbox"/> eigener Brunnen	Nüsse:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Spez. Haarbehandlung</b>	<b>Innereien:</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Beruf:</b> <b>Tätigkeit:</b> <b>Tätig seit:</b>	<b>Getränke:</b>	wenig	mittel	viel
	Tee	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kaffee	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Bier	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Arbeitsort:</b>	<b>Mineralwasser:</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sorte			
<b>Expositionsdauer am Arbeitsort</b>	<b>Nahrungsergänzungsmittel:</b> <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja wenn ja, welche	<b>Medikamente:</b> <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja wenn ja, welche		
		<b>Behandlung mit Radiopharmaka:</b> <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja		
Bemerkungen				

### Anlage 3: Probandenkohorte

ID	Region	Probandenart	Geschlecht	Probandengruppe	Alter	Raucher
1	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	45	ja
2	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	21	nein
3	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	47	ja
4	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	53	nein
6	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	53	nein
7	Erzgebirge	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	46	ja
8	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	61	ja
9	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	54	nein
10	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	61	ja
11	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	58	nein
12	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	52	nein
13	Erzgebirge	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	56	nein
14	Lüchow	Berufstätige	m	Gas	48	nein
15	Lüchow	Berufstätige	m	Gas	53	nein
16	Lüchow	Berufstätige	m	Gas	53	ja
17	Lüchow	Bevölkerung	w	VG Gas	53	nein
18	Lüchow	Bevölkerung	w	VG Gas	49	nein
19	Lüchow	Bevölkerung	m	VG Gas	42	ja
20	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	39	ja
21	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	53	nein
22	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	32	nein
23	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	50	ja
24	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	37	nein
25	Franken	Berufstätige	m	Bäder	45	nein
26	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	33	ja
27	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	37	nein
28	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	59	nein
29	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	64	nein
30	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	67	nein
31	Harz	Berufstätige	w	Schaubergwerke	51	nein
32	Harz	Berufstätige	m	Wasserwerke	63	ja
33	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	74	ja
34	Harz	Berufstätige	m	Wasserwerke	52	nein

ID	Region	Probandenart	Geschlecht	Probandengruppe	Alter	Raucher
35	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	37	nein
36	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	28	nein
37	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	26	nein
38	Harz	Berufstätige	m	Wasserwerke	44	ja
39	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	52	ja
40	Harz	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	46	nein
41	Harz	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	29	nein
42	Harz	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	65	nein
43	Harz	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	52	nein
44	Harz	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	59	ja
45	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	49	nein
46	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	63	nein
47	Harz	Berufstätige	m	Schaubergwerke	65	nein
48	Harz	Bevölkerung	m	VG Wasserwerke	45	nein
49	Harz	Bevölkerung	m	VG Wasserwerke	37	ja
50	Harz	Bevölkerung	w	VG Wasserwerke	43	nein
51	Harz	Bevölkerung	m	VG Wasserwerke	25	nein
52	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Wasserwerke	40	nein
53	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Wasserwerke	49	ja
54	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Wasserwerke	43	nein
55	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Wasserwerke	44	nein
56	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Wasserwerke	33	nein
57	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Wasserwerke	51	ja
58	Bayrischer Wald	Bevölkerung	w	VG Wasserwerke	37	ja
59	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	61	nein
60	Bayrischer Wald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	49	nein
61	Bayrischer Wald	Berufstätige	w	Schaubergwerke	34	nein
62	Bayrischer Wald	Berufstätige	w	Schaubergwerke	41	nein
63	Bayrischer Wald	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	38	nein
64	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	54	nein
65	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	54	nein
66	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	52	nein
67	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	55	nein
68	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	48	nein

ID	Region	Probandenart	Geschlecht	Probandengruppe	Alter	Raucher
69	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	51	nein
70	Erzgebirge	Berufstätige	m	Schaubergwerke	42	nein
71	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	41	ja
72	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	56	nein
73	Schwarzwald	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	71	nein
74	Schwarzwald	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	60	nein
75	Schwarzwald	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	47	nein
76	Schwarzwald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	52	nein
77	Schwarzwald	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	30	nein
78	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	48	nein
79	Schwarzwald	Bevölkerung	m	VG Schaubergwerke	66	nein
80	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	65	nein
81	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	42	nein
82	Schwarzwald	Bevölkerung	w	VG Schaubergwerke	64	nein
83	Vogtland	Berufstätige	w	Bäder	43	nein
84	Vogtland	Berufstätige	w	Bäder	34	nein
85	Vogtland	Berufstätige	w	Bäder	36	nein
86	Vogtland	Berufstätige	w	Bäder	56	nein
87	Vogtland	Berufstätige	m	Bäder	64	ja
89	Vogtland	Berufstätige	w	Bäder	45	ja
90	Vogtland	Berufstätige	w	Bäder	62	nein
91	Vogtland	Bevölkerung	m	VG Bäder	49	nein
92	Franken	Berufstätige	w	Bäder	60	nein
93	Erzgebirge	Berufstätige	m	Wasserwerke	58	nein
94	Franken	Berufstätige	m	Bäder	53	ja
95	Franken	Berufstätige	m	Bäder	54	nein
96	Schwarzwald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	52	nein
97	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	42	nein
98	Schwarzwald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	61	nein
99	Schwarzwald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	37	nein
100	Schwarzwald	Bevölkerung	m	VG Wasserwerke	52	nein
101	Schwarzwald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	66	nein
102	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	43	nein
103	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	60	nein
104	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	25	nein
105	Schwarzwald	Berufstätige	m	Schaubergwerke	58	nein
106	Schwarzwald	Berufstätige	m	Wasserwerke	54	nein

## Anlage 4: Analytische Einzelergebnisse

Die folgenden Tabellen zeigen die Einzelergebnisse jedes Probanden für die drei Probenahmen der Studie, aufgeschlüsselt nach Matrix und Nukliden.

Die Gesamtunsicherheit wird bestimmt aus dem Wurzelquadrat der Unsicherheiten der Messstatistik, der chemischen Präparation und der Kalibrierung [1].

$$s(AR) = AR * \sqrt{\left(\frac{s(R_n)}{R_n}\right)^2 + \left(\frac{s(\eta)}{\eta}\right)^2 + \left(\frac{s(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2}$$

AR	=	Ausscheidungsrate [mBq/d]
R <sub>n</sub>	=	Nettozählrate [s <sup>-1</sup> ]
η	=	Chemische Ausbeute
ε	=	Messeffektivität
s(R <sub>n</sub> )	=	statistische Unsicherheit
s(η)	=	Unsicherheit der chemischen Präparation
s(ε)	=	Unsicherheit der Kalibrierung

Für ein Vertrauensniveau von 90 % ist der Vertrauensbereich durch  $AR \pm 1,645 s$  gegeben.

# 1 Ausscheidungsraten $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ und $^{210}\text{Po}$ im Urin

## 1.1 $^{226}\text{Ra}$ im Urin

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	1.PN	2.PN	3. PN
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
1	12,3 +/- 2,6	10,5 +/- 2,2	33,4 +/- 7,0
2	21,7 +/- 4,6	8,3 +/- 2,3	19,4 +/- 4,1
3	10,6 +/- 2,2	17,7 +/- 3,7	58,8 +/- 12,3
4	19,5 +/- 4,1	18,7 +/- 3,9	66,1 +/- 13,9
6	15,6 +/- 3,3	8,2 +/- 2,3	13,9 +/- 2,9
7	16,7 +/- 3,5	11,3 +/- 2,4	6,8 +/- 1,9
8	1,5 +/- 0,4	17,8 +/- 3,7	15,3 +/- 3,2
9	10,5 +/- 2,2	<1,1	10,3 +/- 2,2
10	29,4 +/- 6,2	-	8,0 +/- 2,2
11	2,2 +/- 0,6	<1,2	25,7 +/- 5,4
12	0,9 +/- 0,3	<0,8	29,0 +/- 6,1
13	<0,6	3,5 +/- 1,0	37,7 +/- 7,9
14	1,7 +/- 0,5	7,9 +/- 2,2	8,7 +/- 2,4
15	6,5 +/- 1,8	5,0 +/- 1,4	<1,0 -
16	10,8 +/- 2,3	6,0 +/- 1,7	12,8 +/- 2,7
17	6,5 +/- 1,8	-	2,7 +/- 0,8
18	4,6 +/- 1,3	5,0 +/- 1,4	10,9 +/- 2,3
19	11,4 +/- 2,4	24,6 +/- 5,2	3,3 +/- 0,9
20	8,9 +/- 2,5	7,5 +/- 2,1	-
21	12,3 +/- 2,6	5,8 +/- 1,6	-
22	9,0 +/- 2,5	9,8 +/- 2,7	16,2 +/- 3,4
23	1,9 +/- 0,5	21,3 +/- 4,5	-
24	8,4 +/- 2,4	5,0 +/- 1,4	-
25	3,0 +/- 0,8	13,2 +/- 2,8	-
26	14,0 +/- 2,9	4,3 +/- 1,2	13,5 +/- 2,8
27	4,3 +/- 1,2	<0,8	0,8 +/- 0,2
28	9,0 +/- 2,5	<1,3	8,1 +/- 2,3
29	2,8 +/- 0,8	6,7 +/- 1,9	13,5 +/- 2,8
30	3,1 +/- 0,9	19,6 +/- 4,1	4,3 +/- 1,2
31	8,3 +/- 2,3	7,7 +/- 2,2	35,3 +/- 7,4
32	3,9 +/- 1,1	6,3 +/- 1,8	0,7 +/- 0,2
33	4,8 +/- 1,3	21,7 +/- 4,6	-
34	3,6 +/- 1,0	33,3 +/- 7,0	2,2 +/- 0,6

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
35	2,4 +/- 0,7	16,9 +/- 4,7	11,4 +/- 2,4
36	6,7 +/- 1,9	14,6 +/- 4,1	51,2 +/- 10,7
37	8,3 +/- 2,3	6,0 +/- 1,7	-
38	5,0 +/- 1,4	<0,9	-
39	10,0 +/- 2,6	<0,9	43,4 +/- 9,1
40	6,4 +/- 1,8	<1,0	- -
41	4,1 +/- 1,1	<1,0	22,4 +/- 4,7
42	2,8 +/- 0,8	<1,0	6,0 +/- 1,7
43	<0,6	1,8 +/- 0,5	8,7 +/- 2,4
44	<1,1	2,8 +/- 0,8	21,4 +/- 4,5
45	1,9 +/- 0,5	2,0 +/- 0,6	-
46	9,5 +/- 2,5	10,1 +/- 2,8	-
47	11,7 +/- 3,0	14,8 +/- 4,1	59,2 +/- 12,4
48	7,5 +/- 2,1	18,9 +/- 5,3	-
49	10,5 +/- 2,7	14,2 +/- 4,0	-
50	2,0 +/- 0,6	9,3 +/- 2,6	-
51	19,8 +/- 5,1	<1,4	24,7 +/- 5,2
52	2,0 +/- 0,6	18,4 +/- 5,2	-
53	29,9 +/- 7,7	4,3 +/- 1,2	-
54	6,1 +/- 1,7	21,0 +/- 5,9	16,0 +/- 3,4
55	1,2	<0,7	5,3 +/- 1,5
56	<1,4	8,6 +/- 2,4	27,4 +/- 5,8
57	<0,9	1,4	37,7 +/- 7,9
58	6,2 +/- 1,7	3,9 +/- 1,1	-
59	12,4 +/- 3,2	-	-
60	4,1 +/- 1,1	0,7	16,4 +/- 3,4
61	9,0 +/- 2,5	8,5 +/- 2,4	20,4 +/- 4,3
62	59,5 +/- 15,4	<1,5	17,6 +/- 3,7
63	6,3 +/- 1,8	<0,9	-
64	<1,1	<0,5	-
65	9,2 +/- 2,6	<1,9	23,1 +/- 4,9
66	9,1 +/- 2,5	<0,6	2,7 +/- 0,8
67	8,5 +/- 2,4	<1,1	-
68	11,4 +/- 2,9	-	-

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
69	<b>26,0</b> +/- 5,5	<b>&lt;0,9</b>	<b>22,4</b> +/- 4,7
70	<b>&lt;0,5</b>	<b>&lt;1,0</b>	<b>&lt;0,4</b>
71	<b>&lt;2,1</b>	<b>18,8</b> +/- 3,9	<b>12,0</b> +/- 2,5
72	<b>4,3</b> +/- 1,2	<b>&lt;1,3</b>	<b>20,8</b> +/- 4,4
73	<b>8,5</b> +/- 2,4	<b>&lt;0,9</b>	-
74	<b>11,5</b> +/- 2,4	<b>&lt;1,1</b>	<b>26,0</b> +/- 5,5
75	<b>2,8</b> +/- 0,8	<b>&lt;0,8</b>	<b>3,8</b> +/- 1,1
76	<b>&lt;0,5</b>	<b>&lt;0,6</b>	<b>6,4</b> +/- 1,3
77	<b>1,7</b> +/- 0,5	<b>&lt;0,5</b>	<b>31,4</b> +/- 6,6
78	<b>5,6</b> +/- 1,6	<b>&lt;1,4</b>	<b>1,0</b> +/- 0,3
79	<b>14,2</b> +/- 3,0	<b>&lt;1,6</b>	<b>2,0</b> +/- 0,6
80	<b>4,9</b> +/- 1,4	<b>&lt;1,0</b>	<b>1,0</b> +/- 0,3
81	<b>5,0</b> +/- 1,4	<b>&lt;2,5</b>	<b>11,6</b> +/- 2,4
82	<b>10,5</b> +/- 2,2	<b>&lt;0,9</b>	<b>45,0</b> +/- 9,5
83	<b>8,3</b> +/- 2,3	<b>&lt;0,8</b>	<b>1,4</b> +/- 0,4
84	<b>38,0</b> +/- 8,0	<b>13,8</b> +/- 2,9	<b>2,1</b> +/- 0,6
85	<b>25,2</b> +/- 5,3	<b>23,2</b> +/- 4,9	<b>5,9</b> +/- 1,7
86	<b>9,2</b> +/- 2,6	<b>&lt;0,9</b>	<b>1,0</b> +/- 0,3
87	<b>28,4</b> +/- 6,0	<b>4,0</b> +/- 1,1	<b>2,4</b> +/- 0,7
89	<b>50,2</b> +/- 10,5	<b>9,6</b> +/- 2,7	<b>28,3</b> +/- 5,9
90	<b>11,0</b> +/- 2,3	<b>2,3</b> +/- 0,5	<b>26,5</b> +/- 5,6
91	<b>17,4</b> +/- 3,7	<b>9,0</b> +/- 2,5	<b>3,8</b> +/- 1,1
92	<b>20,9</b> +/- 4,4	<b>21,4</b> +/- 4,5	<b>74,7</b> +/- 15,7
93	<b>10,4</b> +/- 2,2	<b>4,9</b> +/- 1,4	<b>1,3</b> +/- 0,4
94	<b>6,6</b> +/- 1,8	<b>9,6</b> +/- 2,7	-
95	<b>15,7</b> +/- 3,3	<b>1,6</b> +/- 0,3	<b>10,5</b> +/- 2,2
96	<b>6,7</b> +/- 1,9	<b>&lt;1,8</b>	-
97	<b>8,8</b> +/- 2,5	-	-
98	<b>15,7</b> +/- 3,3	<b>&lt;1,0</b>	<b>15,2</b> +/- 3,2
99	<b>22,1</b> +/- 4,6	<b>&lt;1,3</b>	<b>16,0</b> +/- 3,4
100	<b>5,3</b> +/- 1,5	<b>&lt;1,2</b>	<b>43,3</b> +/- 9,1
101	<b>7,8</b> +/- 2,2	<b>&lt;0,7</b>	<b>21,8</b> +/- 4,6
102	<b>&lt;1,2</b>	<b>&lt;0,9</b>	<b>10,0</b> +/- 2,1
103	<b>19,9</b> +/- 4,2	<b>&lt;1,7</b>	<b>10,8</b> +/- 2,3
104	<b>1,5</b> +/- 0,4	<b>&lt;0,6</b>	<b>2,6</b> +/- 0,7
105	<b>4,2</b> +/- 1,2	<b>&lt;0,9</b>	-
106	<b>8,5</b> +/- 2,4	<b>&lt;1,1</b>	<b>41,9</b> +/- 8,8

## 1.2 $^{210}\text{Pb}$ im Urin

	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
1	7,1 +/- 1,8	4,1 +/- 1,0	12,4 +/- 3,1
2	11,2 +/- 2,8	9,3 +/- 2,3	8,7 +/- 2,2
3	6,4 +/- 1,6	7,5 +/- 1,9	15,1 +/- 3,8
4	11,7 +/- 2,9	10,8 +/- 2,7	8,6 +/- 2,1
6	5,0 +/- 1,3	3,6 +/- 0,9	36,7 +/- 9,2
7	5,5 +/- 1,4	3,1 +/- 0,8	14,8 +/- 3,7
8	5,6 +/- 1,4	3,5 +/- 0,9	12,2 +/- 3,0
9	5,9 +/- 1,5	5,1 +/- 1,3	20,1 +/- 5,0
10	5,0 +/- 1,3	-	16,3 +/- 4,1
11	2,6 +/- 0,7	4,2 +/- 1,1	19,2 +/- 4,8
12	2,4 +/- 0,6	4,6 +/- 1,2	16,7 +/- 4,2
13	3,2 +/- 0,8	2,3 +/- 0,6	76,6 +/- 19,2
14	2,7 +/- 0,7	10,5 +/- 2,6	187,0 +/- 20,6
15	3,3 +/- 0,8	5,9 +/- 1,5	44,2 +/- 6,6
16	3,8 +/- 1,0	4,6 +/- 1,2	3,8 +/- 1,0
17	0,9 +/- 0,2	2,2 +/- 0,6	28,4 +/- 5,7
18	0,6 +/- 0,2	6,3 +/- 1,6	51,7 +/- 7,8
19	0,3 +/- 0,1	13,0 +/- 3,3	12,3 +/- 3,1
20	14,1 +/- 3,5	2,3 +/- 0,6	-
21	4,5 +/- 1,1	5,0 +/- 1,3	-
22	20,6 +/- 5,2	5,1 +/- 1,3	21,1 +/- 5,3
23	7,0 +/- 1,8	1,7 +/- 0,4	-
24	8,0 +/- 2,0	20,4 +/- 5,1	-
25	12,4 +/- 3,1	30,9 +/- 7,7	-
26	11,4 +/- 2,9	3,1 +/- 0,8	40,4 +/- 10,1
27	16,4 +/- 4,1	9,5 +/- 2,4	18,3 +/- 4,6
28	14,8 +/- 3,7	6,5 +/- 1,6	64,8 +/- 16,2
29	0,6 +/- 0,2	2,1 +/- 0,5	4,1 +/- 1,0
30	4,3 +/- 1,1	5,4 +/- 1,4	4,4 +/- 1,1
31	5,0 +/- 1,3	8,5 +/- 2,1	7,1 +/- 1,8
32	2,2 +/- 0,6	3,5 +/- 0,9	10,8 +/- 2,7
33	4,5 +/- 1,1	4,0 +/- 1,0	-
34	11,6 +/- 2,9	7,1 +/- 1,8	9,6 +/- 2,4

	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
35	4,1 +/- 1,0	7,1 +/- 1,8	8,8 +/- 2,2
36	7,5 +/- 1,9	6,3 +/- 1,6	2,7 +/- 0,7
37	12,2 +/- 3,1	9,5 +/- 2,4	11,5 +/- 2,9
38	5,3 +/- 1,3	4,5 +/- 1,1	3,4 +/- 0,9
39	7,9 +/- 2,0	3,3 +/- 0,8	5,3 +/- 1,3
40	4,5 +/- 1,1	4,2 +/- 1,1	4,4 +/- 1,1
41	7,5 +/- 1,9	4,0 +/- 1,0	3,1 +/- 0,8
42	11,4 +/- 2,9	1,5 +/- 0,4	10,0 +/- 2,5
43	2,1 +/- 0,5	3,4 +/- 0,9	4,2 +/- 1,1
44	4,6 +/- 1,2	5,8 +/- 1,5	10,2 +/- 2,6
45	2,1 +/- 0,5	5,1 +/- 1,3	10,1 +/- 2,5
46	4,8 +/- 1,2	3,8 +/- 1,0	-
47	16,8 +/- 4,2	9,5 +/- 2,4	19,6 +/- 4,9
48	13,3 +/- 3,3	4,4 +/- 1,1	5,1 +/- 1,3
49	8,5 +/- 2,1	3,0 +/- 0,8	-
50	1,1 +/- 0,3	5,0 +/- 1,3	6,3 +/- 1,6
51	3,7 +/- 0,9	1,5 +/- 0,4	6,8 +/- 1,7
52	16,6 +/- 4,2	15,1 +/- 3,8	-
53	10,0 +/- 2,5	16,9 +/- 4,2	-
54	9,3 +/- 2,3	15,4 +/- 3,9	13,2 +/- 3,3
55	4,3 +/- 1,1	5,2 +/- 1,3	5,5 +/- 1,4
56	6,4 +/- 1,6	8,4 +/- 2,1	45,6 +/- 11,4
57	5,8 +/- 1,5	16,1 +/- 4,0	36,5 +/- 9,1
58	6,6 +/- 1,7	4,4 +/- 1,1	-
59	16,4 +/- 4,1	- -	-
60	34,7 +/- 8,7	9,7 +/- 2,4	39,1 +/- 9,8
61	10,1 +/- 2,5	14,2 +/- 3,6	4,2 +/- 1,1
62	19,5 +/- 4,9	7,7 +/- 1,9	33,5 +/- 8,4
63	2,4 +/- 0,6	11,7 +/- 2,9	-
64	22,3 +/- 5,6	9,9 +/- 2,5	-
65	9,5 +/- 2,4	22,1 +/- 5,5	13,0 +/- 3,3
66	12,5 +/- 3,1	8,8 +/- 2,2	7,2 +/- 1,8
67	5,7 +/- 1,4	9,0 +/- 2,3	-
68	23,6 +/- 5,9	-	-

	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
69	21,3 +/- 5,3	4,0 +/- 1,0	16,7 +/- 4,2
70	1,1 +/- 0,3	4,2 +/- 1,1	5,5 +/- 1,4
71	11,5 +/- 2,9	6,3 +/- 1,6	6,9 +/- 1,7
72	9,3 +/- 2,3	15,5 +/- 3,9	12,2 +/- 3,0
73	12,9 +/- 3,2	7,1 +/- 1,8	-
74	10,8 +/- 2,7	10,5 +/- 2,6	12,5 +/- 3,1
75	14,2 +/- 3,6	7,0 +/- 1,8	14,2 +/- 3,5
76	14,8 +/- 3,7	9,4 +/- 2,4	12,2 +/- 3,0
77	2,0 +/- 0,5	0,5 +/- 0,1	5,7 +/- 1,4
78	5,1 +/- 1,3	7,1 +/- 1,8	9,2 +/- 2,3
79	5,2 +/- 1,3	6,5 +/- 1,6	10,6 +/- 2,6
80	7,6 +/- 1,9	11,4 +/- 2,9	8,9 +/- 2,2
81	6,9 +/- 1,7	7,9 +/- 2,0	7,0 +/- 1,7
82	6,1 +/- 1,5	3,8 +/- 1,0	9,9 +/- 2,5
83	7,9 +/- 2,0	9,0 +/- 2,3	7,2 +/- 1,8
84	18,5 +/- 4,6	7,1 +/- 1,8	13,2 +/- 3,3
85	58,1 +/- 14,5	8,5 +/- 2,1	16,6 +/- 4,2
86	42,0 +/- 10,5	108 +/- 27	53,3 +/- 13,3
87	15,2 +/- 3,8	23,8 +/- 6,0	18,1 +/- 4,5
89	37,2 +/- 9,3	29,2 +/- 7,3	40,3 +/- 10,1
90	13,3 +/- 3,3	12,1 +/- 3,0	30,1 +/- 7,5
91	6,6 +/- 1,7	9,5 +/- 2,4	12,0 +/- 3,0
92	2,5 +/- 0,6	3,0 +/- 0,8	5,5 +/- 1,4
93	4,2 +/- 1,1	2,9 +/- 0,7	2,4 +/- 0,6
94	3,7 +/- 0,9	7,1 +/- 1,8	-
95	1,1 +/- 0,3	0,8 +/- 0,2	1,8 +/- 0,5
96	4,6 +/- 1,2	2,8 +/- 0,7	-
97	2,9 +/- 0,7	-	-
98	4,3 +/- 1,1	6,1 +/- 1,5	5,5 +/- 1,4
99	13,5 +/- 3,4	6,6 +/- 1,7	10,3 +/- 2,6
100	3,6 +/- 0,9	1,3 +/- 0,3	12,1 +/- 3,0
101	12,3 +/- 3,1	5,6 +/- 1,4	8,7 +/- 2,2
102	12,6 +/- 3,2	17,4 +/- 4,4	8,4 +/- 2,1
103	4,0 +/- 1,0	25,4 +/- 6,4	48,3 +/- 12,1
104	3,5 +/- 0,9	1,7 +/- 0,4	14,7 +/- 3,7
105	3,2 +/- 0,8	16,9 +/- 4,2	-
106	6,5 +/- 1,6	20,4 +/- 5,1	4,6 +/- 1,2

### 1.3 $^{210}\text{Po}$ im Urin

	$a_i(^{210}\text{Po})$	$a_i(^{210}\text{Po})$	$a_i(^{210}\text{Po})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
1	5,7 +/- 1,6	1,8 +/- 0,5	2,6 +/- 0,7
2	9,1 +/- 2,5	2,3 +/- 0,6	3,7 +/- 1,0
3	5,2 +/- 1,5	2,1 +/- 0,6	5,3 +/- 1,5
4	3,9 +/- 1,1	8,8 +/- 2,5	5,9 +/- 1,7
6	4,1 +/- 1,1	2,6 +/- 0,7	4,2 +/- 1,2
7	3,9 +/- 1,1	3,9 +/- 1,1	8,2 +/- 2,3
8	2,7 +/- 0,8	2,5 +/- 0,7	3,8 +/- 1,1
9	4,9 +/- 1,4	6,1 +/- 1,7	19,2 +/- 5,4
10	7,8 +/- 2,2	-	7,8 +/- 2,2
11	4,3 +/- 1,2	2,5 +/- 0,7	5,9 +/- 1,6
12	5,5 +/- 1,5	3,3 +/- 0,9	3,5 +/- 1,0
13	2,7 +/- 0,8	2,6 +/- 0,7	4,1 +/- 1,1
14	2,0 +/- 0,6	5,9 +/- 1,7	248,1 +/- 27,3
15	2,4 +/- 0,7	3,9 +/- 1,1	192,4 +/- 21,2
16	2,7 +/- 0,8	2,9 +/- 0,8	7,5 +/- 1,6
17	0,7 +/- 0,2	1,5 +/- 0,4	3,3 +/- 0,9
18	0,5 +/- 0,1	4,7 +/- 1,3	170,6 +/- 18,8
19	0,3 +/- 0,1	2,7 +/- 0,8	7,5 +/- 2,1
20	11,3 +/- 3,2	4,7 +/- 1,3	-
21	3,6 +/- 1,0	3,5 +/- 1,0	-
22	11,9 +/- 3,3	8,5 +/- 2,4	76,3 +/- 21,4
23	5,6 +/- 1,6	10,4 +/- 2,9	-
24	6,4 +/- 1,8	14,4 +/- 4,0	-
25	9,9 +/- 2,8	12,0 +/- 3,4	-
26	9,1 +/- 2,5	2,0 +/- 0,6	20,3 +/- 5,7
27	6,2 +/- 1,7	3,4 +/- 1,0	87,7 +/- 24,6
28	3,9 +/- 1,1	3,7 +/- 1,0	38,1 +/- 10,7
29	0,6 +/- 0,2	1,7 +/- 0,5	2,0 +/- 0,5
30	0,3 +/- 0,1	6,8 +/- 1,9	2,0 +/- 0,6
31	1,8 +/- 0,5	7,3 +/- 2,0	3,2 +/- 0,9
32	1,2 +/- 0,3	1,3 +/- 0,4	17,8 +/- 5,0
33	2,2 +/- 0,6	1,1 +/- 0,3	-
34	4,0 +/- 1,1	0,7 +/- 0,2	4,5 +/- 1,3

	$a_i(^{210}\text{Po})$	$a_i(^{210}\text{Po})$	$a_i(^{210}\text{Po})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
35	3,6 +/- 1,0	2,9 +/- 0,8	15,7 +/- 3,3
36	4,2 +/- 1,2	1,0 +/- 0,3	2,8 +/- 0,8
37	10,4 +/- 2,9	0,9 +/- 0,3	7,4 +/- 2,1
38	5,0 +/- 1,4	2,0 +/- 0,6	3,7 +/- 1,0
39	7,3 +/- 2,0	2,0 +/- 0,6	2,2 +/- 0,6
40	2,0 +/- 0,6	2,9 +/- 0,8	11,0 +/- 2,3
41	2,0 +/- 0,6	1,5 +/- 0,4	1,4 +/- 0,4
42	1,9 +/- 0,5	2,0 +/- 0,6	2,9 +/- 0,8
43	0,9 +/- 0,3	0,7 +/- 0,2	2,8 +/- 0,8
44	1,5 +/- 0,4	1,0 +/- 0,3	30,4 +/- 6,4
45	3,2 +/- 0,9	2,6 +/- 0,7	36,3 +/- 7,6
46	7,3 +/- 2,0	3,1 +/- 0,9	-
47	12,2 +/- 3,4	2,0 +/- 0,6	22,4 +/- 4,7
48	12,0 +/- 3,4	1,7 +/- 0,5	13,1 +/- 2,8
49	9,1 +/- 2,5	0,8 +/- 0,2	-
50	1,6 +/- 0,4	1,4 +/- 0,4	17,7 +/- 3,7
51	0,8 +/- 0,2	3,0 +/- 0,8	12,8 +/- 2,7
52	9,0 +/- 2,5	3,8 +/- 1,1	-
53	17,4 +/- 4,9	5,9 +/- 1,7	-
54	3,2 +/- 0,9	4,3 +/- 1,2	107 +/- 20
55	4,3 +/- 1,2	3,0 +/- 0,8	17,1 +/- 3,6
56	5,0 +/- 1,4	9,9 +/- 2,8	186 +/- 35
57	6,0 +/- 1,7	3,5 +/- 1,0	86,0 +/- 18,1
58	1,8 +/- 0,5	1,5 +/- 0,4	-
59	8,2 +/- 2,3	-	-
60	21,1 +/- 5,9	9,4 +/- 2,6	106 +/- 20
61	2,8 +/- 0,8	4,3 +/- 1,2	4,6 +/- 1,3
62	6,1 +/- 1,7	1,5 +/- 0,4	13,9 +/- 2,9
63	3,7 +/- 1,0	4,0 +/- 1,1	-
64	6,6 +/- 1,8	4,8 +/- 1,3	-
65	2,8 +/- 0,8	14,7 +/- 4,1	54,4 +/- 11,4
66	3,7 +/- 1,0	3,7 +/- 1,0	13,5 +/- 2,8
67	1,7 +/- 0,5	5,2 +/- 1,5	-
68	7,0 +/- 2,0	-	-

	$a_i(^{210}\text{Po})$	$a_i(^{210}\text{Po})$	$a_i(^{210}\text{Po})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
69	0,6 +/- 0,2	2,4 +/- 0,7	35,2 +/- 7,4
70	2,1 +/- 0,6	2,4 +/- 0,7	14,8 +/- 3,1
71	1,4 +/- 0,4	3,6 +/- 1,0	71,4 +/- 15,0
72	2,4 +/- 0,7	2,6 +/- 0,7	70,9 +/- 14,9
73	22,0 +/- 6,2	2,6 +/- 0,7	-
74	2,0 +/- 0,6	4,7 +/- 1,3	28,7 +/- 6,0
75	14,2 +/- 4,0	3,4 +/- 1,0	31,8 +/- 6,7
76	14,8 +/- 4,1	2,9 +/- 0,8	28,8 +/- 6,0
77	0,5 +/- 0,1	1,3 +/- 0,4	9,7 +/- 2,0
78	4,5 +/- 1,3	5,6 +/- 1,6	14,3 +/- 3,0
79	3,0 +/- 0,8	11,9 +/- 3,3	18,3 +/- 3,8
81	1,1 +/- 0,3	6,7 +/- 1,9	10,8 +/- 2,3
82	0,4 +/- 0,1	1,3 +/- 0,4	32,2 +/- 6,8
83	3,3 +/- 0,9	1,9 +/- 0,5	3,1 +/- 0,7
84	25,1 +/- 7,0	6,8 +/- 1,9	8,6 +/- 1,8
85	45,5 +/- 12,7	6,4 +/- 1,8	15,9 +/- 3,3
86	41,5 +/- 11,6	16,9 +/- 4,7	23,1 +/- 4,9
87	7,5 +/- 2,1	3,8 +/- 1,1	14,2 +/- 3,0
89	5,1 +/- 1,4	14,5 +/- 4,1	35,6 +/- 7,5
90	6,1 +/- 1,7	2,3 +/- 0,6	8,8 +/- 1,8
91	1,8 +/- 0,5	3,5 +/- 1,0	7,6 +/- 1,6
92	0,6 +/- 0,2	2,5 +/- 0,7	4,3 +/- 0,9
93	1,6 +/- 0,4	1,5 +/- 0,4	1,3 +/- 0,3
94	1,6 +/- 0,4	2,4 +/- 0,7	-
95	1,7 +/- 0,5	0,6 +/- 0,2	2,0 +/- 0,4
96	2,7 +/- 0,8	6,6 +/- 1,8	-
97	3,3 +/- 0,9	-	-
98	1,2 +/- 0,3	4,7 +/- 1,3	4,8 +/- 1,0
99	3,3 +/- 0,9	6,9 +/- 1,9	10,8 +/- 2,3
100	2,1 +/- 0,6	5,5 +/- 1,5	12,5 +/- 2,6
101	12,2 +/- 3,4	2,8 +/- 0,8	34,1 +/- 7,2
102	3,1 +/- 0,9	11,5 +/- 3,2	11,6 +/- 2,4
103	6,5 +/- 1,8	15,9 +/- 4,5	51,4 +/- 10,8
104	9,0 +/- 2,5	6,5 +/- 1,8	20,2 +/- 4,3
105	1,3 +/- 0,4	7,5 +/- 2,1	-
106	4,3 +/- 1,2	5,6 +/- 1,6	5,4 +/- 1,1

## 2 Ausscheidungsraten $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ und $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl

### 2.1 $^{230}\text{Th}$ im Stuhl

	$a_i(^{230}\text{Th})$	$a_i(^{230}\text{Th})$	$a_i(^{230}\text{Th})$
	1.PN	2.PN	3. PN
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
1	4,1 +/- 1,3	<4,2	16,9 +/- 5,2
2	3,5 +/- 1,1	<2,2	4,2 +/- 1,3
3	<2,5	<2,7	2,9 +/- 0,9
4	15,0 +/- 4,6	<2,1	0,5 +/- 0,2
6	<1,9	2,7 +/- 0,8	3,2 +/- 1,0
7	<1,8	5,3 +/- 1,6	0,5 +/- 0,2
8	9,1 +/- 2,8	3,4 +/- 1,0	3,7 +/- 1,1
9	<3,0	<3,0	4,0 +/- 1,2
10	<3,4	-	0,4 +/- 0,1
11	<2,5	<2,9	1,4 +/- 0,4
12	4,8 +/- 1,5	<2,6	0,6 +/- 0,2
13	<2,1	<5,2	0,7 +/- 0,2
14	8,5 +/- 2,6	<3,3	8,1 +/- 2,5
15	7,4 +/- 2,3	1,9 +/- 0,6	7,5 +/- 2,3
16	<4,2	<3,5	8,9 +/- 2,8
17	<2,3	<1,6	1,3 +/- 0,4
18	<3,7	<3,1	13,2 +/- 4,1
19	<2,5	6,5 +/- 2,0	0,7 +/- 0,2
20	2,7 +/- 0,8	<1,4	-
21	1,8 +/- 0,6	<0,3	-
22	3,8 +/- 1,2	5,4 +/- 1,7	7,1 +/- 2,2
23	2,3 +/- 0,7	<5,1	-
24	2,9 +/- 0,9	3,7 +/- 1,1	-
25	1,8 +/- 0,5	<7,9	-
26	1,5 +/- 0,5	3,0 +/- 0,9	20,0 +/- 6,2
27	3,2 +/- 1,0	7,5 +/- 2,3	0,2 +/- 0,1
28	0,4 +/- 0,1	0,5 +/- 0,1	0,6 +/- 0,2
29	<1,3	16,6 +/- 5,1	5,4 +/- 1,7
30	5,5 +/- 1,7	5,5 +/- 1,7	4,2 +/- 1,3
31	8,4 +/- 2,6	18,3 +/- 5,7	7,6 +/- 2,4
32	11,5 +/- 3,6	9,9 +/- 3,1	5,6 +/- 1,7
33	8,0 +/- 2,5	6,8 +/- 2,1	-
34	23,0 +/- 7,1	11,6 +/- 3,6	5,1 +/- 1,6

	$a_i (^{230}\text{Th})$	$a_i (^{230}\text{Th})$	$a_i (^{230}\text{Th})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
35	10,9 +/- 3,4	6,1 +/- 1,9	16,2 +/- 5,0
36	12 +/- 3,7	2,8 +/- 0,9	14,7 +/- 4,5
37	7,1 +/- 2,2	8,6 +/- 2,7	5,6 +/- 1,7
38	16,4 +/- 5,1	8,1 +/- 2,5	9,3 +/- 2,9
39	4,9 +/- 1,5	7,7 +/- 2,4	2,8 +/- 0,9
40	13,9 +/- 4,3	21,6 +/- 6,7	5,9 +/- 1,8
41	<2,3	4,5 +/- 1,4	26,1 +/- 8,1
42	6,3 +/- 2,0	12,9 +/- 4,0	1,2 +/- 0,4
43	9,4 +/- 2,9	4,9 +/- 1,5	-
44	9,7 +/- 3,0	6,4 +/- 2,0	6,7 +/- 2,1
45	1,6 +/- 0,5	5,8 +/- 1,8	6,9 +/- 2,2
46	<2,2	15,6 +/- 4,8	-
47	13,9 +/- 4,3	9,2 +/- 2,9	8,6 +/- 2,7
48	0,8 +/- 0,2	8,1 +/- 2,5	9,9 +/- 3,1
49	4 +/- 1,2	25,9 +/- 8,0	-
50	3,2 +/- 1,0	3,6 +/- 1,1	8,5 +/- 2,6
51	8,8 +/- 2,7	5 +/- 1,6	12,4 +/- 3,9
52	4,8 +/- 1,5	2,8 +/- 0,9	-
53	<2,6	7,6 +/- 2,3	-
54	5,8 +/- 1,8	1,2 +/- 0,4	3,4 +/- 1,0
55	5,9 +/- 1,8	9,8 +/- 3,0	7,6 +/- 2,3
56	8,8 +/- 2,7	13,8 +/- 4,3	4,4 +/- 1,4
57	5,5 +/- 1,7	1,6 +/- 0,5	3,4 +/- 1,0
58	10,1 +/- 3,1	4,4 +/- 1,4	-
59	3,6 +/- 1,1	-	-
60	4,3 +/- 1,3	20,5 +/- 6,4	7,6 +/- 2,4
61	<0,8	3,9 +/- 1,2	9,1 +/- 2,8
62	2,6 +/- 0,8	3,7 +/- 1,2	3,0 +/- 0,9
63	5,2 +/- 1,6	8,3 +/- 2,6	-
64	3,9 +/- 1,2	1,3 +/- 0,4	-
65	<7,2	9,2 +/- 2,9	0,4 +/- 0,1
66	<2,6	9,3 +/- 2,9	0,3 +/- 0,1
67	<1,7	6,7 +/- 2,1	-
68	<2,3	-	-

	$a_i (^{230}\text{Th})$	$a_i (^{230}\text{Th})$	$a_i (^{230}\text{Th})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
69	<3,2	8,9 +/- 2,8	0,3 +/- 0,1
70	<5,8	29,3 +/- 9,1	0,9 +/- 0,3
71	<2,0	4,3 +/- 1,3	4,5 +/- 1,4
72	<8,0	33,9 +/- 10,5	3,8 +/- 1,2
73	<4,0	17,9 +/- 5,6	-
74	4,45 +/- 1,4	12,5 +/- 3,9	5,0 +/- 1,6
75	6,13 +/- 1,9	10,9 +/- 3,4	2,5 +/- 0,8
76	19,8 +/- 6,2	11,3 +/- 3,5	19,3 +/- 6,0
77	<2,1	6,8 +/- 2,1	7,5 +/- 2,3
78	2,2 +/- 0,7	6,8 +/- 2,1	12,3 +/- 3,8
79	2,5 +/- 0,8	7,4 +/- 2,3	21,7 +/- 6,7
80	9,0 +/- 2,8	6,3 +/- 2,0	4,2 +/- 1,3
81	<2,3	11,3 +/- 3,5	1,0 +/- 0,3
82	2,8 +/- 0,9	5,2 +/- 1,6	8,5 +/- 2,6
83	8,2 +/- 2,5	2,3 +/- 0,7	15,6 +/- 4,8
84	9,7 +/- 3,0	2,7 +/- 0,8	11,8 +/- 3,7
85	7,6 +/- 2,4	4,1 +/- 1,3	1,7 +/- 0,5
86	9,6 +/- 3,0	4,1 +/- 1,3	10,6 +/- 3,3
87	14,1 +/- 4,4	5,3 +/- 1,6	12,4 +/- 3,8
89	14,9 +/- 4,6	5,7 +/- 1,8	5,1 +/- 1,6
90	5,8 +/- 1,8	1,8 +/- 0,6	5,2 +/- 1,6
91	8,5 +/- 2,6	6,4 +/- 2,0	3,9 +/- 1,2
92	9,2 +/- 2,9	10,1 +/- 3,1	3,1 +/- 1,0
93	7,5 +/- 2,3	19,2 +/- 6,0	3,4 +/- 1,1
94	20,0 +/- 6,2	4,4 +/- 1,4	+/- 0,0
95	14,0 +/- 4,3	3,0 +/- 0,9	3,9 +/- 1,2
96	<7,8	5,5 +/- 1,7	-
97	13,0 +/- 4,0	-	-
98	3,2 +/- 1,0	5,8 +/- 1,8	4,8 +/- 1,5
99	2,0 +/- 0,6	8,2 +/- 2,5	4,8 +/- 1,5
100	<2,1	4,8 +/- 1,5	3,3 +/- 1,0
101	7,4 +/- 2,3	7,3 +/- 2,3	1,8 +/- 0,6
102	7,8 +/- 2,4	9,6 +/- 3,0	15,7 +/- 4,9
103	5,2 +/- 1,6	7,3 +/- 2,3	1,6 +/- 0,5
104	<1,8	6,1 +/- 1,9	1,3 +/- 0,4
105	<4,7	3,6 +/- 1,1	-
106	2,0 +/- 0,6	3,3 +/- 1,0	4,2 +/- 1,3

## 2.2 <sup>226</sup>Ra im Stuhl

	$a_i (^{226}\text{Ra})$	$a_i (^{226}\text{Ra})$	$a_i (^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
1	<33,8	62,9 +/- 13,2	258,3 +/- 49,1
2	<9,9	<19,1	5,6 +/- 1,6
3	<15,0	39,6 +/- 8,3	39,5 +/- 8,3
4	<42,3	<14,0	23,1 +/- 4,9
6	18,9 +/- 4,0	11,4 +/- 2,4	24,9 +/- 5,2
7	<8,2	84,1 +/- 17,7	28,7 +/- 6,0
8	57,8 +/- 12,1	57,8 +/- 12,1	2,9 +/- 0,8
9	<9,0	<5,4	95,0 +/- 20,0
10	<1,7	-	2,1 +/- 0,6
11	<1,3	72,5 +/- 15,2	6,6 +/- 1,8
12	<3,9	52,4 +/- 11,0	92,0 +/- 19,3
13	<4,2	97,1 +/- 20,4	74,4 +/- 15,6
14	<5,4	<3,3	7,1 +/- 2,0
15	<21,3	<6,5	5,2 +/- 1,4
16	<39,9	<3,5	38,9 +/- 8,2
17	<4,6	<1,6	22,7 +/- 4,8
18	<15,9	<3,1	97,6 +/- 20,5
19	<5,0	<2,1	0,8 +/- 0,2
20	31,3 +/- 6,6	50,3 +/- 10,6	-
21	26,5 +/- 5,6	16,3 +/- 3,4	-
22	45,4 +/- 9,5	244,8 +/- 46,5	36,0 +/- 7,6
23	<17,2	123,7 +/- 23,5	-
24	43,3 +/- 9,1	50,7 +/- 10,6	-
25	<8,2	125,4 +/- 23,8	-
26	21,5 +/- 4,5	56,0 +/- 11,8	1,0 +/- 0,3
27	32,8 +/- 6,9	106,7 +/- 20,3	8,6 +/- 2,4
28	31,4 +/- 6,6	23,0 +/- 4,8	13,7 +/- 2,9
29	<48,0	53,0 +/- 11,1	86,2 +/- 18,1
30	68,9 +/- 14,5	191,5 +/- 36,4	268,0 +/- 50,9
31	<3,7	57,3 +/- 12,0	72,4 +/- 15,2
32	41,3 +/- 8,7	46,9 +/- 9,8	21,2 +/- 4,5
33	<7,6	58,8 +/- 12,3	-
34	25,2 +/- 5,3	101,3 +/- 19,2	30,3 +/- 6,4

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
35	62 +/- 13,0	135,2 +/- 28,4	389,2 +/- 73,9
36	25,5 +/- 5,4	161,0 +/- 33,8	4,7 +/- 1,3
37	22,6	57,0 +/- 12,0	99,8 +/- 21,0
38	<2,7	49,4 +/- 10,4	195,3 +/- 37,1
39	<3,4	<2,7	54,3 +/- 11,4
40	69,4 +/- 14,6	104,9 +/- 22,0	169,3 +/- 32,2
41	<4,1	<3,8 -	59,7 +/- 12,5
42	<20,9	41,3 +/- 8,7	57,9 +/- 12,2
43	<2,0	<8,8	1,4 +/- 0,4
44	<2,3	<6,1	3,1 +/- 0,9
45	<12,9	9 +/- 1,9	22,5 +/- 4,7
46	<8,5	43,3 +/- 9,1	-
47	47,9 +/- 10,1	96,9 +/- 20,3	44,1 +/- 9,3
48	<15,3	8,8 +/- 1,8	68,0 +/- 14,3
49	<23,8	<38,8	-
50	<2,6	16,1 +/- 3,4	93,8 +/- 19,7
51	<2,4	65,6 +/- 13,8	33,6 +/- 7,1
52	57,3 +/- 12,0	68,8 +/- 14,4	-
53	<14,8	<25,6	-
54	<14,8	<1,6	125,3 +/- 23,8
55	<6,2	54,7 +/- 11,5	42,4 +/- 8,9
56	<3,5	<4,9 -	105,7 +/- 20,1
57	<18,9	46,7 +/- 9,8	78,8 +/- 16,5
58	169,7 +/- 32,2	145,6 +/- 30,6	-
59	4,5 +/- 0,9	-	-
60	<40,8	<42,2	102,1 +/- 19,4
61	<13,6	23,3 +/- 4,9	13,9 +/- 2,9
62	<14,9	<10,8	47,3 +/- 9,9
63	<13,0	111,1 +/- 23,3	-
64	37,8 +/- 7,9	15,8 +/- 3,3	-
65	<26,9	39,1 +/- 8,2	2,1 +/- 0,6
66	<3,1	<4,9 -	14,3 +/- 3,0
67	<20,2	21,4 +/- 4,5	-
68	25,6 +/- 5,4	-	-

	$a_i (^{226}\text{Ra})$	$a_i (^{226}\text{Ra})$	$a_i (^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
69	29,3 +/- 6,2	<5,8	1,4 +/- 0,4
70	32,2 +/- 6,8	<5,1	18,0 +/- 3,8
71	<3,5	<0,4	235 +/- 45
72	<22,1	48,1 +/- 10,1	210 +/- 40
73	52,2 +/- 11,0	60,5 +/- 12,7	-
74	56,7 +/- 11,9	35,3 +/- 7,4	147 +/- 28
75	57,8 +/- 12,1	72,3 +/- 15,2	1,4 +/- 0,4
76	63,1 +/- 13,3	60,8 +/- 12,8	51,0 +/- 10,7
77	38,8 +/- 8,1	<19,2	3,0 +/- 0,8
78	<2,4	<10,6	18,7 +/- 3,9
79	<1,2	<2,3	375 +/- 71
80	34,8 +/- 7,3	25,3 +/- 5,3	1,1 +/- 0,3
81	<1,2	49,3 +/- 10,4	12,0 +/- 2,5
82	<1,8	<5,6	10,8 +/- 2,3
83	144 +/- 27	443 +/- 93	3,7 +/- 1,0
84	42,8 +/- 9,0	70,6 +/- 14,8	347 +/- 66
85	1053 +/- 116	<14,5	401 +/- 76
86	163 +/- 31	218 +/- 46	35,2 +/- 7,4
87	151 +/- 29	133 +/- 28	18,8 +/- 3,9
89	160 +/- 30	115 +/- 24	1,5 +/- 0,4
90	111 +/- 21	47,3 +/- 9,9	102 +/- 19
91	97,3 +/- 20,4	213 +/- 45	21,7 +/- 4,6
92	103 +/- 20	69,3 +/- 14,6	129 +/- 25
93	65,3 +/- 13,7	<32,6	106 +/- 20
94	52,6 +/- 11,0	72,0 +/- 15,1	-
95	<4,7	<8,6 -	12,4 +/- 2,6
96	116 +/- 22	52,7 +/- 11,1	-
97	207 +/- 39	-	-
98	74,9 +/- 15,7	71,8 +/- 15,1	5,6 +/- 1,6
99	50,9 +/- 10,7	<4,4	2,1 +/- 0,6
100	50,4 +/- 10,6	15,5 +/- 3,3	8,6 +/- 2,4
101	128 +/- 24	<1,7	9,8 +/- 2,7
102	144 +/- 27	48,1 +/- 10,1	161 +/- 31
103	90,3 +/- 19,0	78,5 +/- 16,5	34,0 +/- 7,1
104	42,7 +/- 9,0	20 +/- 4,2	45,4 +/- 9,5
105	96,0 +/- 20,2	<17,1	-
106	30,8 +/- 6,5	27,6 +/- 5,8	2,5 +/- 0,7

## 2.3 $^{210}\text{Pb}$ im Stuhl

	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$
	1.PN	2.PN	3.PN
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
1	33,4 +/- 8,4	86,5 +/- 18,2	26,4 +/- 5,5
2	7,3 +/- 1,8	24,0 +/- 5,0	8,4 +/- 1,8
3	21,0 +/- 4,4	56,3 +/- 11,8	32,6 +/- 6,8
4	36,5 +/- 7,7	31,0 +/- 6,5	29,1 +/- 6,1
6	4,6 +/- 1,2	19,9 +/- 4,2	27,6 +/- 5,8
7	1,4 +/- 0,4	74,7 +/- 15,7	22,5 +/- 4,7
8	116 +/- 22	76,4 +/- 16,0	27,6 +/- 5,8
9	29,9 +/- 7,5	45,2 +/- 9,5	48,0 +/- 10,1
10	24,4 +/- 6,1	-	14,6 +/- 3,1
11	0,5 +/- 0,3	53,6 +/- 11,3	29,8 +/- 6,3
12	11,4 +/- 2,9	22,7 +/- 4,8	30,4 +/- 6,4
13	10,3 +/- 2,6	79,7 +/- 16,7	20,8 +/- 4,4
14	24,4 +/- 6,1	55,3 +/- 11,6	177,0 +/- 19,5
15	26,0 +/- 6,5	29,3 +/- 6,2	90,0 +/- 18,9
16	60,5 +/- 15,1	63,9 +/- 13,4	32,4 +/- 6,5
17	15,5 +/- 3,9	16,2 +/- 3,4	17,2 +/- 3,6
18	35,0 +/- 8,8	32,4 +/- 6,8	160,4 +/- 17,6
19	30,6 +/- 7,7	28,3 +/- 5,9	16,8 +/- 3,5
20	26,9 +/- 6,7	42,2 +/- 8,9	-
21	36,8 +/- 9,2	14,2 +/- 3,0	-
22	49,9 +/- 12,5	73,0 +/- 15,3	9,2 +/- 1,9
23	38,1 +/- 9,5	44,6 +/- 9,4	-
24	76,7 +/- 19,2	30,2 +/- 6,3	-
25	23,0 +/- 5,8	68,4 +/- 14,4	-
26	53,3 +/- 13,3	36,7 +/- 7,7	26,0 +/- 5,5
27	44,4 +/- 11,1	54,6 +/- 11,5	16,4 +/- 3,4
28	36,5 +/- 9,1	11,4 +/- 2,4	14,1 +/- 3,0
29	5,2 +/- 1,3	65,6 +/- 13,8	6,2 +/- 1,3
30	31,7 +/- 7,9	47,3 +/- 9,9	16,7 +/- 3,5
31	24,9 +/- 6,2	30,2 +/- 6,3	46,8 +/- 9,8
32	14,3 +/- 3,6	61,7 +/- 13,0	44,7 +/- 9,4
33	24,5 +/- 6,1	47,1 +/- 9,9	-
34	52,1 +/- 13,0	57,0 +/- 12,0	55,0 +/- 11,6

	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
35	54,6 +/- 11,5	44,2 +/- 9,3	30,4 +/- 6,4
36	23,0 +/- 4,8	9,9 +/- 2,1	15,6 +/- 3,3
37	20,4 +/- 4,3	33,5 +/- 7,0	16,2 +/- 3,4
38	60,5 +/- 12,7	34,2 +/- 7,2	15,3 +/- 3,2
39	11,9 +/- 2,5	34,1 +/- 7,2	47,1 +/- 9,9
40	36,3 +/- 7,6	48,3 +/- 10,1	6,7 +/- 1,4
41	13,6 +/- 2,9	28,5 +/- 6,0	51,2 +/- 10,8
42	56,3 +/- 11,8	57,7 +/- 12,1	41,7 +/- 8,8
43	29,7 +/- 6,2	16,0 +/- 3,4	-
44	154 +/- 32	32,8 +/- 6,9	22,6 +/- 4,7
45	8,6 +/- 2,4	15,8 +/- 3,3	16,6 +/- 3,5
46	16,1 +/- 3,4	190 +/- 40	-
47	87,3 +/- 18,3	92,7 +/- 19,5	101 +/- 21
48	1,1 +/- 0,3	31,6 +/- 6,6	31,1 +/- 6,5
49	32,2 +/- 6,8	74,3 +/- 15,6	- -
50	11,3 +/- 2,4	19,3 +/- 4,1	10,6 +/- 2,2
51	30,5 +/- 6,4	44,1 +/- 9,3	16,8 +/- 3,5
52	94,5 +/- 19,8	31,6 +/- 6,6	-
53	97,2 +/- 20,4	67,4 +/- 14,2	-
54	89,6 +/- 18,8	41,0 +/- 8,6	113 +/- 24
55	99,7 +/- 20,9	52,5 +/- 11,0	76,0 +/- 16,0
56	87,0 +/- 18,3	66,6 +/- 14,0	46,5 +/- 9,8
57	84,4 +/- 17,7	40,6 +/- 8,5	67,9 +/- 14,3
58	90,2 +/- 18,9	55,0 +/- 11,6	-
59	177 +/- 37	-	-
60	50,5 +/- 10,6	95,7 +/- 20,1	101 +/- 21
61	51,8 +/- 10,9	15,3 +/- 3,2	51,9 +/- 10,9
62	57,6 +/- 12,1	19,6 +/- 4,1	37,6 +/- 7,9
63	37,5 +/- 7,9	46,9 +/- 9,8	-
64	51,7 +/- 10,9	21,3 +/- 4,5	-
65	117 +/- 24	41,4 +/- 8,7	30,5 +/- 6,4
66	37,2 +/- 7,8	76,3 +/- 16,0	20,5 +/- 4,3
67	35,4 +/- 7,4	37,2 +/- 7,8	-
68	28,0 +/- 5,9	-	-

	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3.PN</b>
ID	[mBq/d]	[mBq/d]	[mBq/d]
69	42,5 +/- 8,9	33,6 +/- 7,1	26,5 +/- 5,6
70	41,9 +/- 8,8	106 +/- 22	57,8 +/- 12,1
71	4,2 +/- 1,2	3,7 +/- 1,0	5,8 +/- 1,6
72	28,1 +/- 5,9	37,6 +/- 7,9	5,8 +/- 1,6
73	90,3 +/- 19,0	63,0 +/- 13,2	-
74	73,1 +/- 15,4	33,6 +/- 7,1	3,4 +/- 1,0
75	40,2 +/- 8,4	34,8 +/- 7,3	1,7 +/- 0,5
76	39,6 +/- 8,3	57,7 +/- 12,1	11,8 +/- 2,5
77	26,7 +/- 5,6	27,5 +/- 5,8	6,8 +/- 1,9
78	45,6 +/- 9,6	38,5 +/- 8,1	1,7 +/- 0,5
79	10,8 +/- 2,3	32,4 +/- 6,8	2,9 +/- 0,8
80	22,7 +/- 4,8	31,3 +/- 6,6	4,0 +/- 1,1
81	12,5 +/- 2,6	25,4 +/- 5,3	3,0 +/- 0,8
82	22,1 +/- 4,6	33,0 +/- 6,9	9,2 +/- 2,6
83	96,4 +/- 20,2	53,8 +/- 11,3	45,1 +/- 12,6
84	37,8 +/- 7,9	81,4 +/- 17,1	324 +/- 68
85	55,7 +/- 11,7	66,0 +/- 13,9	144 +/- 30
86	221 +/- 46	214 +/- 45	395 +/- 83
87	86,4 +/- 18,1	87,9 +/- 18,5	61,7 +/- 13,0
89	94,7 +/- 19,9	78,3 +/- 16,4	50,1 +/- 10,5
90	53,4 +/- 11,2	27,5 +/- 5,8	39,8 +/- 8,4
91	42,9 +/- 9,0	85,5 +/- 18,0	39,8 +/- 8,4
92	38,5 +/- 8,1	26,2 +/- 5,5	72,8 +/- 15,3
93	33,5 +/- 7,0	12,7 +/- 2,7	17,8 +/- 3,7
94	41,3 +/- 8,7	6,1 +/- 1,3	-
95	32,0 +/- 6,7	1,1 +/- 0,2	12,8 +/- 2,7
96	29,5 +/- 6,2	25,7 +/- 5,4	-
97	69,8 +/- 14,7	-	-
98	17,1 +/- 3,6	22,5 +/- 4,7	94,5 +/- 19,8
99	9,7 +/- 2,0	46,5 +/- 9,8	45,6 +/- 9,6
100	9,2 +/- 1,9	26,8 +/- 5,6	57,6 +/- 12,1
101	24,2 +/- 5,1	21,8 +/- 4,6	53,3 +/- 11,2
102	25,1 +/- 5,3	59,2 +/- 12,4	212 +/- 44
103	25,1 +/- 5,3	22,9 +/- 4,8	55,6 +/- 11,7
104	14,2 +/- 3,0	27,2 +/- 5,7	71,6 +/- 15,0
105	30,5 +/- 6,4	56,9 +/- 11,9	-
106	7,1 +/- 1,5	20,1 +/- 4,2	70,6 +/- 14,8

### 3 Spezifische Aktivität von $^{226}\text{Ra}$ und $^{210}\text{Pb}$ im Haar

#### 3.1 $^{226}\text{Ra}$ im Haar

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	1.PN	2.PN	3. PN
ID	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
1	1,0 +/- 0,4	-	11,0 +/- 3,9
4	-	<1	-
6	<1	-	-
7	<1	<1	<1
8	<1	-	5,7 +/- 2,0
9	<1	-	1,1 +/- 0,4
10	<1	-	17,4 +/- 6,1
11	<1	-	26,5 +/- 9,3
12	<1	-	47,8 +/- 16,8
13	1,0 +/- 0,4	-	20,1 +/- 7,1
14	<1	-	<1
15	<1	-	-
16	<1	-	23,2 +/- 8,1
17	<1	-	-
18	<1	-	12,8 +/- 4,5
19	<1	-	-
20	<1	<1	-
21	0,8 +/- 0,3	<1	-
22	<1	<1	-
23	<1	<1	-
24	<1	<1	-
26	6,6 +/- 2,3	<1	-
27	4,8 +/- 1,7	<1	1,0 +/- 0,4
28	6,0 +/- 2,1	<1	-
29	1,0 +/- 0,4	<1	13,7 +/- 4,8
30	5,9 +/- 2,1	<1	-
31	<1	2,9 +/- 1,0	<1
32	<1	3,5 +/- 1,2	<1
33	<1	<1	-
34	-	<1	9,1 +/- 3,2

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
35	14,5 +/- 5,1	1,0 +/- 0,4	<1
36	-	12,4 +/- 4,4	-
37	<1	-	0,8 +/- 0,3
38	5,7 +/- 2,0	-	12 +/- 4,2
39	<1	1,0 +/- 0,4	1,0 +/- 0,4
40	<1	1,0 +/- 0,4	4,6 +/- 1,6
41	5,2 +/- 1,8	1,0 +/- 0,4	9,1 +/- 3,2
42	1,0 +/- 0,4	-	10,1 +/- 3,6
43	1,0 +/- 0,4	1,0 +/- 0,4	1,0 +/- 0,4
44	<1	-	8,4 +/- 2,9
45	<1	-	16,5 +/- 5,8
46	<1	5,9 +/- 2,1	-
47	0,6 +/- 0,2	3,8 +/- 1,3	1,0 +/- 0,4
48	1,2 +/- 0,4	2,8 +/- 1,0	-
49	6,3 +/- 2,2	-	-
50	5,1 +/- 1,8	-	-
51	15,3 +/- 5,4	-	-
52	-	3,5 +/- 1,2	-
53	8,2 +/- 2,9	-	-
55	<1	<1	<1
56	8,4 +/- 2,9	-	1,0 +/- 0,4
57	1,7 +/- 0,6	1,0 +/- 0,4	6,4 +/- 2,2
58	5,8 +/- 2,0	1,0 +/- 0,4	-
59	<1	-	-
60	3,7 +/- 1,3	1,0 +/- 0,4	1,0 +/- 0,4
61	1,0 +/- 0,4	1,0 +/- 0,4	2,5 +/- 0,9
62	66,9 +/- 23,5	1,0 +/- 0,4	1,0 +/- 0,4
63	3,1 +/- 1,1	-	-
64	1,5 +/- 0,5	-	-
65	21,1 +/- 7,4	1,9 +/- 0,7	2,7 +/- 0,9
66	0,2 +/- 0,1	1,0 +/- 0,4	2,0 +/- 0,7
67	9,9 +/- 3,5	-	-
68	2,5 +/- 0,9	-	-

	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$	$a_i(^{226}\text{Ra})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
69	32,9 +/- 11,6	6,3 +/- 2,2	-
70	17,3 +/- 6,1	1,0 +/- 0,4	<1
71	18,0 +/- 6,3	-	1,0 +/- 0,4
72	20,6 +/- 7,2	-	1,0 +/- 0,4
73	11,2 +/- 3,9	-	-
74	12,4 +/- 4,4	-	-
75	12,4 +/- 4,3	4,6 +/- 1,6	-
76	0,3 +/- 0,1	1,3 +/- 0,5	-
77	15,1 +/- 5,3	2,0 +/- 0,7	-
78	11,1 +/- 3,9	-	-
79	<1	-	-
80	<1	-	-
81	4,7 +/- 1,6	-	-
82	9,4 +/- 3,3	-	-
83	6,3 +/- 2,2	3,8 +/- 1,3	1,0 +/- 0,4
84	0,8 +/- 0,3	9,9 +/- 3,5	4,2 +/- 1,5
85	16,6 +/- 5,8	0,6 +/- 0,2	3,4 +/- 1,2
86	26,5 +/- 9,3	2,8 +/- 1,0	<1
87	0,3 +/- 0,1	-	-
89	<1	-	-
90	<1	6,6 +/- 2,3	-
91	<1	0,7 +/- 0,2	-
92	<1	-	<1
93	<1	-	17,9 +/- 6,3
94	<1	-	-
95	<1	<1	-
96	<1	2,4 +/- 0,8	-
97	<1	+/- 0,0	-
98	<1	2,3 +/- 0,8	3,2 +/- 1,1
100	<1	0,3 +/- 0,1	1,0 +/- 0,4
101	<1	0,8 +/- 0,3	-
102	<1	-	-

### 3.2 $^{210}\text{Pb}$ im Haar

	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
1	4,4 +/- 1,2	-	5,2 +/- 1,5
2	1,0 +/- 0,3	-	-
3	1,8 +/- 0,5	-	-
4	0,7 +/- 0,2	1,7 +/- 0,5	6,1 +/- 1,7
7	3,4 +/- 1,0	2,6 +/- 0,7	1,9 +/- 0,5
8	-	-	8,0 +/- 2,2
9	-	-	1,9 +/- 0,5
10	8,7 +/- 2,4	-	0,9 +/- 0,3
11	3,0 +/- 0,8	-	2,6 +/- 0,7
12	-	-	1,7 +/- 0,5
13	2,9 +/- 0,8	-	1,4 +/- 0,4
14	1,8 +/- 0,5	-	2,0 +/- 0,6
15	1,8 +/- 0,5	-	90,0 +/- 25,2
16	-	-	13,6 +/- 3,8
17	-	-	4,9 +/- 1,4
18	-	-	2,3 +/- 0,6
19	-	-	28,0 +/- 7,8
20	4,4 +/- 1,2	-	-
22	6,7 +/- 1,9	-	5,6 +/- 1,6
24	9,4 +/- 2,6	-	-
26	30,3 +/- 8,5	36,9 +/- 10,3	19,2 +/- 5,4
27	5,8 +/- 1,6	10,7 +/- 3,0	10,4 +/- 2,9
28	1,7 +/- 0,5	-	-
29	-	2,7 +/- 0,8	2,8 +/- 0,8
31	4,1 +/- 1,1	7,0 +/- 2,0	5,3 +/- 1,5
32	- -	4,9 +/- 1,4	2,5 +/- 0,7
33	1,0 +/- 0,3	0,8 +/- 0,2	-
34	-	4,4 +/- 1,2	7,5 +/- 2,1

	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$	$a_i (^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
35	8,0 +/- 2,2	2,4 +/- 0,7	1,8 +/- 0,5
37	4,7 +/- 1,3	-	7,3 +/- 2,0
38	-	-	3,6 +/- 1,0
39	1,1 +/- 0,3	12,3 +/- 3,4	3,1 +/- 0,9
40	0,9 +/- 0,3	-	1,3 +/- 0,4
41	6,4 +/- 1,8	6,3 +/- 1,8	1,3 +/- 0,4
42	-	5,7 +/- 1,6	2,9 +/- 0,8
43	-	2,2 +/- 0,6	2,3 +/- 0,6
44	5,0 +/- 1,4	-	5,7 +/- 1,6
45	-	5,8 +/- 1,6	4,9 +/- 1,4
46	1,7 +/- 0,5	-	-
47	3,7 +/- 1,0	6,2 +/- 1,7	8,5 +/- 2,4
48	4,6 +/- 1,3	-	-
49	1,8 +/- 0,5	3,1 +/- 0,9	-
50	-	3,3 +/- 0,9	1,5 +/- 0,4
51	-	3,5 +/- 1,0	1,3 +/- 0,4
52	-	2,4 +/- 0,7	-
53	5,5 +/- 1,5	-	-
55	-	-	10,0 +/- 2,8
56	39 +/- 10,9	-	6,8 +/- 1,9
57	8,5 +/- 2,4	5,3 +/- 1,5	14,0 +/- 3,9
58	-	2,3 +/- 0,6	-
59	3,2 +/- 0,9	-	-
60	8,3 +/- 2,3	8,8 +/- 2,5	27,2 +/- 7,6
61	5,8 +/- 1,6	23,0 +/- 6,4	7,6 +/- 2,1
62	21,1 +/- 5,9	26,7 +/- 7,5	18,1 +/- 5,1
63	-	4,5 +/- 1,3	-
65	-	1,8 +/- 0,5	2,7 +/- 0,8
66	-	12,4 +/- 3,5	19,2 +/- 5,4
67	-	16,2 +/- 4,5	-

	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$	$a_i(^{210}\text{Pb})$
	<b>1.PN</b>	<b>2.PN</b>	<b>3. PN</b>
ID	[mBq/g]	[mBq/g]	[mBq/g]
69	-	<b>4,2</b> +/- 1,2	<b>19,2</b> +/- 5,4
70	-	<b>1,9</b> +/- 0,5	<b>11,0</b> +/- 3,1
71	-	<b>4,0</b> +/- 1,1	<b>11,0</b> +/- 3,1
72	-	-	<b>8,2</b> +/- 2,3
73	-	<b>3,4</b> +/- 1,0	-
75	-	<b>2,1</b> +/- 0,6	<b>6,6</b> +/- 1,8
76	-	<b>4,8</b> +/- 1,3	-
77	-	<b>3,4</b> +/- 1,0	<b>13,4</b> +/- 3,8
78	-	-	<b>6,3</b> +/- 1,8
79	<b>5,1</b> +/- 1,4	-	<b>5,9</b> +/- 1,7
80	-	-	<b>12,5</b> +/- 3,5
82	<b>0,8</b> +/- 0,2	-	<b>26,1</b> +/- 7,3
83	<b>8,3</b> +/- 2,3	<b>7,2</b> +/- 2,0	<b>1,8</b> +/- 0,5
84	-	<b>5,2</b> +/- 1,5	<b>17,8</b> +/- 5,0
85	<b>7,1</b> +/- 2,0	<b>21,0</b> +/- 5,9	<b>37,6</b> +/- 10,5
86	<b>245</b> +/- 69	<b>106</b> +/- 30	<b>224</b> +/- 63
87	<b>6,0</b> +/- 1,7	<b>17,8</b> +/- 5,0	<b>9,8</b> +/- 2,7
89	<b>25,5</b> +/- 7,1	<b>14,4</b> +/- 4,0	<b>19,1</b> +/- 5,3
90	<b>44,2</b> +/- 12,4	-	<b>62,0</b> +/- 17,4
91	<b>6,8</b> +/- 1,9	-	<b>39,7</b> +/- 11,1
93	-	-	<b>18,0</b> +/- 5,0
95	<b>1,7</b> +/- 0,5	-	<b>8,8</b> +/- 2,5
96	<b>5,3</b> +/- 1,5	<b>6,8</b> +/- 1,9	-
97	<b>14,4</b> +/- 4,0	-	-
98	<b>2,5</b> +/- 0,7	<b>6,4</b> +/- 1,8	<b>12,8</b> +/- 3,6
100	<b>2,5</b> +/- 0,7	<b>6,7</b> +/- 1,9	<b>5,7</b> +/- 1,6
101	<b>3,4</b> +/- 1,0	<b>6,4</b> +/- 1,8	-
102	<b>1,6</b> +/- 0,4	<b>3,3</b> +/- 0,9	<b>13,6</b> +/- 3,8
103	<b>6,1</b> +/- 1,7	-	<b>26,9</b> +/- 7,5
104	<b>7,5</b> +/- 2,1	<b>9,1</b> +/- 2,5	<b>14,8</b> +/- 4,1
105	<b>5,4</b> +/- 1,5	<b>7,2</b> +/- 2,0	-
106	<b>12,2</b> +/- 3,4	<b>16,5</b> +/- 4,6	<b>10,1</b> +/- 2,8