

Abschlussbericht zum Vorhaben 3614S40015

Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz

Martina Schuster

Helmut Schöllnberger

Vladimir Spielmann

Stefan Keller

Jochen Tschiersch

unter Mitarbeit von

Evgeni K. Garger

Institute of Radioecology, 01033 Kiew, Ukraine

Auftragnehmer:

Helmholtz Zentrum München

Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt GmbH

Institut für Strahlenschutz

Ingolstädter Landstraße 1, 85764 Neuherberg

Laufzeit: 1.01.2015 bis 30.06.2017

„Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftragnehmerin übereinstimmen.“

Zusammenfassung

Im Vorhaben „Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz“ wurden Aerosol-Aktivitätskonzentrationen an Arbeitsplätzen gemessen. Diese wurden ergänzt um die Bestimmung von Aerosolparameter, die eine genauere Spezifizierung der Exposition erlauben. An drei verschiedenen Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen zu erwartenden Expositionen wurden Aerosolproben genommen: Tschernobyl (Bau des Reaktorschutzbäudes), Fukushima (Dekontaminationsarbeiten) und eine Schweißwerkstatt (Wolfram-Inertgas-Schweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden). Als Arbeitsprozesse wurden untersucht: Fundierungsarbeiten, Straßenbau, Anlieferung von Baumaterial, Kranarbeiten (Tschernobyl); Grasschneiden, Bodenabtragen, Abrißarbeiten (Fukushima) und Aluminium-Schweißen (Schweißwerkstatt). Es wurde Gesamtstaub, größenfraktionierter Staub und größenfraktionierter, personenbezogener Staub gesammelt. Die Löslichkeit in simulierter Lungenflüssigkeit wurde an Gesamtstaubproben getestet.

Mit Hilfe der Software „IMBA Professional“ wurden aus den Messungen in Tschernobyl und Fukushima die Dosiskoeffizienten berechnet. Als Input wurden dabei Parameter verwendet, die zuvor aus den Löslichkeitsexperimenten sowie aus den Berechnungen der Größenverteilungen der Aktivität ermittelt wurden. Die berechneten Koeffizienten der effektiven Dosis für das Radionuklid ^{137}Cs liegen im Bereich von $4,98 \text{ nSvBq}^{-1}$ bis $38,2 \text{ nSvBq}^{-1}$ und sind vergleichbar mit den Referenzwerten der ICRP für die Partikel der Größe $1 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ und verschiedene Absorptionstypen. Die experimentellen Löslichkeitsparameter deuten für ^{137}Cs auf einen signifikanten Beitrag des Absorptionstyp S hin, was einen höheren Dosiskoeffizienten nach sich ziehen würde. Hier sind noch weitere Messungen an Luftstaubproben zur Löslichkeit in Lungenflüssigkeit angeraten.

Summary

In the project „Improvement of inhalation dosimetry at work places“ aerosol activity concentrations were measured at three work places: Chernobyl (construction of the new shelter), Fukushima (decontamination works) and a welding workshop (tungsten inert gas welding). In addition, aerosol parameters were determined which enable a more detailed specification of the exposure. Working processes investigated had been: foundation, roadworks, delivery of construction material, carnage (Chernobyl); cutting of gras, removal of top soil, demolition of houses (Fukushima); welding of aluminium (welding workshop). Bulk samples, size fractionated samples and personal size fractionated samples had been collected. Solubility in simulated lung fluid was tested at bulk samples.

With the Software „IMBA Professional“ the dose coefficients were determined from the measurements in Chernobyl and Fukushima. Input parameters were applied according the results of the solubility tests and size distribution measurements. The calculated coefficients of the effective dose range between $4,98 \text{ nSvBq}^{-1}$ and $38,2 \text{ nSvBq}^{-1}$ and are comparable to the reference values of ICRP for the particle size $1 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$ at different solubility types. The experimental data suggest a significant contribution of type S, which would result in higher dose coefficients. More measurements on dust samples for their solubility in lung fluid are recommended.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitende Planungen und Festlegungen für das Vorhaben	6
1.1	Auswahl von Arbeitsplätzen.....	6
1.2	Auswahl der Methoden.....	8
1.3	Abstimmung mit dem Auftraggeber.....	9
2	AMAD-Messungen und Filterprobensammlung.....	10
2.1	Auswahl von Arbeitsplätzen und Probenahmemethoden.....	10
2.2	Durchführung von Filter- und AMAD-Probenahmen	11
2.3	Zusammenfassung	21
3	Auswertung der Filterproben	25
3.1	Auswertung von Filterproben.....	25
3.2	Löslichkeitsversuche	39
3.2.1	Test auf Reproduzierbarkeit.....	39
3.2.2	Bestimmung der Löslichkeit bei verschiedenen Tätigkeiten während des Baus des neuen Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes	47
3.3	Auswertung von Impaktorproben.....	54
3.4	Auswertung von Filterproben zur retrospektiven Bestimmung der Größenverteilung	72
3.5	Zusammenfassung	79
4	Vergleich der Dosis mit Standardannahmen mit der Dosis unter Verwendung der ermittelten Aerosoleigenschaften	81
4.1	Methodenbeschreibung.....	81
4.2	Dosiskoeffizienten aus spezifischen Aerosolparametern	85
4.3	Vergleich mit ICRP-Referenz Dosiskoeffizienten	92
4.4	Schlussfolgerungen.....	93
4.5	Zusammenfassung	94
5	Literaturverzeichnis.....	95

1 Vorbereitende Planungen und Festlegungen für das Vorhaben

Arbeitspaket 1 des Vorhabens „Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz“ hatte die Aufgabe vorbereitende Planungen und Festlegungen für das Vorhaben durchzuführen. Bei der Vielzahl unterschiedlicher Arbeitsplätze, an denen die Beschäftigten mit partikelgebundenen, luftgetragenen Radionukliden potentiell exponiert werden können (BfS/BMU 2015, SSK 1997), ist eine Auswahl nach Relevanz und praktischen Möglichkeiten zu treffen. Ferner ist über die anzuwendenden Methoden zu Messung von Aktivitätskonzentration, Größenverteilung und Löslichkeit der relevanten Radionuklide zu entscheiden. Die Festlegungen wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt.

1.1 Auswahl von Arbeitsplätzen

Anhand einer Literaturrecherche wurden zuerst verschiedene Arbeitsplätze identifiziert, in denen eine berufliche Strahlenexposition durch Inhalation ausreichend langlebiger, partikulärer Radionuklide möglich ist. Wesentliche Quellen sind die Stellungnahme der Strahlenschutzkommission des BMU zu diesem Thema (SSK, 1997), der UNSCEAR Bericht über die Expositionen der Öffentlichkeit und Arbeiter (UNSCEAR 2008), die jährlichen Unterrichtungen durch die Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung (z. B. BfS/BMU, 2015), die Schlussberichte früherer BfS/BMU-geförderter Forschungsvorhaben (Sternad et al., 2000, Schäfer und Seitz, 2005, Frasch et al, 2015) und Fachartikel in internationalen Journalen (Garger et al., 2006, Garger et al., 2013).

Die Relevanz der identifizierten Arbeitsplätze wird bewertet anhand der Anzahl der exponierten Personen, der Häufigkeit der Arbeitsprozesse, bei denen es zu einer Strahlenexposition durch Inhalation kommen kann, und der erwarteten Höhe der Exposition entsprechend der Literaturrecherche oder durch eigene Messungen.

Als Arbeitsplätze mit potentiell relevanten Expositionen wurden insbesondere folgende Bereiche identifiziert: Kerntechnik, Umgang mit natürlich vorkommenden radioaktiven Material (NORM) und Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen. Im den Bereichen NORM und sonstige radioaktive Stoffe wurde zur Bewertung besonders die Referenz SSK (1997) herangezogen.

In der Kerntechnik erscheinen diese Arbeiten als besonders relevant:

- der Rückbau kerntechnischer Anlagen,
- die Fertigung von Brennelementen,
- Bauarbeiten in kontaminierten Gebiet,
- Dekontaminationsarbeiten.

Im Umgang mit NORM sind folgende berufliche Tätigkeiten betroffen:

- Reinigungsarbeiten an Rohrleitungen und Wärmetauschern in Anlagen der tiefen Geothermie (Degering und Köhler, 2009),
- der untertägige Abbau von Erzen,
- die Sanierung von Betriebsgeländen, auf denen in der Vergangenheit mit NORM-Stoffen gearbeitet wurde (Gellermann, 2012).

Im Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen wurden folgende beruflichen Tätigkeiten als potetentiell exponiert identifiziert:

- die Verwendung Thoriumoxid-dotierter Schweißelektroden beim Wolfram-Inertgas-Schweißen (Sternad et al., 2000),
- die Herstellung thoriertes Glühkathoden für Gasentladungslampen (Sternad et al., 2000).

Zusätzliche Kriterien für die Auswahl der Arbeitsplätze sind die praktischen Voraussetzungen unter denen überhaupt Messungen und Aerosolsammlungen während der Arbeitsprozesse möglich sind. Ferner gilt zu berücksichtigen, inwieweit die beruflichen Tätigkeiten auch in Zukunft für Deutschland Relevanz besitzen.

Von den als relevant bewerteten Arbeitsplätzen wurden die folgenden drei ausgewählt:

- 1.) Besonders viele Arbeitskräfte sind Expositionen bei der Verwendung von Schweißelektroden ausgesetzt, die mit Thoriumoxid dotiert sind. Die dabei abgeschätzten Expositionen liegen oft weit oberhalb von 1 mSv/a (SSK, 1997). Deswegen sollen Arbeitsplätze untersucht werden, bei denen solche Schweißelektroden eingesetzt werden.
- 2.) Ein Arbeitsgebiet, das in der Zukunft in Deutschland an Bedeutung zunehmen wird, ist der Rückbau von Kernkraftwerken. Deshalb sollen Arbeitsprozesse untersucht werden, die beim Rückbau signifikante Expositionen erwarten lassen. Alternativ wurde die Möglichkeit diskutiert, im kontaminierten Gebiet von Fukushima begleitende Messungen zu den dortigen umfangreichen Dekontaminationsarbeiten durchzuführen.
- 3.) Eine Abschätzung welche Arbeiten in kontaminierten Anlagen mit welchen potentiellen internen Expositionen verbunden sein können, kann auch für deutsche Arbeitskräfte Relevanz erhalten. Deshalb sollen solche Arbeitsprozesse am Bauplatz des neuen Containments des havarierten Reaktors von Tschernobyl in Zusammenarbeit mit einem ukrainischen Kooperationspartnern studiert werden.

Die drei gewählten Gebiete unterscheiden sich in ihren Expositionscharakteristika und umfassen Arbeitsplätze mit Grobstaub bzw. mit feinen Partikeln, mit eher löslichen bzw. unlöslichen Verbindungen sowie Arbeitsplätze in der kerntechnischen Industrie bzw. solche, in denen mit anderen radioaktiven Stoffen umgegangen werden. Insgesamt werden mindestens sechs Arbeitsprozesse in den drei Arbeitsfeldern studiert.

1.2 Auswahl der Methoden

Am Institut für Strahlenschutz des Helmholtz Zentrums München sind Methoden für die retrospektive Bestimmung der Aktivitäts-Größenverteilung und der Löslichkeit von Radionukliden aus Aerosolfilterproben entwickelt und für verschiedene Fragestellungen angewendet worden (Meisenberg und Tschiersch, 2015). Diese Methoden werden auch in diesem Forschungsvorhaben angewendet.

Für die stationäre Sammlung von Aerosol auf Faserfiltern ist ein mobiles Gerät im Institut vorhanden. Zur Bestimmung der Aerosolgrößenverteilung ist ein Kaskadenimpaktor in verschiedenen Vorhaben eingesetzt worden (Klassifizierung nach aerodynamischem Durchmesser, Berner et al., 1997). Diese Gerät benötigt allerdings eine leistungsstarke Vakuumpumpe. Alternativ ist eine Diffusionsbatterie (Klassifizierung nach thermodynamischem Durchmesser) vorhanden. Die erwähnten Geräte sind für das Vorhaben nutzbar.

Für die personengetragene Aerosolsammlung ist über eine internationale Kooperation ein mehrstufiger Kaskadenimpaktor bekannt geworden, der für die Fragestellung gut geeignet erscheint. Dieser Marple Personal Impactor wurde inzwischen beschafft und steht für die Messungen zur Verfügung.

1.3 Abstimmung mit dem Auftraggeber

Mit dem Auftraggeber wurde am BfS-Standort Neuherberg am 9. Juli 2015 ein Abstimmungsgespräch durchgeführt. Dabei wurden die relevanten Arbeitsplätze für diese Studie diskutiert und über die Auswahl Übereinstimmung erzielt. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit diskutiert, im kontaminierten Gebiet von Fukushima begleitende Messungen zu den dortigen umfangreichen Dekontaminationsarbeiten durchzuführen. Dies wurde durch den Abschluss eines Kooperationsvertrags im Juni 2016 von Auftragnehmer mit Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Sector of Fukushima Research and Development, Miharu, Japan möglich. Es wurde entschieden, diese einmalige Gelegenheit zu nutzen und dafür die Untersuchungen beim Rückbau von Kernkraftwerken zurückzustellen.

2 AMAD-Messungen und Filterprobensammlung

In Arbeitspaket 2 (AP 2) des Vorhabens „Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz“ werden bei den in AP 1 näher definierten Arbeitsprozessen Proben des radioaktiven Aerosols gesammelt. Dafür werden sowohl integrierende Sammler (Bulk-Filter Sammler) benutzt, als auch größenfraktionierende Sammler, die eine Bestimmung der Aktivitätsgrößenverteilung (AMAD und Streubreite) erlauben. Ziel ist es, auch aus den Filterproben eine Aktivitätsgrößenverteilung zu generieren. Grundlage dazu ist die Arbeit von Meisenberg und Tschiersch (2015).

2.1 Auswahl von Arbeitsplätzen und Probenahmemethoden

Im Berichtszeitraum wurden an folgenden Arbeitsplätzen Aerosolproben genommen, bzw. Vorbereitungen zur Probenahme getroffen, die potentiell mit Radionukliden exponiert sein können:

- a) Bauarbeiten in kontaminierten Gebiet (Bau des neuen Tschernobyl Reaktor-schutzgebäudes);
- b) Dekontaminationsarbeiten in wieder zu besiedelndem Gebiet von Fukushima;
- c) Wolfram-Inertgas-Schweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden;

Als Probenahmemethoden wurden folgende Verfahren eingesetzt:

- Sammeln von Gesamtstaub (bulk sampler);
- Sammeln von größenfraktionierten Aerosolproben (low pressure impactor)
- Personenbezogenes Sammeln von größenfraktionierten Aerosolproben (Marple personal impactor).

2.2 Durchführung von Filter- und AMAD-Probenahmen

Im Folgenden werden die vier Probenahmeorte beschrieben, denen unterschiedliche Arbeitsprozesse und Expositionen der Arbeiter zu Grunde liegen. Von den ersten beiden liegen bereits Filter und Impaktorproben zur Analyse vor.

a. Bauarbeiten in kontaminierten Gebiet (Bau des neuen Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes)

Die Probenahme wurde vom Kooperationspartner Institut für Radioökologie, Kiew, der als Unterauftragnehmer in das Vorhaben integriert ist, im Jahr 2015 durchgeführt. In Abb. 2.1 ist eine Grundrisskizze der Baustelle des Reaktorschutzgebäudes („Shelter“) mit den Standorten der Aerosolsammelgeräte wiedergegeben. Es wurden sowohl Filtersammler als auch Impaktoren eingesetzt. Details zu den benutzten Messgeräten GRAD-1.8 (Filtersammler) und HiVol-Impaktor Andersen finden sich in Garger et al., 1997. Einen Eindruck von den Sammelorten geben auch die Fotos in Abb. 2.2 und Abb. 2.3.

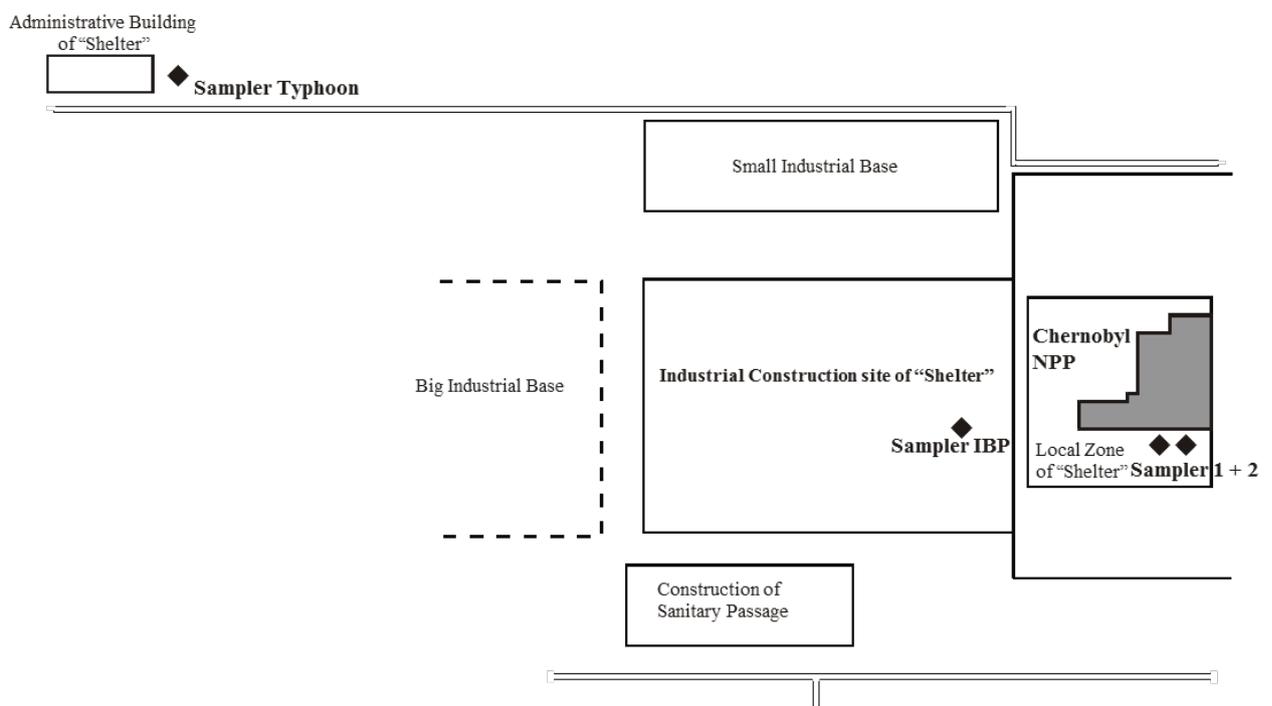


Abb. 2.1 Standort der Aerosolsammelgeräte auf dem Bauplatz neben dem havarierten KKW Tschernobyl.

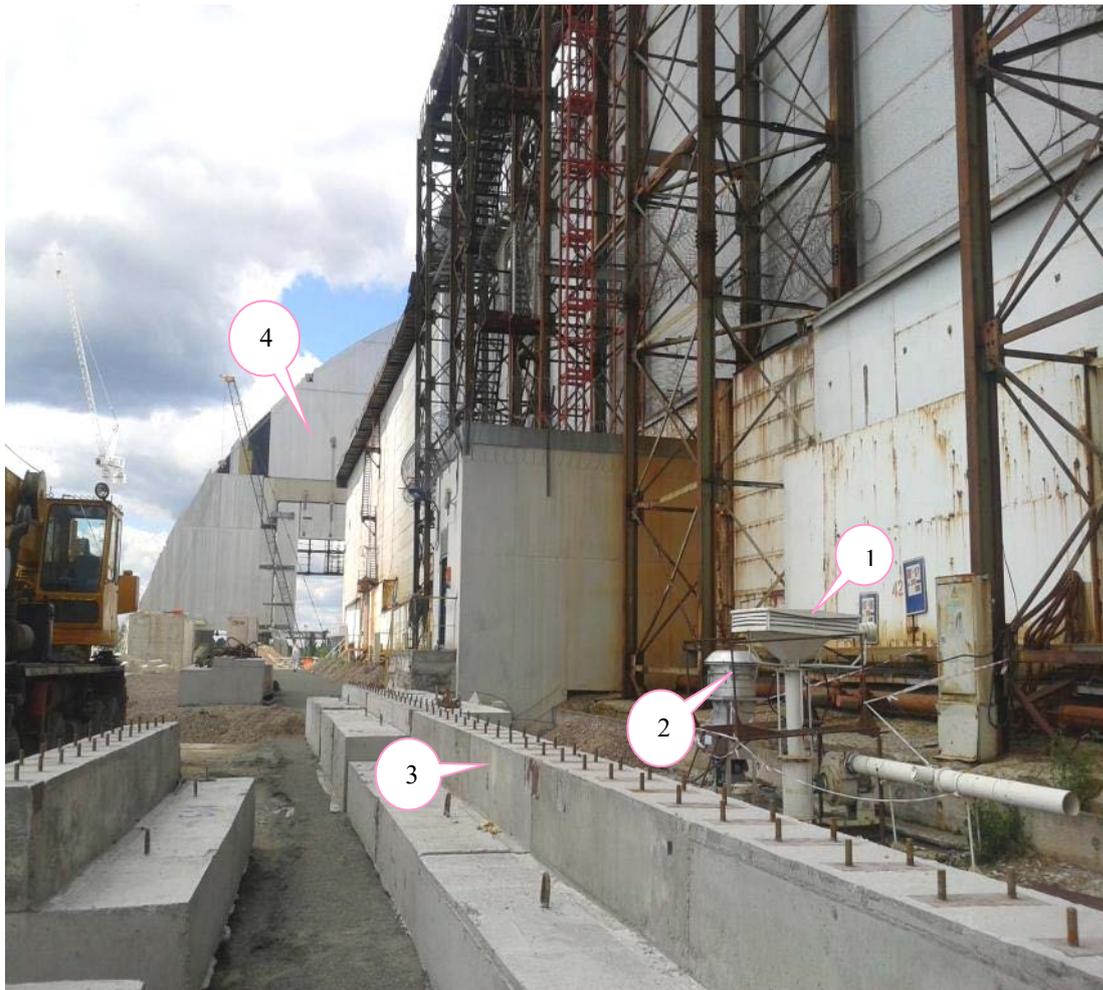


Abb. 2.2 Foto der Sammelgeräte und Sammelorte neben dem Tschernobyl KKW. Der Sammler 1 ist ein Filtersammler (GRAD-1.8), der Sammler 2 ein Impaktor (Andersen PM10). Bei 3 ist ein Teil des künftigen Fundaments und bei 4 die Einhausung (ARCH) zu sehen.



Abb. 2.3 Filterwechsel bei den Aerosolsammelgeräten am Tschernobyl KKW.

Die Probensammelgeräte wurden bei verschiedenen Arbeitsprozessen und meteorologischen Bedingungen an der Baustelle des Shelters betrieben. In Tabelle 2.1 sind die Sammelperioden zusammen mit den wichtigsten meteorologischen Parametern angegeben. Im Anhang 2.1 findet sich eine Zusammenstellung der Aktivitäten an der Baustelle an den verschiedenen Probenahmeterminen zusammen mit meteorologischen Beobachtungen.

Tabelle 2.1 Die Sammelperioden der parallelen Probenahme Filtersammler/Impaktor mit den wichtigsten meteorologischen Parametern.

Datum		Sammel- period [Tage]	Meteorologische Parameter					
von	bis		Wind- richtung	Wind- geschwindigkeit [m/s]	Max. Wind- geschw., [m/s]	Wind- richtung max.Wind	Rel. Feuchte, [%]	Niederschlag [mm]
01.07.2015	07.07.2015	6	O	2,1	6,1	NO	50	0,8
07.07.2015	14.07.2015	7	N	2,6	5,8	NO	64	1,0
14.07.2015	21.07.2015	7	N, NO	2,3	6,5	NO	61	0,2
21.07.2015	28.07.2015	7	O, S	2,3	6,3	S	61	0,0
28.07.2015	04.08.2015	7	NW, SW	1,8	5,1	S	58	0,0
04.08.2015	11.08.2015	7	SW	1,8	5,2	S	43	0,0
11.08.2015	18.08.2015	7	O, SO	2,2	5,6	N	53	0,2
18.08.2015	26.08.2015	8	SO	1,7	5,5	O	52	0,0
26.08.2015	01.09.2015	6	S	1,9	5,5	NO	51	0,0
01.09.2015	09.09.2015	8	SW	2,3	5,7	NW	68	16,0
09.09.2015	15.09.2015	6	NO	2,2	4,3	O	70	3,8
15.09.2015	22.09.2015	7	S	2,4	6,3	O	69	26,8
22.09.2015	29.09.2015	7	O, N	2,0	4,8	N	68	8,8
29.09.2015	07.10.2015	8	N, W	2,1	5,0	NO	66	0,0
07.10.2015	13.10.2015	6	NO, O	1,6	4,6	NO	57	0,0
13.10.2015	20.10.2015	7	O, S	1,9	5,1	SO	61	0,0
20.10.2015	27.10.2015	7	SO, NW	2,7	7,1	SO	84	33,8
27.10.2015	03.11.2015	7	NW, SW	1,9	5,1	NW	68	0,2

b. Dekontaminationsarbeiten im wieder zu besiedelndem Gebiet von Fukushima

Im Jahr 2016 konnte ein Kooperationsvertrag mit der Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Fukushima Environmental Safety Center abgeschlossen werden mit dem Ziel, die Exposition von Arbeitern abzuschätzen, die mit Dekontaminationsarbeit nach dem Reaktorunglück von Fukushima Daiichi beschäftigt sind. Dabei sollen sowohl Filter- als auch Impaktormessungen durchgeführt werden. Bisher wurden zwei Messkampagnen organisiert.

Im Januar 2016 wurde in der Fukushima Provinz ein Parkgebiet „M“ dekontaminiert. Diese Arbeiten konnten im Zeitraum 25. – 29. Januar 2016 mit gleichzeitigen Aerosolprobenahmen begleitet werden. Es wurde ein Aerosolfiltersammler (SIBATA HV-1000R) von JAEA mit Filtermaterial (G3 Faserfilter) vom HMGU betrieben. Dieses Material kann zur retrospektiven Größenbestimmung (AMAD) des Aerosols benutzt werden (Meisenberg and Tschiersch, 2015). In Abb. 2.4 ist das Gebiet unter Dekontamination dargestellt, in Abb. 2.5 ist der Filtersammler aufgestellt am Rand des Parks zu sehen und in Abb. 2.6 ein Arbeiter mit seinem Bagger, der die oberste Bodenschicht abträgt. In Tabelle 2.2 sind die Probenahmebedingungen bei der Messkampagne in M, Januar 2016 im Detail zusammengestellt.



Abb. 2.4 Das Parkareal „M“, das im Januar 2016 dekontaminiert wurde.



Abb. 2.5 Filtersammler am Rand des Parks M.



Abb. 2.6 Dekontamination durch Abtragen der Vegetation und der obersten Bodenschicht.

Eine zweite Messkampagne wurde im Dezember 2016 in der Evakuierungszone von Fukushima durchgeführt. Dabei wurden zeitgleich ein Filtersammler (SIBATA HV-1000R) von JAEA und ein Kaskaden-Impaktor (Berner et al., 1979; LPI 30, Fa. Hauke, Gmunden) von HMGU betrieben. Wegen Problemen mit der Spannungsversorgung der Pumpe des Impaktors wurden nur Messungen in am Rande der Siedlung T vorgenommen (Abb. 2.7). Der Messort lag am Rand eines Parks bei einem Teich. Wohnbebauung findet sich im Westen der Messstelle, dort wurden die Gärten dekontaminiert und ein baufälliges Haus abgerissen. Abb. 2.8 zeigt die Probenahmegeräte im Betrieb. In Tabelle 2.3 sind die Probenahmebedingungen bei der Messkampagne in T, Dezember 2016 im Detail zusammengestellt.



- Ort der Probenahme
- Dekontaminationsgebiet

Abb. 2.7 Der Probenahmeort „T“ etwa 7 km südwestlich des Fukushima Daiichi Kernkraftwerks. Hier werden die Vorgärten der Häuser dekontaminiert und baufällige Gebäude abgerissen.



Abb. 2.8 Kaskaden-Impaktor (LPI 30, Fa. Hauke, Gmunden) für größenfraktioniertes Sammeln (links) und HiVol-Filtersammler (rechts im Vordergrund) zum Sammeln des Gesamtstaubes am Rand einer Wohnsiedlung.

Tabelle 2.2

Zusammenstellung der Probenahmebedingungen bei der Messkampagne „M“, Januar 2016.

Date (2016)	Filter No.	Duration	min	Volume (m ³)	Dose rate (μSv/h)	Wind direction	Wind strength	Weather	Note
Sampling position: A									
25. Jan. Work type: grass cutting									
	1	12:00 – 13:15	75	63.7	0.71	W/NW	vs	cloudy, small amount of snow	12:00 – 13:15 Lunch break
	2	13:17 – 15:30	133	135	0.71	W/NW	vs	cloudy, small amount of snow	
26. Jan. Work type: grass cutting and gathering, soil stripping									
	3	08:30 – 12:00	150	211.6	0.72	W	w	sunny	10:15 – 10:35 Coffee break
	4	12:06 – 13:00	54	59.9	0.72	WNW	w	sunny	12:00 – 12:55 Lunch break
	5	13:13 – 16:43	210	209.9	0.77	WNW	w		Work at 3 m distance from the HV for 20 m
Sampling position: B									
28. Jan. Work type: Grass cutting and gathering, soil stripping and gathering									
	6	9:10 – 12:07	177	177.2	0.59 0.66	SE W	vw w	sunny, 9:45 - cloudy	9:50 – 10:10 Coffee break
	7	12:13 – 13:02	49	49.3	-		vw	sunny, partially cloudy	11_55 – 13:07 Lunch break
	8	13:04 – 16:32	208	207.9	-	WNW	w s	cloudy, partially sunny	15:15 – 15:30 Coffee break
Sampling position: A									
28. Jan. Work type: no work									
	9	8:15 – 12:03	228	227.8	-	NW	m s	wet snow later snow	No work took place

Winds: vs (very strong), s (strong), m (middle), w (weak), vw (very weak)

-: not measured

Tabelle 2.3

Zusammenstellung der Probenahmebedingungen bei der Messkampagne „T“, Dezember 2016.

Date (2016)	Sample No.	Duration	h	Volume (m ³)	Dose rate (μSv/h)	Wind direction	Wind strength	Weather	Note
15. Dec. Work type: decontamination of gardens, demolition of house in ca. 500 m distance									
	TI01	9:35 – 15:52	6,28	10.90	2.26	SWW	m (4 m/s)	cloudy	Air and soil parameter sensors installed
	TF01	9:37 – 15:48	6.18	372.8	2.26				
16. Dec. Work type: demolition of house in ca. 500 m distance									
	TI02	09:15 – 15:45	6.5	11.27	2.3	SWW	vw	Overcast, later sunny	
	TF02	09:20 – 15:50	6.5	388.0		- NWW	from noon: gusty winds, s		
19. Dec. Work type: demolition of house in ca. 500 m distance									
	TI03	09:07:30 – 15:33:30	6.43	11.16	2.3	SWW	m	Cloudy, later sunny	
	TF03	09:14 – 15:32	6.3	378.1					

TI: impactor sampling

TF: filter sampling

Wind strength: vs (very strong), s (strong), m (middle), w (weak), vw (very weak)

c. Wolfram-Inertgas-Schweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden

In der Zentralwerkstatt des HMGU wurden Messungen beim Schweißen von Aluminium mit ThO_2 dotierten Elektroden durchgeführt. Dafür wurden zwei unterschiedliche Elektroden beschafft: Mit einer Dotierung von 2% (WT-20) und 4% (WT-40), wobei letzteres die maximal übliche Dotierung ist. Eingesetzt wurden ein Filtersammler, ein Impaktor und ein personengetragener Impaktor (Abb. 2.9). Um die Inhalation von Schweißrauch und Stäuben, die Thoriumoxid enthalten, zu vermeiden, ist auf eine optimale Absaugung zu achten. Zusätzlich trugen die Schweißer eine Atemschutzmaske der Klasse FFP3. Da das Schweißgerät bei der Verwendung nach einiger Zeit sehr heiß wird, musste das Schweißen zwischendurch immer wieder unterbrochen werden, um das Gerät auskühlen zu lassen. In diesen Pausen wurden die Probensammler ausgeschaltet.

Auf das Anschleifen der Elektroden musste auf Grund fehlender Absaugvorrichtung aus Sicherheitsgründen verzichtet werden. Die Probenahmebedingungen sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

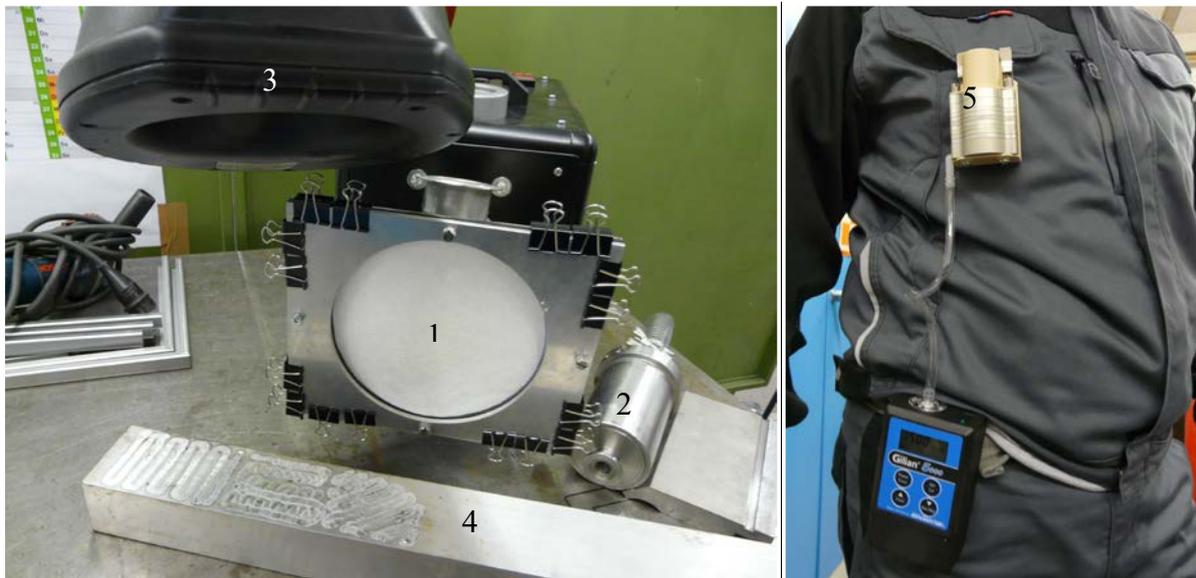


Abb. 2.9 Versuchsaufbau für das Schweißen mit ThO_2 dotierten Elektroden: Filtersammler (1), Impaktor für größenfraktioniertes Sammeln (2), Absaugung (3), Aluminiumblock (4) und personengetragener Impaktor (5)

Table 2.4

Zusammenstellung der Probenahmebedingungen beim Schweißen mit Thoriumoxid-dotierten Elektroden

Bezeichnung	Datum	Sammelzeitraum	Effektive Sammelzeit	Elektrode	Verwendete Geräte
Test 1	02.03.2017	8:00 – 14:00 Uhr	138 min	WT-40	Filtersammler
Test 2	09.03.2017	13:47 – 16:37 Uhr	64 min	WT-40	Filtersammler, Impaktor, personengetragener Impaktor
Test 3	20.03.2017	8:03 – 13:46 Uhr	100 min	WT-40	Filtersammler, Impaktor, personengetragener Impaktor

2.3 Zusammenfassung

An drei verschiedenen Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen zu erwartenden Expositionen wurden Aerosolproben genommen: Tschernobyl, Bau des Reaktorschutzgebäudes; Fukushima, Dekontaminationsarbeiten; Schweißwerkstatt, Wolfram-Inertgasschweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden. Als Arbeitsprozesse wurden untersucht: Fundierungsarbeiten, Straßenbau, Anlieferung von Baumaterial, Kranarbeiten (Tschernobyl); Grasschneiden, Bodenabtragen, Abrißarbeiten (Fukushima); Aluminium-Schweißen (Schweißwerkstatt). Aus Sicherheitsgründen konnten keine Proben beim Anschleifen der Elektroden gesammelt werden (Schweißwerkstatt). Es wurde Gesamtstaub, größenfraktionierter Staub und größenfraktionierter, personenbezogener Staub gesammelt.

Anhang 2.1

Zusammenstellung der Aktivitäten an der Baustelle des Tschernobyl Shelter an den verschiedenen Probenahmeterminen.

Date	Big industry place		Berna (South side machine hall)		Meteorological conditions
	The description of actions	Azimuth, removal*	The description of actions	Azimuth, removal *	
01.07.2015 Photo-502	1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. Ground working out – foundation ditches under power maintenance. 3. Active movement of transport.	W 100–500 m	1. Installation of a protective wall from lead blocks. 2. It is sharp concrete – an aperture of 2×3 m in a southern wall machine hall.	E 50–70 m	Cloudy, dry, warmly, +20°C, Wind SW, 1–2 m/s
07.07.2015 Photo-516, 519, 522	1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. Excavations of ground–building of time access roads. Delivery of rubble, concrete blocks.	W 100–500 m	1. Delivery, rubble lay-out (heavy transport). 2. Delivery, loading-unloading of concrete blocks (cranes).	S–SW 20–70 m	Clearly, cloudlessly, dry, hot, +26°C, Wind W, 2–4 m/s
14.07.2015 Photo-526- Photo-532	1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. It is a lot of movement of heavy transport (concrete, metal designs). 3. Excavations – building of time access roads. Delivery of rubble, concrete blocks.	W 100–500m	1. Pour out of road metal an access road, its lay-out (bulldozer) along all length of a southern wall machine hall.	SW–W 10–70 m	Cloudy, damp, pools after rain, +17°C, Wind NW, 1–2 m/s
21.07.2015 Photo-534, 535, 536	1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Excavations – building of time access roads. Delivery of rubble, concrete blocks.	SW–W 100–500 m	1. Beginning of works on packing of ferro-concrete blocks on шпелочное the basis – under packing of rails for the big crane have begun. 2. Work of the automobile crane.	S–SW 10–30 m	Variable overcast, dry, warmly, +20°C, Wind 3, 2–3 m/s
28.07.2015	1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Excavations – packing of pipes under подводу the electric power.	S–W 100–500 m	1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks on шпелочное the basis, packing of rails for the big crane. 2. Work of the automobile crane.	S–SW 10–50 m	Clearly, plumose clouds, dry, warmly, +20°C, Wind SE, 0–1 m/s
04.08.2015 Photo-543- Photo-549	1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Excavations – a construction of concrete connecting wells under power cables.	W–SW 100–500 m	1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks under packing of rails for the big crane. 2. On SV coal machine hall – concrete works – erection, operational development of an entry sluice on territory Bern.	S–SW 20–70 m, SW 70 m	Clearly, cloudlessly, dry, hot, +22°C, Wind E, 0–1 m/s

Date	Big industry place		Bema (South side machine hall)		Meteorological conditions
	The description of actions	Azimuth, removal*	The description of actions	Azimuth, removal *	
11.08.2015	1. Planned installation works on НБК (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Excavations – construction continuation in foundation ditches of concrete distributive wells under power cables.	S–SW 100–500 m	1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks under packing of rails for the big crane. 2. On SV coal machine hall – concrete works – erection, operational development of an entry sluice on territory Берны.	S-SW 20–70 m, SW 70 m	Clearly, cloudlessly, dry, a heat, +23°C, Wind S, 0–1 m/s, sometimes calm
18.08.2015 Photo-557	1. Planned installation works on НБК (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Excavations – construction continuation in foundation ditches of concrete distributive wells under power cables.	S–SW 100–500 m	1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks under packing of rails for the big crane. 2. On SV coal machine hall – concrete works – erection, operational development of an entry sluice on territory Берны. 3. The beginning of installation of the crane on rails, transportation of details.	S–SW 30–70 m, SW 70 m 5–20 m	Clearly, insignificant overcast, chilly, +20°C, Wind E, 2–3 m/s
26.08.2015 Photo-561- Photo-562	1. Planned installation works on НБК (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Filling trench sand and rubble.	S–SW 200–500 m	1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks under packing of rails for the big crane. 2. On SV coal machine hall – concrete works – erection, operational development of an entry sluice on territory Bem. 3. Installation of the basis of the big crane.	S–SW 30–70 m, 5–10 m	Cloudy, a smoke, chilly, +20°C, Wind S, 0–1 m/s Cloudy, a smoke, chilly, +20°C, Wind E, 0–1 m/s
01.09.2015 Photo-564 Photo-567	1. Planned installation works on НБК (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Filling trenches with sand and rubble. 4. Dismantling of auxiliary designs.	S–SW 200–500 m, SW, 500 m	1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks under packing of rails for the big crane. 2. On SV coal machine hall – concrete works – erection, operational development of an entry sluice on territory Bem. 3. Continuation of installation of the crane.	S–SW 10–70 m	Clearly, cloudlessly, dry, warmly, +22°C, Wind SW, 0–1 m/s
09.09.2015 Photo-574 Photo-575	1. Assembly works on erection НБК (ARCH). 2. Auxiliary (local) works, including earthen. 3. Transport works (bring of sand, rubble, concrete, designs), their loading-unloading.		1.. 1. Continuation of installation of rails (packing concrete blocks). 2. Escalating of height of the big crane by means of a truck crane.		Clearly, insignificant overcast, chilly +13°C, Wind W, 1–2 m/s

Date	Big industry place		Bema (South side machine hall)		Meteorological conditions
	The description of actions	Azimuth, removal*	The description of actions	Azimuth, removal*	
15.09.2015 Photo-591- Photo-594	1. Auxiliary (local) works, including earthen (on small sites of soil). 2. Transport works (bring of sand, rubble, concrete, designs), their loading-unloading.		1. Continuation of installation of rails (concrete blocks-bases under the big crane. 2. Escalating of height of the big crane by means of a truck crane.		Clearly, cloudlessly, dry, chilly +15°C, Wind ES, 2–3 m/s
22.09.2015 Photo-605 Photo-606	1. 1. Assembly (planned) works on erection HBK (ARCH). 2. Excavations around HBK (ARCH) - moving of rubble, sand. 3. Transport works (heavy transport) bring designs. 4. Crane works – rise metal construction.		1. Escalating of height of the big crane by means of a truck crane. 2. The beginning of building of a sluice (a sluice roof) on SW to a corner machine hall (crane and installation works – installation of overlapping).		Clearly, cloudlessly, traces of precipitation, chilly +13°C, Wind NW, 0–1 m/s
29.09.2015 Photo-649 Photo-651	1. Installation works (ARCH designs inside and at end faces). 2. Small (local) excavations around HBK (ARCH). 3. Transport works (heavy transport) bring designs, their unloading.		1. The termination of assemblage of the big crane. Electric works (connection, operational development) – nearby. 2. Works on installation of a roof of a sluice. 3. Works on concrete rail under the ARCH.	W 50–70 m E 30 m	Clearly, cloudlessly, dry, chilly +10°C, Wind N, 1–2 m/s
07.10.2015	1. Installation works (the ARCH design). 2. Insignificant (local) excavations around HBK (ARCH). 3. Transport works (heavy transport) подвоз designs, their unloading.		1. 1. Definitive installation of the big crane. 2. Tests of the big crane. 3. Works on installation of a concrete sluice on SW to a corner machine hall		Clearly, cloudlessly, dry, chilly +6°C, Wind N, 1–2 m/s
13.10.2015	1. Installation works (the ARCH design). 2. Insignificant (local) excavations around HBK (ARCH). 3. Transport works (heavy transport) подвоз designs, their unloading.		1. Definitive installation of the big crane. 2. Tests of the big crane. 3. Works on installation of a concrete sluice on SW to a corner machine hall		Clearly, cloudlessly, dry, chilly +7°C, Wind W, 0–1 m/s
27.10.2015	1. Installation works (the ARCH design). 2. Insignificant (local) excavations around HBK (ARCH). 3. Transport works (heavy transport), unloading.		1. Definitive installation of the big crane. 2. Tests of the big crane. 3. Works on installation of a concrete sluice on SW to a corner machine hall.		Clearly, cloudy, dry, chilly +6°C, Wind NW, 1–2 m/s
28-29.10.2015			1. Dismantle, descent of a part of a roof (opening machine hall) – the western part for the width of 12-15 m on all length.		

* Concerning arrangement sampler «GRAD-1.8» and impactor «ANDERSEN». S-South, W-West, E-East, N-North

3 Auswertung der Filterproben

In Arbeitspaket 3 (AP 3) des Vorhabens „Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz“ werden für die in AP 1 näher definierten Arbeitsprozesse und in AP 2 detailliert dargestellten Probenahmen die entsprechenden Messungen vorgestellt und ihre Auswertung diskutiert. Zur Probenahme wurden sowohl integrierende Sammler (Bulk-Filtersammler) benutzt, als auch größenfraktionierende Sammler, die eine direkte Bestimmung der Aktivitätsgrößenverteilung (AMAD und Streubreite) erlauben. Es werden zuerst die Auswertungen der Filter auf ihre Gesamtaktivität dargestellt. Danach werden die Messungen der größenfraktionierten Proben vorgestellt. Schließlich werden die Filterproben aufgearbeitet und retrospektiv eine Größenverteilung des darin gesammelten Aerosols generiert. Grundlage dazu ist die Arbeit von Meisenberg und Tschiersch (2015).

3.1 Auswertung von Filterproben

Im Berichtszeitraum wurden an folgenden potentiell mit Radionukliden exponierten Arbeitsplätzen Aerosolproben genommen und vermessen: Bauarbeiten in kontaminierten Gebiet (Bau des neuen Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes) und Dekontaminationsarbeiten in wieder zu besiedelndem Gebiet von Fukushima. Zu den Expositionen bei den Bauarbeiten am Tschernobyl Shelter liegt ein ausführlicher Bericht des Kooperationspartners Institut für Radioökologie, Kiew, der als Unterauftragnehmer in das Vorhaben integriert ist, vor. Ergänzend wurden Filterproben, die vom Institut für Radioökologie vor Ort genommen worden sind, dem HMGU für weitere Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Diese Auswertungen werden anschließend vorgestellt.

d. Bauarbeiten in kontaminierten Gebiet (Bau des neuen Tschernobyl Reaktor-schutzgebäudes)

Bericht Prof. Dr. E.K. Garger, Institut für Radioökologie, Kiew

1. Introduction

After nearly 30 years of the nuclear accident in Chernobyl, the former block 4 of the Chernobyl nuclear power plant (Ch.NPP) is the constant source of radionuclide emissions into the environment. Now going on is the building of the new confinement “Arch”. It is the second large source of the radioactive pollutants to the surface layer of the atmosphere. In this context it is necessary to study the secondary contamination of air with considerably loaded radioactive aerosol. It is necessary to perform measurements related to the characteristics of the radioactive aerosols: the volume activity of Cs-137 and Am-241, the distribution activity on size particle and measurement of the samples by autoradiography (to check for the presence of hot particles), estimation of the solubility of fuel particles (hot particles).

The estimation of the inhalation dose is important for understanding the possible radioactive conditions during the deconstruction of Nuclear Power Plants at the end of their operation.

The purpose of our work according to the technical conditions of the subcontract was:

1. Establishing and keeping contact to building companies that are active in highly contaminated parts of the exclusion zone, in particular in the context of the construction of the new shelter
 - Sampling of aerosol in the vicinity of or inside the Chernobyl Shelter
 - in immediate local and temporal relation to work activity, which is likely to increase the airborne concentration of radionuclides,
 - during at least two different working activities,
 - during different weather conditions for outdoor activities, if possible
2. Number of samples, which will be taken:
 - 6 filter samples, which will be shipped to Helmholtz-Zentrum München for determination of the activity size distribution (3 per work activity)
 - 6 filter samples for determination of the solubility of radionuclides (3 per work activity)
 - 6 series of impactor samples (3 per work activity)

3. Filter samples and impactor samples must be taken at the same work place at the same time (parallel sampling).
 - Documentation of the conditions of the conducted work activity, of environmental conditions and of the sampling conditions (sampled air volume among others)
 - Measurement of the samples by autoradiography (to check for the presence of hot particles) on filter samples and by gamma-spectrometry on filter and impactor samples
 - Determination of the solubility of sampled radionuclides from filter samples using appropriate radioanalytical methods (gamma-spectrometry, alpha-spectrometry, if necessary)

2. Basic information about release of radioactive aerosols from the “Shelter” in the past

After the construction of the “Shelter” at the end of 1986 scientific studies into its current internal processes and characteristics of radioactive aerosols released into the atmosphere were started [1-6]. As it was noticed in [1, 5], all aerosols from the Shelter may be divided into two classes: aerosol containing fine-dispersed particles of fuel matrix, which usually lacks volatile radionuclides and aerosols with radioactivity by adsorption of fragmented radionuclides. In [5] it is shown that contaminated air forms in space under the roof of object “Shelter” at the expense of coarse-suspended particles from AMAD about 5 microns. The conclusion about size of AMAD particles which equal 6 - 9 microns and are capable for resuspension under intensive mechanical impact is also provided in that work. The integrated reserve of fuel dust (dust at the expense of fuel) counts about 5 tones, where about 100kg could be assigned to potential contamination through resuspension.

The conditions during the construction of the Shelter did not allow to create a completely pressure-tight structure. Technological and structural apertures providing the release of radioactive aerosol into the environment were constructed. Measurements showed that during 1990 and 1993 the radionuclides released from these apertures amounted to a maximum of $1,11 \cdot 10^{10} \text{ Bq year}^{-1}$.

The estimation of variability of volumetric activity, exhausted in surface layer of the atmosphere, has shown, that the amplitude of variability of ^{137}Cs and ^{241}Am concentrations in the air reached two multiples of magnitude, ^{90}Sr - 25 times, $^{239+240}\text{Pu}$ - 15 times. Considering this the maximal concentration of ^{137}Cs for short periods of observations may have several times higher quantities [8], i.e. the maximal average concentration for 1 - 2 h may reach quantity of $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Average for 2 - 5 days maximal volume activity measured with the help of the sampler Grad-1.8 have shown $142 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ for ^{137}Cs , $115 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ for ^{90}Sr and $3,55 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ for $^{239+240}\text{Pu}$. It can be utilized for an estimation of the inhalation dose for workers on site of object “Shelter”.

Average AMAD, defined on data of the years 1996 - 2003 and weighed by number of experiments, for ^{137}Cs were 2.6 microns, for ^{90}Sr – 2.8 microns, for $^{239+240}\text{Pu}$ – 4.4 microns, for ^{241}Am – 2.0 microns.

The measurements in the territory around the object “Shelter” have shown, that volume activities were high on short distances from it were, in particular at the southern part, and could reach 10 - 100 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. The measurements which have been carried out in 250 m from the object “Shelter” in a southwest direction, where civil work have been already started, have shown, that the volume activity reached 3-10 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ at usual meteorological conditions and without anthropogenic dust up rise.

On industrial site of object “Shelter”, the allocation of activity on particle size is quite often wide with considerable share of micron and submicron aerodynamic particles.

3. Common characteristics radiation conditions in air on the site of the Object "Shelter"

3.1 Temporal course of the volume activity ^{137}Cs and ^{241}Am , the deposition density, and dry deposition velocity of ^{137}Cs .

In Fig. 3.1 an increase of the Cs-137 volume concentrations is demonstrated in the building time of the Shelter of one order of magnitude in 2014 compared to 2002. It can be seen well that differences in the average concentration reached one order of magnitude at the identical period of sampling during the building works for the new confinement.

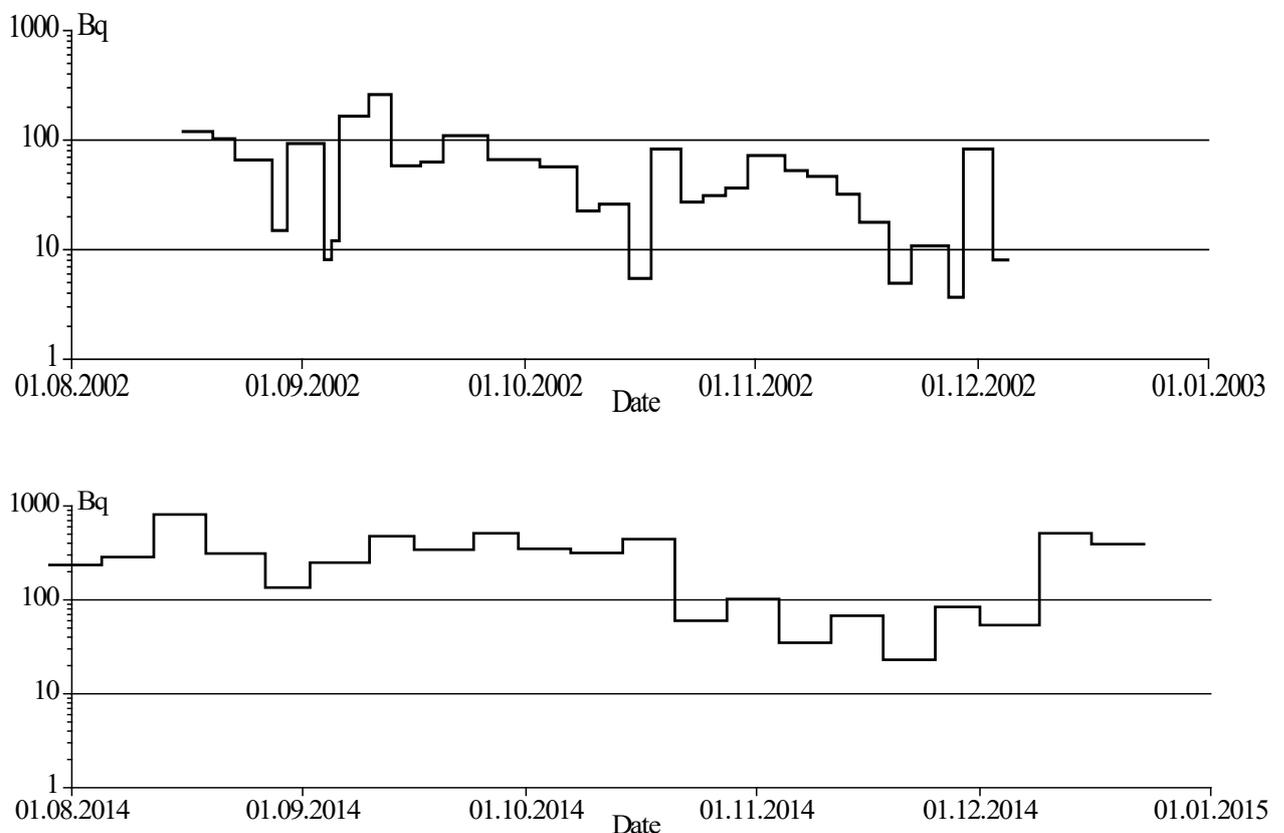


Fig. 3.1 Activity of ^{137}Cs measured by sampler GRAD-1.8 in the years 2002 and 2014.

In Fig. 3.2 is shown in one graph an increase of the Cs-137 volume concentrations with the onset of work in spring 2015 at two sites: the Shelter site and the administration site of the Object "Shelter". The different level of the ^{137}Cs volume concentrations is obvious. The temporal course of the volume activity of ^{137}Cs and ^{241}Am measured near the south wall of the machine hall of "Shelter"(sampler Grad 1.8) is shown in Fig 3. Again an increase is observed with the start of works.

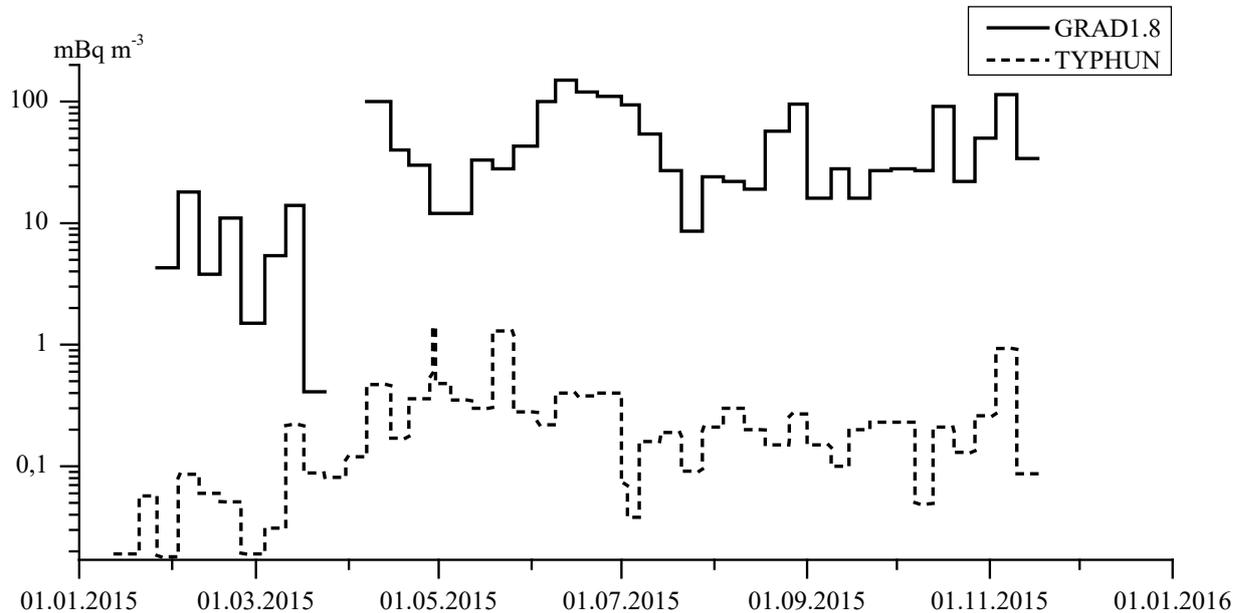


Fig. 3.2 Temporal course of the volume activity of ^{137}Cs measured near the south wall of the machine hall of the "Shelter" (Grad 1.8) and the administration building (sampler Typhoon).

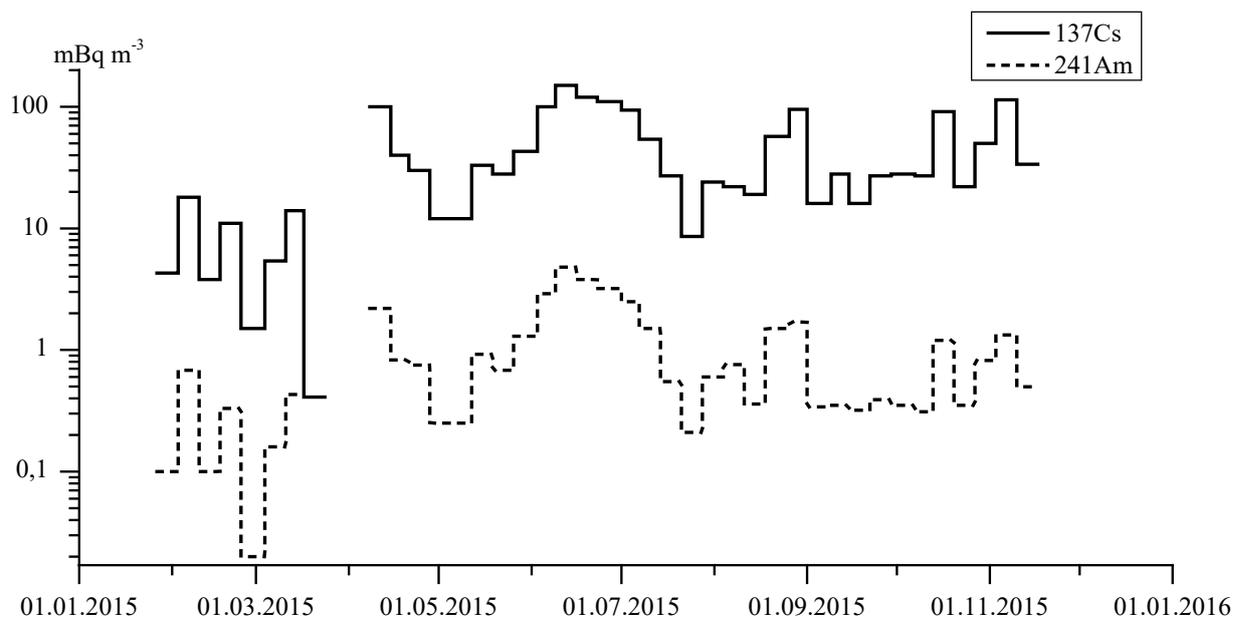


Fig. 3.3 Temporal course of the volume activity of ^{137}Cs and ^{241}Am measured near the south wall of the machine hall of the "Shelter" (sampler Grad 1.8).

The deposition density and the deposition velocity (dry deposition only) for Cs-137 are given in Figs. 4 and 5 for 2015. Increased values are observed in the working period, with a distinct maximum in June/July.

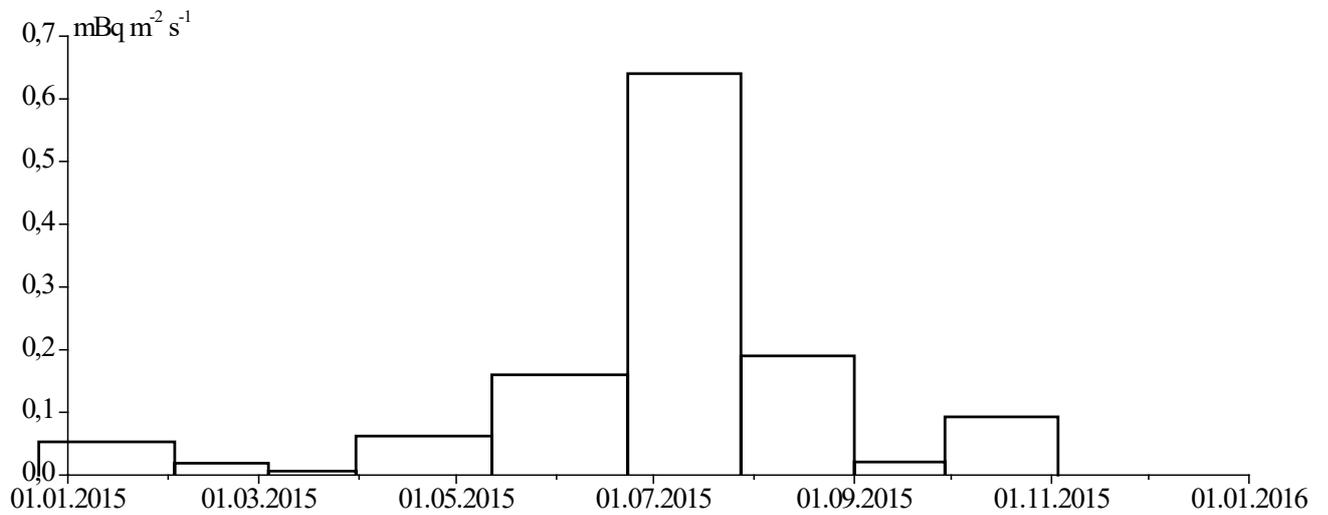


Fig. 3.4 Deposition density of ¹³⁷Cs (in mBq m⁻² s⁻¹) near the south wall of the machine hall of the "Shelter" with time.

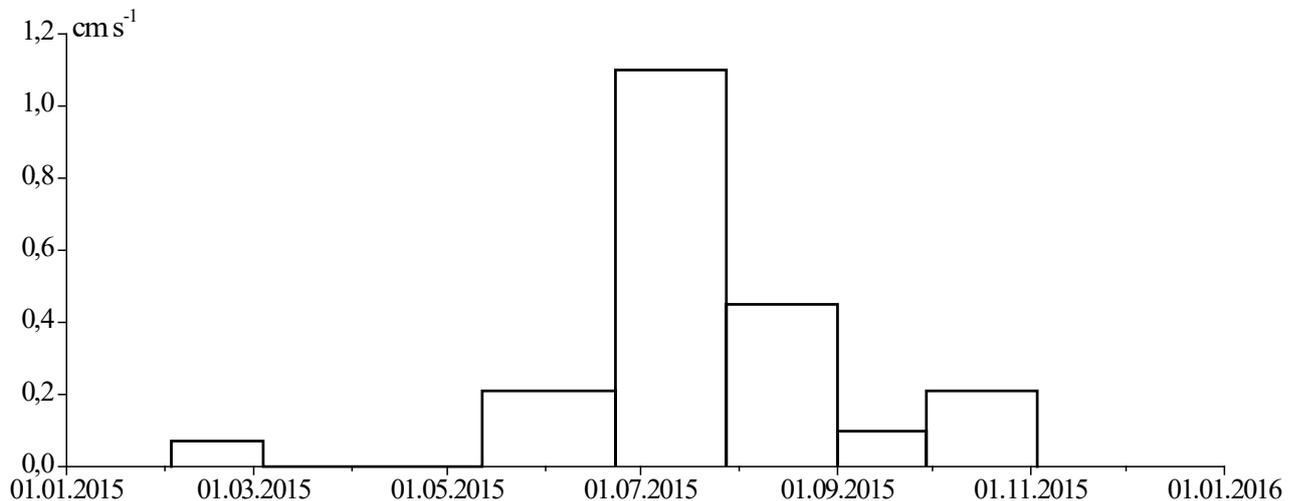


Fig. 3.5 Dry deposition velocity (in cm s⁻¹) of ¹³⁷Cs near the south wall of the machine hall of the "Shelter" with time.

3.2 Radiation characteristics of filters measured in the building of the new confinement in July-November 2015

3.2.1 Integral values of the volume concentration of the gamma-radiation nuclides measured by the sampler Grad 1.8.

In Table 3.1 and 3.2 are measurements presented of the total activity and the volume activity concentrations of several gamma-ray nuclides.

Table 3.1 Data of activity by the sampler GRAD-1.8

Date		Volume m ³	⁷ Be	¹³⁷ Cs	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	²¹⁰ Pb	²⁴¹ Am
from	to		Activity nuclides, Bq					
01.07.15	07.07.15	34346	308.6	3237	9.798	1.597	16.33	85.10
07.07.15	14.07.15	41690	240.6	2269.5	7.929	1.523	13.58	63.20
14.07.15	21.07.15	41423	296.1	1110.1	2.724		22.07	22.69
21.07.15	27.07.15	40384	305.1	348.8	0.949		20.54	8.350
27.07.15	04.08.15	40906	255.6	966.7	2.802		22.51	24.50
04.08.15	11.08.15	40319	393.9	893.4	3.283		36.23	30.70
11.08.15	18.08.15	40220	300.4	776.6	1.871		44.06	14.56
18.08.15	26.08.15	47134	408.4	2702	8.180		32.85	72.81
26.08.15	01.09.15	34352	208.0	3262	6.579		25.33	57.08
01.09.15	09.09.15	46610	209.8	729.0	1.824		48.52	15.69
09.09.15	15.09.15	35845	120.6	988.3	1.347		27.70	12.61
15.09.15	22.09.15	41376	218.4	642.3	1.364		63.71	13.25
22.09.15	29.09.15	41093	243.3	1096	1.959		82.06	16.05
29.09.15	07.10.15	46434	253.3	1318	1.911		66.88	16.07
07.10.15	13.10.15	34362	196.6	928.9	1.333		26.31	10.48
13.10.15	20.10.15	38895	270.4	3540	6.362		82.81	47.89
20.10.15	27.10.15	39904	67.27	861.2	1.816		38.56	13.93
27.10.15	03.11.15	40055	206.1	1992	4.005	0.742	44.50	32.83
03.11.15	10.11.15	38816	125.8	4438	6.530	1.592	41.98	51.74
10.11.15	17.11.15	35655	200.5	1198	2.162		12.39	17.75

Table 3.2 Data of the volume activity by the sampler GRAD-1.8

Date		Volume [m ³]	⁷ Be	¹³⁷ Cs	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	²¹⁰ Pb	²⁴¹ Am
from	to	Volume activity of radionuclides [Bq m ⁻³]						
01.07.15	07.07.15	34346	8.98E-03	9.42E-02	2.85E-04	4.65E-05	4.75E-04	2.48E-03
07.07.15	14.07.15	41690	5.77E-03	5.44E-02	1.90E-04	3.65E-05	3.26E-04	1.52E-03
14.07.15	21.07.15	41423	7.15E-03	2.68E-02	6.58E-05		5.33E-04	5.48E-04
21.07.15	27.07.15	40384	7.55E-03	8.64E-03	2.35E-05		5.09E-04	2.07E-04
27.07.15	04.08.15	40906	6.25E-03	2.36E-02	6.85E-05		5.50E-04	5.99E-04
04.08.15	11.08.15	40309	9.77E-03	2.22E-02	8.14E-05		8.99E-04	7.62E-04
11.08.15	18.08.15	40220	7.47E-03	1.93E-02	4.65E-05		1.10E-03	3.62E-04
18.08.15	26.08.15	47134	8.66E-03	5.73E-02	1.74E-04		6.97E-04	1.54E-03
26.08.15	01.09.15	34352	6.05E-03	9.50E-02	1.91E-04		7.37E-04	1.66E-03
01.09.15	09.09.15	46610	4.50E-03	1.56E-02	3.91E-05		1.04E-03	3.37E-04
09.09.15	15.09.15	35845	3.36E-03	2.76E-02	3.76E-05		7.73E-04	3.52E-04
15.09.15	22.09.15	41376	5.28E-03	1.55E-02	3.30E-05		1.54E-03	3.20E-04
22.09.15	29.09.15	41093	5.92E-03	2.67E-02	4.77E-05		2.00E-03	3.91E-04
29.09.15	07.10.15	46434	5.46E-03	2.84E-02	4.12E-05		1.44E-03	3.46E-04
07.10.15	13.10.15	34362	5.72E-03	2.70E-02	3.88E-05		7.66E-04	3.05E-04
13.10.15	20.10.15	38895	6.95E-03	9.10E-02	1.64E-04		2.13E-03	1.23E-03
20.10.15	27.10.15	39904	1.69E-03	2.16E-02	4.55E-05		9.66E-04	3.49E-04
27.10.15	03.11.15	40055	5.15E-03	4.97E-02	1.00E-04	1.85E-05	1.11E-03	8.20E-04
03.11.15	10.11.15	38816	3.24E-03	1.14E-01	1.68E-04	4.10E-05	1.08E-03	1.33E-03
10.11.15	17.11.15	35655	5.62E-03	3.36E-02	6.06E-05		3.47E-04	4.98E-04

*In the table are noted measurements which periods coincide or are close to the periods of measurements by Andersen PM10

4. Auto-radiography of filters of the sampler Grad 1.8 and impactor Andersen PM10

Radio-graphic processing have passed six filters RM10 (1/2 size) and twelve filter fragments of the sampler Grad 1.8 with the sizes 18 x 24 cm². Duration of an exposition was always 14 days. Because of non-uniformity of the distribution of large hot particles on the filter surface, deviations of the activity of its various fragments are possible. This fact is necessary to remember for interpretation the given measurements.

For Petryanov filters, a part of radiographic spots seem to be dimmed: formations with weak maximum blacking. Presumably, these are spots from particles being in a deeper of a layer of the fabric Petryanov or moved on a deeper fabric in the course of folding of the filter after its extraction from the sampler. Plus –it is possible that additional pollution occurred as filter extraction is made in a dirty zone. In any case such spots drop out of the radio-graphical analysis because of the weak level of blacking.

5. Dissolution kinetics of hot particles in the simulator of a pulmonary liquid

Fragments of filters exhibited on installation Grad 1.8 are taken for research of dissolution kinetics of hot particles. From a filter fragment g-27 exhibited from 01.07 till 07.07.2015 it has been cut down three spots of the diameter 47 mm (Fig. 3.6 a). The spot 1 is presented as sample 1, a sample 2 was from united spots 2 and 3. Sample 3 was taken as a spot from filter B3 exhibited on the same installation during a storm 11-17.03.2014 (Fig. 3.6 b and Tab. 3.3).

The chosen fragments were placed in cartridges between two membrane filters from nitrocellulose with diameter of 0.1 microns. The cartridges with the fragments of filters dip vertically in slim beakers specially made from polymethyl methacrylate (PMMA) to avoid formation of air under the membrane filters and to reduce the volume of the solution.

Table 3.3 General parameters of tests for kinetics research of hot particles dissolution in the simulator of a pulmonary liquid.

N ^o sample	code	Date	N ^o spots of cut	¹³⁷ Cs, Bq	²⁴¹ Am, Bq
1	g27	01-07.07.2015	1	16,42	0,87
2	g27	01-07.07.2015	2+3	51,33	2,43
3	B3	11-17.03.2014	1	369	31,3

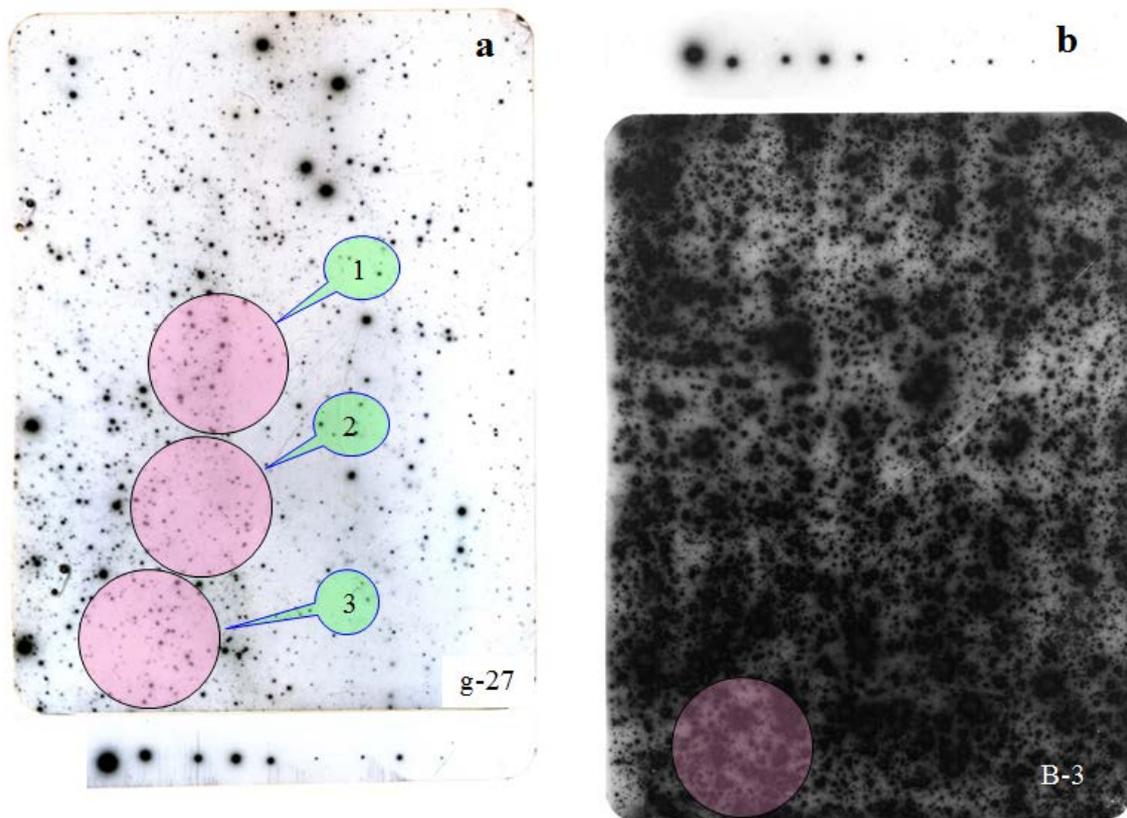


Fig. 3.6 Fragments of filters and spots of cuts for kinetics research of dissolution in Gamble liquid.

Table 3.4 Number of exchange of the extracting solution; time of extraction in hours.

№ extract	Number of sample		
	1	2	3
1	1,07	0,25	0,25
2	1,00	0,50	0,50
3	4,00	1,00	1,00
4	66,73	4,00	4,00
5	-	66,93	66,93

Measurements of the activity of gamma radiating ^{137}Cs and ^{241}Am were performed by means of a semi-conductor spectrometer with the cooled detector by GMX-30190-P-S, ORTEC Inc. In

Table 3.5 results of the measurements of the extracting solutions and the not dissolved rests in filters are listed.

Table 3.5 Results of measurements of gamma radiating nuclides in extracting solutions and not dissolved rests of filters.

№ sample	№ extract	exposition, h	¹³⁷ Cs, Bq	±	²⁴¹ Am, Bq	±
1	1	17,0	0,71	0,03	-*	-
	2	24,1	0,45	0,02	-	-
	3	18,8	0,35	0,02	-	-
	4	29,5	0,34	0,02	-	-
	filter	0,6	14,56	0,62	0,87	0,17
2	1	14,6	0,42	0,02	-	-
	2	17,4	0,64	0,02	-	-
	3	3,3	0,54	0,06	-	-
	4	2,8	0,54	0,06	-	-
	5	4,6	0,48	0,05	-	-
	filter	0,5	48,70	1,30	2,43	0,31
3	1	8,5	0,30	0,03	-	-
	2	1,8	2,66	0,17	-	-
	3	0,8	3,98	0,31	-	-
	4	1,1	7,96	0,36	-	-
	5	0,6	8,36	0,52	-	-
	filter	0,2	345	5,19	31,28	1,51

* - below detection limit.

Table 3.6 Time dependence of activity of not dissolved part of ^{137}Cs .

Sample №	Time, h	Activity of not dissolved part, Bq	Share of not dissolved part
1	0	16,4	1
	1,07	15,7	0,957
	2,07	15,3	0,929
	6,07	14,9	0,908
	72,8	14,6	0,887
2	0	51,3	1
	0,25	50,9	0,992
	0,75	50,3	0,979
	1,75	49,7	0,969
	5,75	49,2	0,958
	72,68	48,7	0,949
3	0	369	1
	0,25	368	0,999
	0,75	366	0,992
	1,75	362	0,981
	5,75	354	0,960
	72,68	345	0,937

Examples of the dissolution speed of caesium-137 of the allocated samples are presented in Figs. 3.7, 3.8, and 3.9.

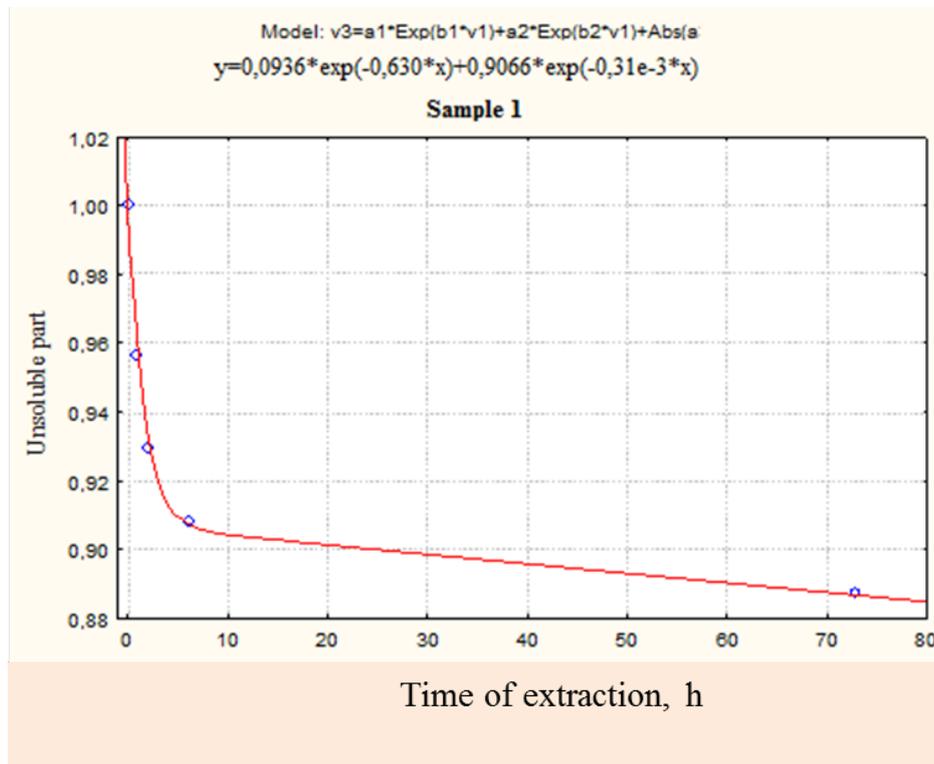


Fig. 3.7 Dissolution kinetics of ^{137}Cs .

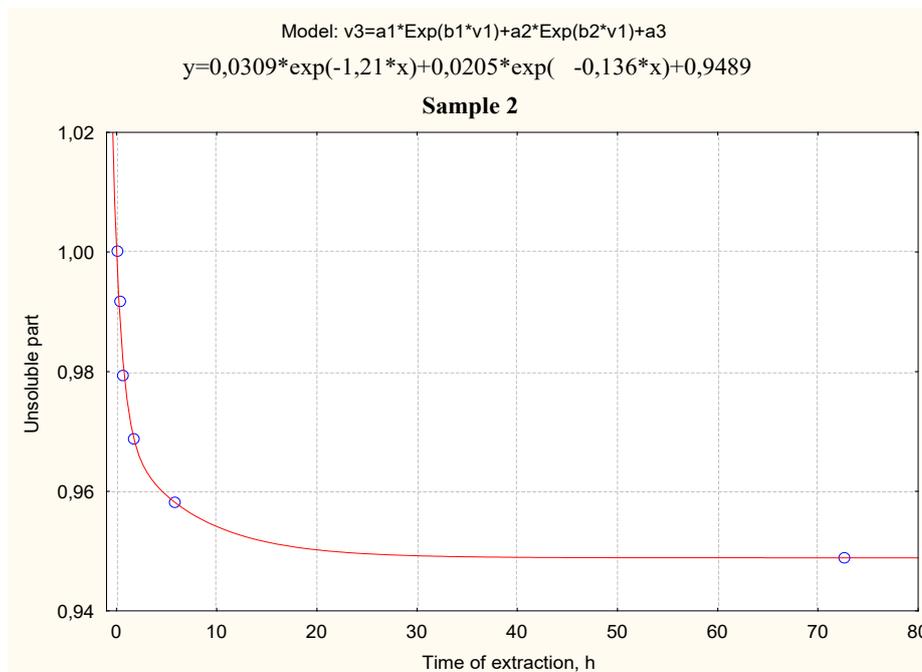


Fig. 3.8 Dissolution kinetics of ^{137}Cs from two fragments of filter sampled during 01. - 07.07.2015.

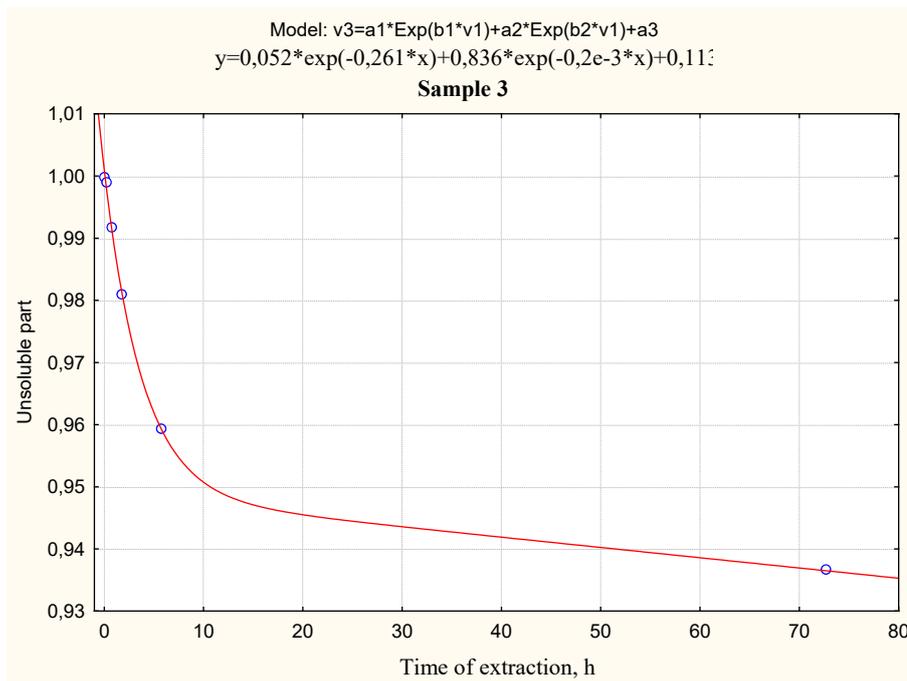


Fig. 3.9 Kinetics of dissolution of ^{137}Cs from fragment of filter during storm 11 - 17.03.2014.

Dissolution parameters obtained are presented in Table 3.7.

Table 3.7 Dissolution parameters for spot 1 (S1), spot 2+3 (S2) and spot 1+2+3 (S1 + S2) from filter g27. S3 is from filter B3 (see Fig. 3.6).

	S1	S2	S1+S2	S3
a1	0,0936	0,0309	0,0698	0,0524
b1	-0,6300	-1,2115	-0,6976	-0,2612
a2	0,9069	0,0205	0,9315	0,8356
b2	-0,0003	-0,1364	-0,0002	-0,0002
a3		0,9489		0,1131
T1	1,10	0,57	0,99	2,65
T2	2,0E+03	5,08	3,0E+03	4,0E+03

3.2 Löslichkeitsversuche

3.2.1 Test auf Reproduzierbarkeit

Um mit der bereits entwickelten Methode zur Bestimmung der Löslichkeit von ^{137}Cs vertraut zu werden, wurden Reproduzierbarkeitsversuche anhand dreier Luftfilter aus Tschernobyl durchgeführt. Zur Beurteilung der Ergebnisse werden die erhaltenen Werte mit denen von Dr. Garger aus Kiew verglichen. Bei den ausgesuchten Filtern handelt es sich um Filter mit unterschiedlichen Aktivitäten und Löslichkeit.

Für die Auswahl der zu analysierenden Filterfragmente wurden zunächst Autoradiogramme von den Filterproben aus Tschernobyl erstellt. Anhand dieser konnten je zwei geeignete Filterfragmente (Durchmesser 47 mm) für die Löslichkeitsversuche entnommen werden. Dabei war darauf zu achten, Bereiche mit gleichmäßig verteilter Aktivität auszusuchen.

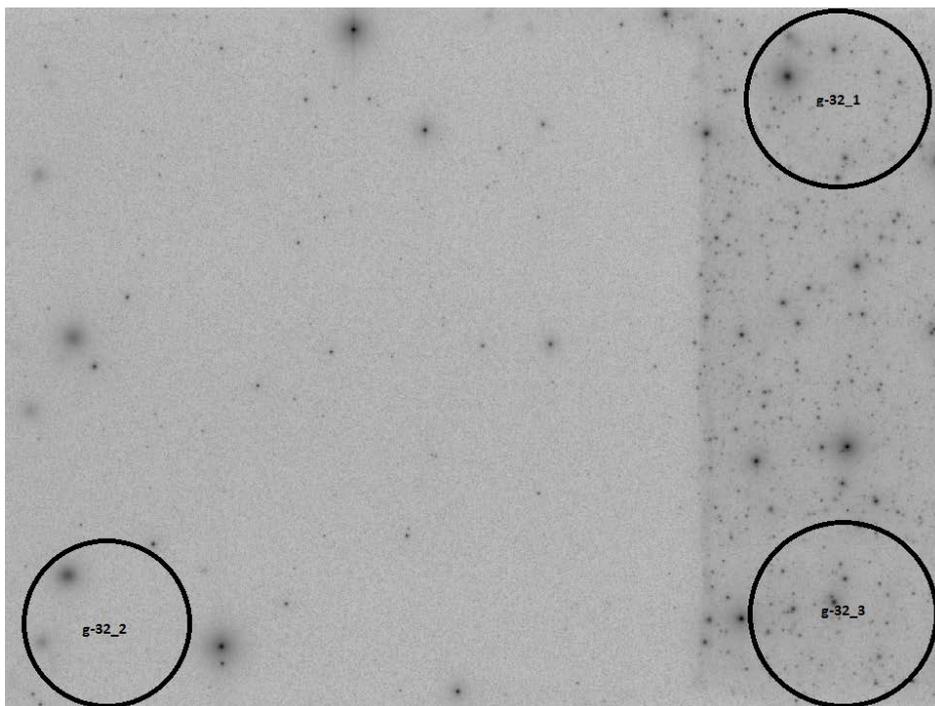


Abb. 3.10: Autoradiogramm des Filters g-32 aus Tschernobyl, bestaubt von 28.7. bis 4.8.15. Eingezeichnet sind die entnommenen Filterfragmente für die Löslichkeitsversuche. Die Probe g-32_2 wurde aufgrund zu geringer Aktivität nicht weiter verwendet.

Auf Filter g-32 ist die Aktivität sehr ungleichmäßig verteilt. Lediglich ein schmaler Streifen am rechten Rand hat eine ausreichend hohe Aktivität für die Löslichkeitsversuche.

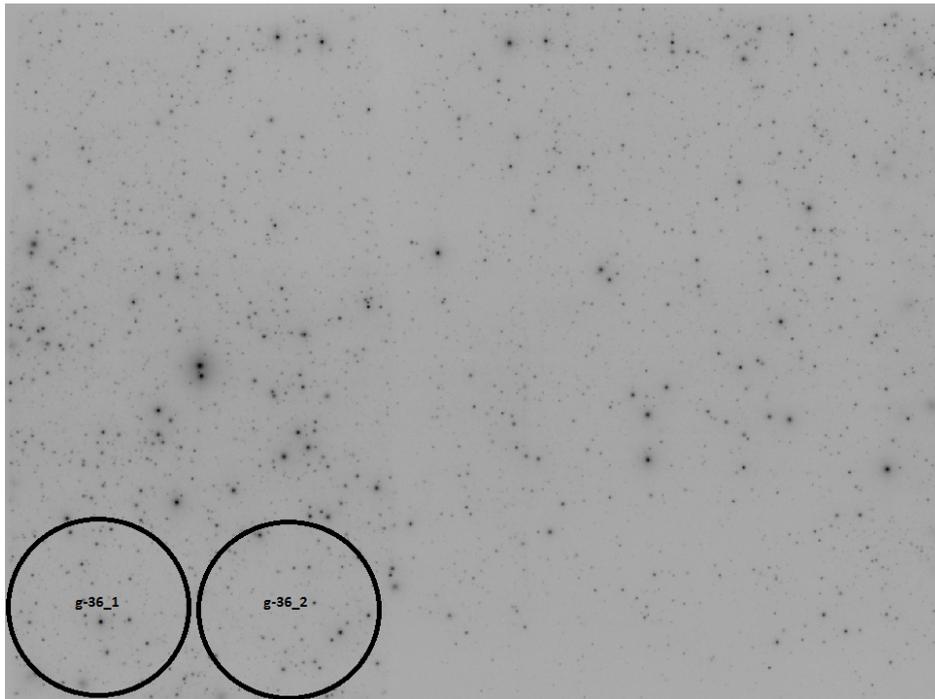


Abb. 3.11: Autoradiogramm des Filters g-36, bestaubt von 18.8. bis 26.8.15. Eingezeichnet sind die beiden für die Löslichkeitsversuche entnommenen Filterfragmente g-36_1 und g-36_2.

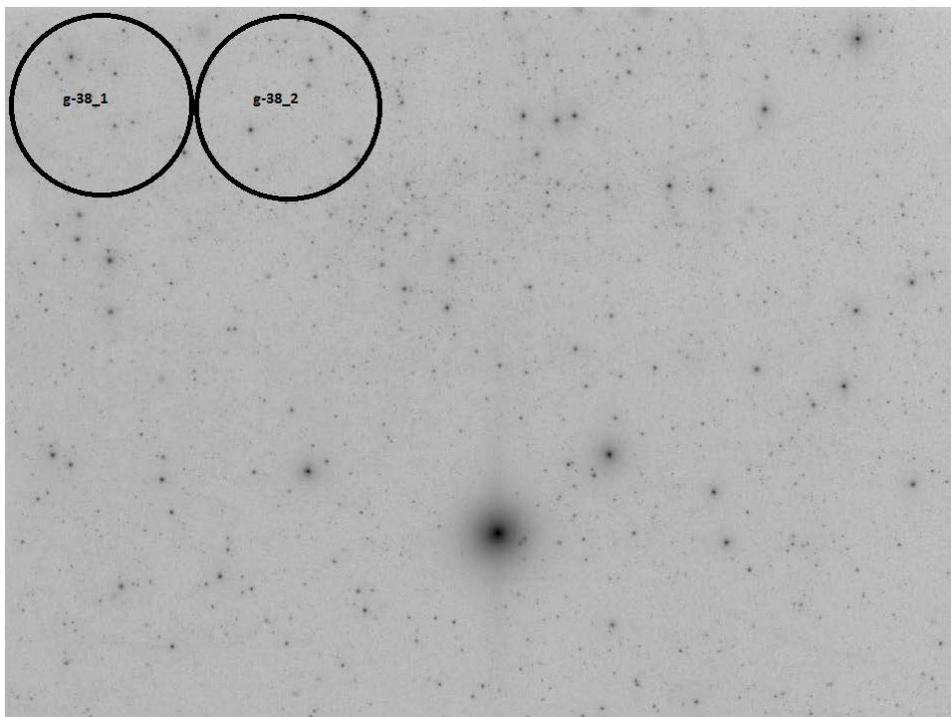


Abb. 3.12: Autoradiogramm des Filters g-38, bestaubt von 9.9. bis 15.9.15, inklusive der entnommenen Filterfragmente g-38_1 und g-38_2 für die Löslichkeitsversuche.

Zunächst wurden die Filterfragmente γ -spektrometrisch gemessen, um die Gesamtaktivität an ^{137}Cs vor Beginn der Löslichkeitsversuche zu bestimmen. Anschließend wurden die Luftfilter beidseitig mit je einem Membranfilter (Polyethersulfon-Filter, Porengröße 0,2 μm) bedeckt, um das mechanische Ablösen heißer Teilchen zu vermeiden. Dieses Filter-Sandwich wurde anschließend in eine Halterung aus PTFE eingespannt und in einen Behälter aus Polyethylen getaucht, in dem sich 30 mL der simulierten Lungenflüssigkeit (Gamble-Lösung) befinden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Filter komplett von der Gamble-Lösung umschlossen wird. Die Zusammensetzung der Gamble-Lösung ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 3.8 Zusammensetzung der verwendeten Gamble-Lösung in mmol/L .

Garger, 2010	mmol/L
NaCl	116
NH ₄ Cl	10
NaHCO ₃	27
Glycin	6
L-Cystein	1,5
NaCitrat * 5 H ₂ O	0,2
CaCl ₂ * 2 H ₂ O	0,2
Na ₂ HPO ₄ * 2 H ₂ O	1,2

Zu bestimmten Zeitpunkten wurde die Gamble-Lösung durch eine frische Lösung ersetzt. Die entnommene Gamble-Lösung wurde in eine Flaschengeometrie überführt, mit konzentrierter Salpetersäure angesäuert und die ^{137}Cs -Aktivität anschließend γ -spektrometrisch bestimmt. Anhand der erhaltenen Werte und der 100%-Messung zu Beginn der Löslichkeitsversuche kann der verbliebene Anteil der Aktivität auf dem Filter nach jedem Lösungsvorgang berechnet werden.

Tabelle 3.9 Aktivität in Bq auf den Filterfragmenten g-32_1 und g-32_3 und den entsprechenden Gamble-Lösungen. Zum Vergleich sind auch die von Dr. Garger ermittelten Werte aufgeführt.

	g-32 Garger	g-32_1		g-32_3	
Filter 100%	4,82	4,55	± 0,11	3,72	± 0,07
Gamble 1	0,17	0,28	± 0,02	0,50	± 0,04
Gamble 2	0,15	0,07	± 0,005	0,10	± 0,01
Gamble 3	0,04	0,03	± 0,01	0,08	± 0,04
Gamble 4	0,03	0,02	± 0,01	0,03	± 0,01

Tabelle 3.10 Extraktionszeiten und ungelöster Anteil der ¹³⁷Cs-Aktivität auf den Filterfragmenten g-32_1 und g-32_3. Zum Vergleich sind auch die von Dr. Garger ermittelten Werte aufgeführt.

	g-32 Garger		g-32_1		g-32_3	
	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil
Filter 100%	0	1,00	0	1,00	0	1,00
Gamble 1	16,75	0,97	16,83	0,94	16,83	0,86
Gamble 2	41,27	0,93	41,35	0,92	41,47	0,84
Gamble 3	70,42	0,93	70,40	0,92	70,43	0,82
Gamble 4	209,63	0,92	209,87	0,91	209,87	0,81

Mit Hilfe des Programms SigmaPlot 12.0 wurden die erhaltenen Werte gefittet. Bei dem Modell handelt es sich um die Summe zweier Exponentialfunktionen, das die schnell und langsam löslichen Anteile sowie die entsprechenden charakteristischen Löslichkeitszeiten wiedergibt.

$$a_{rem} = a_1 e^{-\lambda_1 t} + a_2 e^{-\lambda_2 t} = a_1 e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_1}} + a_2 e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_2}}$$

Dabei entspricht a_{rem} dem ungelösten Anteil, a_1 und a_2 dem schnell bzw. langsam löslichen Anteil (wobei $a_1 + a_2 = 1$), λ_1 und λ_2 den Löslichkeitsraten und T_1 bzw. T_2 den charakteristischen Löslichkeitszeiten.

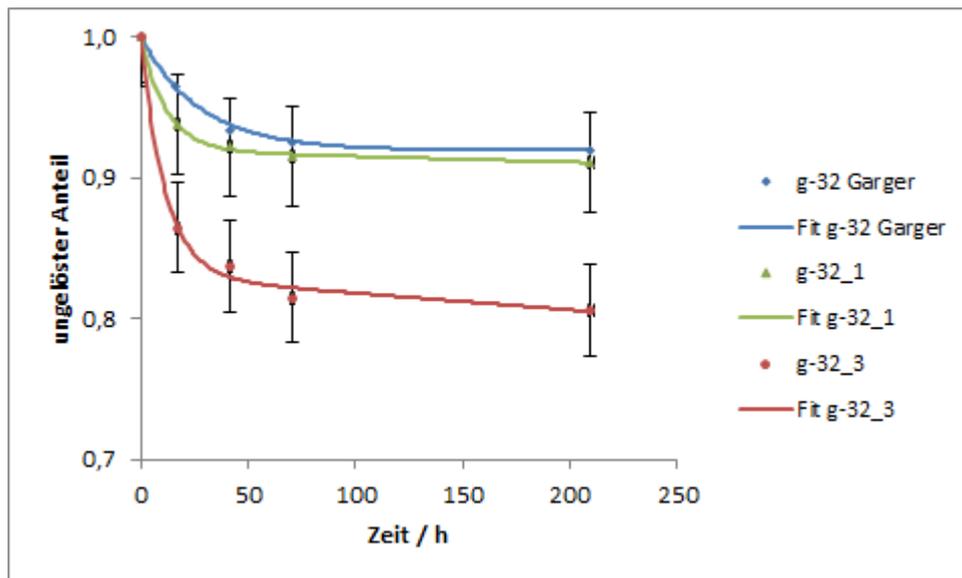


Abb. 3.13 Ungelöster Anteil der ^{137}Cs -Aktivität in Abhängigkeit der Extraktionszeit für die Filterfragmente g-32_1 und g-32_3. Zum Vergleich sind die Werte von Dr. Garger mit eingezeichnet.

Tabelle 3.11 Parameter für das exponentielle Löslichkeitsmodell für ^{137}Cs für den Luftfilter g-32.

	a_1	λ_1	a_2	λ_2	T_1 / h	T_2 / a
g-32 Garger	0,083	0,035	0,917	1,79E-10	20,1	4,4E+05
g-32_1	0,081	0,084	0,920	4,49E-05	8,2	1,8
g-32_3	0,170	0,088	0,830	1,00E-04	7,9	0,8

Tabelle 3.12 Aktivität in Bq auf den Filterfragmenten g-36_1 und g-36_2 und den entsprechenden Gamble-Lösungen. Zum Vergleich sind auch die von Dr. Garger ermittelten Werte aufgeführt.

	g-36 Garger	g-36_1		g-36_2	
Filter 100%	19,54	14,8	± 0,3	14,8	± 0,2
Gamble 1	1,23	1,40	± 0,05	1,32	± 0,04
Gamble 2	0,7	0,35	± 0,03	0,39	± 0,02
Gamble 3	0,42	0,10	± 0,015	0,13	± 0,06
Gamble 4	0,23	0,09	± 0,010	0,11	± 0,02

Tabelle 3.13 Extraktionszeiten und ungelöster Anteil der ^{137}Cs -Aktivität auf den Filterfragmenten g-36_1 und g-36_2. Zum Vergleich sind auch die von Dr. Garger ermittelten Werte aufgeführt.

	g-36 Garger		g-36_1		g-36_2	
	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil
Filter 100%	0	1,00	0	1,00	0	1,00
Gamble 1	16,83	0,94	16,82	0,91	16,82	0,91
Gamble 2	41,35	0,90	41,33	0,88	41,35	0,88
Gamble 3	70,27	0,88	70,35	0,88	70,38	0,88
Gamble 4	209,62	0,87	209,82	0,87	209,87	0,87

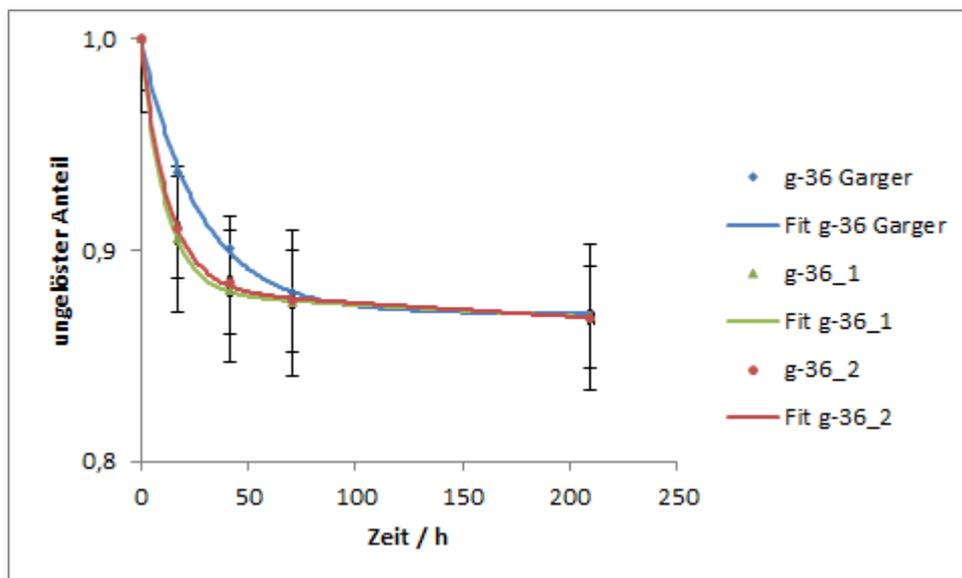


Abb. 3.14 Ungelöster Anteil der ^{137}Cs -Aktivität in Abhängigkeit der Extraktionszeit für die Filterfragmente g-36_1 und g-36_2. Zum Vergleich sind die Werte von Dr. Garger mit eingezeichnet.

Tabelle 3.14 Parameter für das exponentielle Löslichkeitsmodell für ^{137}Cs für den Filter g- 36.

	a ₁	λ ₁	a ₂	λ ₂	T ₁ / h	T ₂ / a
g-36 Garger	0,123	0,041	0,877	5,26E-05	17,1	1,5
g-36_1	0,120	0,089	0,880	6,09E-05	7,8	1,3
g-36_2	0,119	0,080	0,882	7,28E-05	8,7	1,1

Tabelle 3.15 Aktivität in Bq auf den Filterfragmenten g-38_1 und g-38_2 und den entsprechenden Gamble-Lösungen. Zum Vergleich sind auch die von Dr. Garger ermittelten Werte aufgeführt.

	g-38 Garger	g-38_1		g-38_2	
Filter 100%	3,78	3,36	± 0,09	4,25	± 0,09
Gamble 1	1,22	1,27	± 0,05	1,32	± 0,05
Gamble 2	0,25	0,16	± 0,014	0,19	± 0,04
Gamble 3	0,14	0,04	± 0,01	0,04	± 0,01
Gamble 4	0,06	0,04	± 0,01	0,07	± 0,01

Tabelle 3.16 Extraktionszeiten und ungelöster Anteil der ^{137}Cs -Aktivität auf den Filterfragmenten g-38_1 und g-38_2. Zum Vergleich sind auch die von Dr. Garger ermittelten Werte aufgeführt.

	g-38 Garger		g-38_1		g-38_2	
	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil	Extraktionszeit / h	Ungelöster Anteil
Filter 100%	0	1,00	0	1,00	0	1,00
Gamble 1	16,57	0,68	16,82	0,62	16,83	0,69
Gamble 2	41,22	0,61	41,28	0,57	41,32	0,65
Gamble 3	70,53	0,57	70,15	0,56	70,20	0,64
Gamble 4	209,85	0,56	209,88	0,55	209,95	0,62

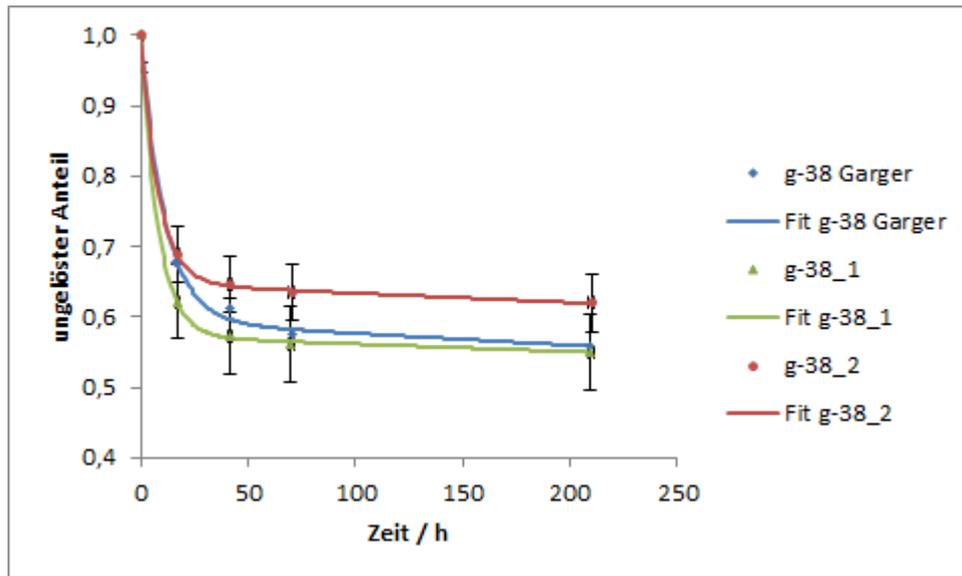


Abb. 3.15 Ungelöster Anteil der ^{137}Cs -Aktivität in Abhängigkeit der Extraktionszeit für die Filterfragmente g-38_1 und g-38_2. Zum Vergleich sind die Werte von Dr. Garger mit eingezeichnet.

Tabelle 3.17 Parameter für das exponentielle Löslichkeitsmodell für ^{137}Cs für den Filter g-38.

	a_1	λ_1	a_2	λ_2	T_1/ h	T_2/ a
g-38 Garger	0,400	0,095	0,600	3,79E-04	7,3	0,2
g-38_1	0,428	0,126	0,573	2,00E-04	5,5	0,4
g-38_2	0,353	0,123	0,647	2,00E-04	5,7	0,4

Die erhaltenen Werte für die schnell bzw. langsam löslichen Anteile a_1 und a_2 , sowie die Löslichkeitsraten λ_1 und λ_2 stimmen bei allen drei Proben gut mit den von Dr. Garger ermittelten Werten überein. Somit konnte die Methode wieder erfolgreich etabliert werden.

3.2.2 Bestimmung der Löslichkeit bei verschiedenen Tätigkeiten während des Baus des neuen Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes

Nachdem die Methode wieder erfolgreich etabliert werden konnte, wurde die ^{137}Cs -Löslichkeit bei drei verschiedenen Typen von Arbeiten bestimmt. Diese sind in Anhang 1 aufgeführt. Da sich die Arbeiten oft sehr ähneln, wurden jeweils 2 Wochen zusammengefasst. Die Löslichkeit wurde wie bereits oben beschrieben bestimmt. Jedoch mussten nun jeweils 2 Filter bearbeitet werden, um den Sammelzeitraum von 2 Wochen darzustellen (ein Filter entspricht einer Woche). Deswegen wurde von jedem Filter ein Filterfragment (Durchmesser 47 mm) ausgeschnitten und beide zusammen in die Filterhalterung eingespannt. Die weiteren Vorgänge sind analog zu oben.

In den folgenden Tabellen sind die ^{137}Cs -Aktivitäten auf den Filterfragmenten bzw. in den verschiedenen Gamble-Lösungen dargestellt, sowie die sich daraus abgeleiteten ungelösten Anteile.

Table 3.18 ^{137}Cs -Aktivität in Bq auf dem Filterfragment g-30/31 und den entsprechenden Gamble-Lösungen, sowie ungelöster Anteil und Extraktionszeit

	A / Bq			ungelöster Anteil			Zeit / h
Filter g-30/31	7,74	±	0,06	100%	±	1%	0
Gamble 1	1,05	±	0,03	86%	±	1%	16,63
Gamble 2	0,241	±	0,010	83%	±	1%	41,03
Gamble 3	0,100	±	0,012	82%	±	1%	69,93
Gamble 4	0,087	±	0,009	81%	±	1%	209,30

Table 3.19 ^{137}Cs -Aktivität in Bq auf dem Filterfragment g-38/39 und den entsprechenden Gamble-Lösungen, sowie ungelöster Anteil und Extraktionszeit

	A / Bq			ungelöster Anteil			Zeit / h
Filter g-38/39	5,60	±	0,16	100%	±	4%	0
Gamble 1	1,50	±	0,06	73%	±	4%	16,65
Gamble 2	0,29	±	0,04	68%	±	4%	41,07
Gamble 3	0,077	±	0,014	67%	±	4%	69,98
Gamble 4	0,14	±	0,03	64%	±	4%	209,37

Tabelle 3.20 ^{137}Cs -Aktivität in Bq auf dem Filterfragment g-40/41 und den entsprechenden Gamble-Lösungen, sowie ungelöster Anteil und Extraktionszeit

	A / Bq			ungelöster Anteil			Zeit / h
Filter g-40/41	8,53	±	0,15	100%	±	3%	0
Gamble 1	1,67	±	0,06	80%	±	4%	16,93
Gamble 2	0,375	±	0,018	76%	±	3%	41,42
Gamble 3	0,12	±	0,02	75%	±	3%	70,32
Gamble 4	0,11	±	0,04	73%	±	3%	209,73

Abbildung 3.16 zeigt die Auftragung der ^{137}Cs -Aktivität in Abhängigkeit der Extraktionszeit. Die Kurven wurden mittels SigmaPlot und des bereits oben beschriebenen Modells gefittet.

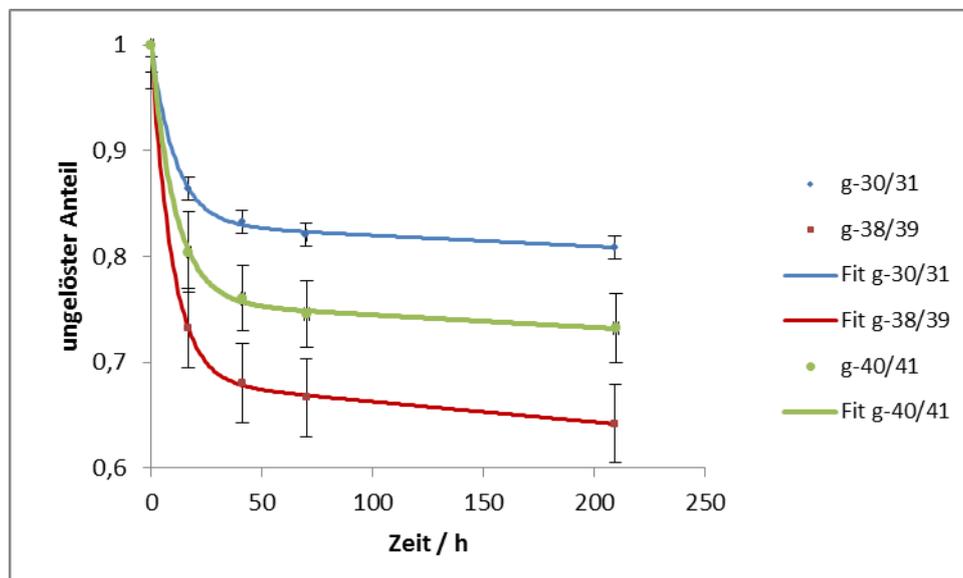


Abb. 3.16 Ungelöster Anteil der ^{137}Cs -Aktivität in Abhängigkeit der Extraktionszeit für die Proben g-30/31, g-38/39 und g-40/41

In der nachfolgenden Tabelle sind die durch den Fit erhaltenen Parameter für die schnell bzw. langsam löslichen Anteile a_1 und a_2 , sowie die Löslichkeitsraten λ_1 und λ_2 dargestellt. Daraus lassen sich die charakteristischen Löslichkeitszeiten T_1 und T_2 berechnen.

Tabelle 3.21 Parameter für das exponentielle Löslichkeitsmodell für die Filter g-30/31, g-38/39 und g-40/41

Filter	a_1	λ_1	a_2	λ_2	T_1 / h	T_2 / d
g-30/31	0,1695	0,0925	0,8305	1,00E-04	7,49	288,8
g-38/39	0,3174	0,1072	0,6826	3,00E-04	6,47	96,3
g-40/41	0,2433	0,093	0,7567	2,00E-04	7,45	144,4

e. Dekontaminationsarbeiten im wieder zu besiedelndem Gebiet von Fukushima

Im Zeitraum 25. – 29. Januar 2016 wurden in der Fukushima Präfektur in einem Parkareal „M“ Aerosolfilterproben genommen. Die Filter wurden in eine kalibrierte Messgeometrie überführt und γ -spektrometriert. Die Messergebnisse sind in Tabelle 3.22 zusammengestellt. Die Aktivitätskonzentrationen von Cs-137 zum Sammelzeitpunkt sind auch in Abbildung 3.17 dargestellt.

Tabelle 3.22 Aktivitätskonzentrationen von Cs-134 und Cs-137 mit Messunsicherheit der Filterproben im Parkareal „M“ zum Sammelzeitpunkt und bezogen auf den Termin des Reaktorunfalls 2011.

Sample No.	Date	Time (start)	Duration [min]	Volume [m ³]	Cs-137 [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]	Cs-134 [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]	Cs-137 (2011) [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]	Cs-134 (2011) [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]
F1	25.01.2016	12:00	75	63,7	2,49E-03	8,33E-05	5,07E-04	2,36E-05	2,79E-03	9,33E-05	2,61E-03	1,22E-04
F2	25.01.2016	13:17	133	135	7,21E-04	1,59E+05	1,31E-04	6,85E-06	8,07E-04	1,78E-05	6,75E-04	3,52E-05
F3	26.01.2016	08:30	150	211,6	6,49E-04	2,21E-05	1,28E-04	6,01E-06	7,27E-04	2,48E-05	6,56E-04	3,09E-05
F4	26.01.2016	12:06	54	59,9	6,07E-04	8,51E-05	8,23E-05	1,61E-05	6,79E-04	9,53E-05	4,23E-04	8,30E-05
F5	26.01.2016	13:13	210	209,9	1,94E-03	5,60E-05	3,68E-04	1,56E-05	2,17E-03	6,27E-05	1,89E-03	8,05E-05
F6	28.01.2016	09:10	177	177,2	8,51E-04	2,57E-05	1,50E-04	7,85E-06	9,53E-04	2,88E-05	7,72E-04	4,04E-05
F7	28.01.2016	12:13	49	49,3	5,20E-04	7,65E-05	7,73E-05	2,04E-05	5,82E-04	8,56E-05	3,98E-04	1,05E-04
F8	28.01.2016	13:04	208	207,9	5,78E-03	1,06E-04	1,08E-03	2,61E-05	6,47E-03	1,19E-04	5,54E-03	1,35E-04
F9	29.01.2016	08:15	228	227,8	1,38E-04	7,15E-06	2,05E-05	4,30E-06	1,54E-04	8,01E-06	1,06E-04	2,22E-05

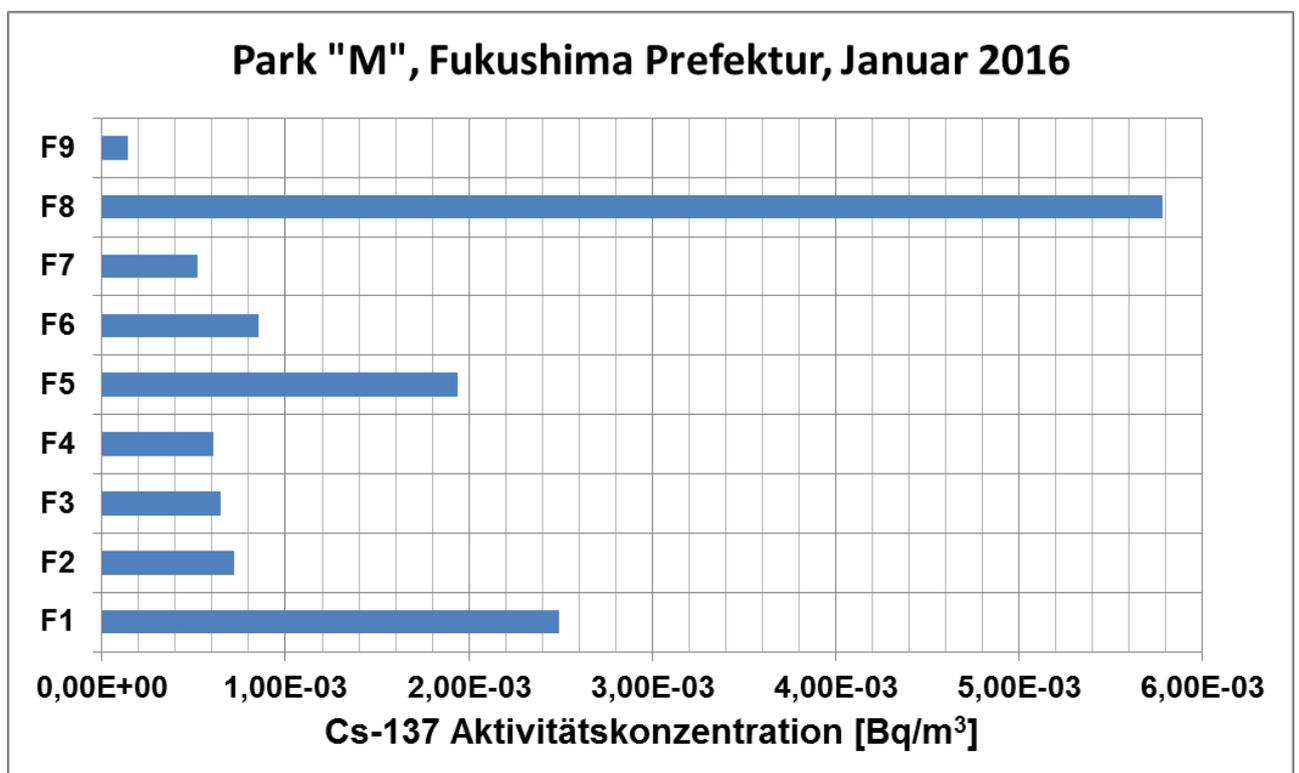


Abb. 3.17 Aktivitätskonzentration von Cs-137 zum Sammelzeitpunkt Januar 2016.

Eine zweite Messkampagne wurde im 15. – 19. Dezember 2016 in der Evakuierungszone von Fukushima durchgeführt. Der Probenahmeort „T“ lag am Rande eines Parks in Richtung einer Wohnsiedlung, in der nicht sehr intensive Dekontaminationsmaßnahmen durchgeführt wurden. Dabei wurden zeitgleich ein Filtersammler von JAEA und ein Impaktor von HMGU betrieben. Die Ergebnisse der Filtermessungen sind in Tabelle 3.23 zusammengestellt. Die Aktivitätskonzentrationen von Cs-137 zum Sammelzeitpunkt sind auch in Abbildung 3.18 dargestellt.

Tabelle 3.23 Aktivitätskonzentrationen von Cs-134 und Cs-137 mit Messunsicherheit der Filterproben von Tomioka zum Sammelzeitpunkt und bezogen auf den Termin des Reaktorunfalls 2011.

Sample No.	Date	Time (start)	Duration [h]	Volume [m ³]	Cs-137 [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]	Cs-134 [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]	Cs-137 (2011) [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]	Cs-134 (2011) [Bq/m ³]	sigma [Bq/m ³]
TF01	15.12.2016	09:35	6,28	372,8	9,61E-04	1,49E-05	1,36E-04	3,23E-06	1,10E-03	1,70E-05	9,44E-04	2,23E-05
TF02	16.12.2016	09:20	6,50	388	5,15E-04	1,11E-05	7,78E-05	3,16E-06	5,88E-04	1,27E-05	5,39E-04	2,19E-05
TF03	19.12.2016	09:14	6,30	378,1	7,99E-04	1,57E-05	1,35E-04	3,88E-06	9,13E-04	1,79E-05	9,41E-04	2,70E-05

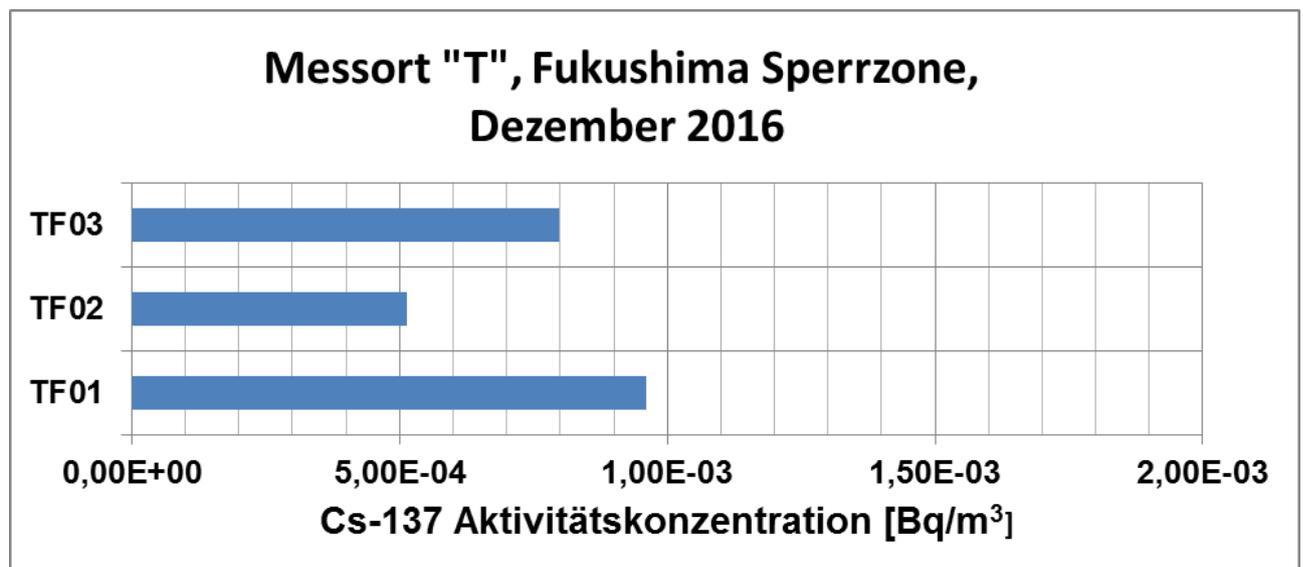


Abb. 3.18 Aktivitätskonzentration von Cs-137 zum Sammelzeitpunkt Dezember 2016.

Für die Löslichkeitsversuche wurde der Filter F8 verwendet, da er die höchste Aktivitätskonzentration an Cs-137 aufweist. Jedoch war auch diese noch zu gering, um in den Gamble-Lösungen Aktivitäten über der Nachweisgrenze zu erlangen, selbst nach einer Messzeit von 2 Wochen und der gleichzeitigen Verwendung mehrere Filterfragmenten. Auch das Einengen

der Gamble-Lösungen auf 4 mL und das anschließende Messen an einem Bohrlochdetektor brachte keinen Erfolg.

Eine weitere Messkampagne ist geplant. Dort soll versucht werden, höhere Radionuklidmengen auf den Filtern zu sammeln. Dies soll erreicht werden, indem in Gebieten mit höherer Kontamination gesammelt wird und die Sammelzeiträume verlängert werden. Durch verschiedene terminliche Schwierigkeiten hat sich die Meßkampagne in den November 2017 verschoben. Über sie kann hier leider nicht mehr berichtet werden.

f. Wolfram-Inertgas-Schweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden

Das in den ThO₂-dotierten Elektroden enthaltene ²³²Th ist ein α-Strahler mit einer Halbwertszeit von 1,4*10¹⁰ Jahren. Es zerfällt über mehrere Stufen zum stabilen ²⁰⁸Pb. Leider weist ²³²Th keine γ-Linien, wodurch es mittels γ-Spektrometrie nicht nachgewiesen werden kann. Das Tochternuklid ²²⁸Ra hat zwar γ-Linien, jedoch bei sehr niedrigen Energien, wodurch es für eine Auswertung auch nicht geeignet ist. Erst das Enkelnuklid ²²⁸Ac hat gut auswertbare γ-Linien bei 911,20 keV und 968,97 keV. Ausgehend davon, dass ²³²Th mit seinen Tochternukliden im radioaktiven Gleichgewicht steht, lässt sich seine Aktivität über die Tochternuklide bestimmen. Ein radioaktives Gleichgewicht stellt sich ein, wenn das Mutternuklid sehr viel langsamer zerfällt als seine Tochternuklide, was hier der Fall ist.

Durch den Zerfall von ²³²Th entsteht zunächst ²²⁸Ra. Zu Beginn steigt die Radium-Menge zwar an, doch bald macht sich der Zerfall zu Actinium bemerkbar. Damit nähern sich die Nuklide einem quasi-stationären Zustand an, in dem gleich viele Radium-Atome gebildet werden wie zerfallen. Diese Beziehungen reichen auch über verschiedene Elemente einer Zerfallsreihe. Der Grund: Zerfällt die Substanz A nur langsam, die daraus gebildete Substanz B unter Entstehung von C jedoch schnell, kann sich C trotzdem nur in dem Maße bilden, wie A zerfällt usw.

Thorium - Zerfallsreihe										
									Ra 228 5,7 a	← Th 232 1,4•10 ¹⁰ a
										↘ Ac 228 6,13 h
			Pb 212 10,6 s	←	Po 216 0,15 s	←	Rn 220 55,6 s	←	Ra 224 3,64 d	← Th 228 1,9 a
				↘						
		Tl 208 3,1 m	←	Bi 212 60,6 m						
			↘							
			Pb 208 stabil	←	Po 212 0,3 μs					

Abb. 3.19 Thorium-Zerfallsreihe (α-Zerfall: ←, β⁻-Zerfall: ↘)
 Quelle: http://goerdeler.lspb.de/cms_alt/gghtml/oetzi/OETZI_5.HTM

Um zu testen, ob das Schweißen Einfluss auf das radioaktive Gleichgewicht hat, wurde der in der Werkstatt bestaubte Filter einmal direkt nach dem Sammeln und einige Wochen später gemessen. Die Aktivität direkt nach dem Sammeln am 02.03.2017 beträgt $(1,19 \pm 0,12)$ Bq am 28.03.2017 $(1,29 \pm 0,51)$ Bq. Dies zeigt, dass sich ^{228}Ac immer noch im Gleichgewicht mit seinem Mutternuklid befindet, da sonst aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 6,13 h am 28.03.2017 kein Actinium mehr in der Probe enthalten gewesen wäre.

Die Löslichkeitsversuche wurden nach oben beschriebener Methode durchgeführt. Es konnte lediglich in Gamble 1 ^{228}Ac nachgewiesen werden. Entweder ist die Löslichkeit in den restlichen Gamble-Lösungen zu klein oder die Löslichkeitsversuche beeinflussen das radioaktive Gleichgewicht, sodass ^{228}Ac aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit zum Zeitpunkt der Messung nicht mehr vorhanden ist. Möglich wäre es auch, ^{232}Th direkt mittels α -Spektrometrie zu bestimmen. Dafür müsste die Methode für die Thorium-Abtrennung jedoch erst wieder etabliert und die Umgangsgenehmigung geklärt werden.

3.3 Auswertung von Impaktorproben

a) Bauarbeiten in kontaminierten Gebiet (Bau des neuen Tschernobyl Reaktor-schutzgebäudes

Bericht Prof. Dr. E.K. Garger, Institut für Radioökologie, Kiew

1. Differential characteristics of the activity size distribution of ¹³⁷Cs out- and indoors.

With an Andersen high volume sampler with a PM10 inlet and equipped with a cascade impactor, sampling was performed at the construction site of the new Chernobyl Shelter. The measurement results are shown in Table 3.24.

Table 3.24 Activity and volume activity size distributions of ¹³⁷Cs particles as measured by Andersen PM10 with impactor (outdoor) on the single stages of the impactor.

Date		Volume, m ³	Particle size ranges (µm)				
from	to		10,0–4,9	4,9–2,3	2,3–1,4	1,4–0,8	< 0,8
02.07.15	14.07.15	19275	Activity of cascades (Bq)				
			4.27	1.94	0.928	0.506	2.31
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			2.22E-04	1.01E-04	4.81E-05	2.63E-05	1.20E-04
14.07.15	28.07.15	20765	Activity of cascades (Bq)				
			15.82	8.68	5.33	3.87	4.68
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			7.62E-04	4.18E-04	2.57E-04	1.86E-04	2.25E-04
29.07.15	06.08.15	13050	Activity of cascades (Bq)				
			4.07	1.98	1.52	1.37	13.36
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			3.12E-04	1.52E-04	1.16E-04	1.05E-04	1.02E-03
18.08.15	01.09.15	18475	Activity of cascades (Bq)				
			15.26	19.43	12.63	8.14	14.77
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			8.26E-04	1.05E-03	6.84E-04	4.41E-04	7.99E-04
09.09.15	22.09.15	20984	Activity of cascades (Bq)				
			9.35	6.57	5.45	3.40	13.79
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			4.46E-04	3.13E-04	2.60E-04	1.62E-04	6.57E-04
22.09.15	07.10.15	24374	Activity of cascades (Bq)				
			13.14	10.64	7.80	3.93	9.07
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			5.39E-04	4.37E-04	3.20E-04	1.61E-04	3.72E-04
20.10.15	03.11.15	21137	Activity of cascades (Bq)				
			16.60	10.80	11.30	6.57	14.10
			Volume activity (Bq m ⁻³)				
			7.85E-04	5.11E-04	5.35E-04	3.11E-04	6.67E-04

Activity size distributions of Cs-137 as sampled by Andersen PM10 with impactor from July to November 2015 are presented in Figures 3.20 – 3.26. In general, it is assumed that the size distribution of the atmospheric aerosol is close to a log-normal distribution. Therefore it is convention in aerosol science that for visualizing the distribution, the abscissa presents the aerodynamic particle diameter d in logarithmic scale and the ordinate shows the fraction ΔA of activity in a certain sampling interval, normalized to the total activity A times the logarithm of the sampling interval $\Delta \log d$. The advantage of such a presentation is that it is area equal. In Table 3.25 the underlying calculations of the volume activity distribution in the coordinates $\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$ and $\log d_i$ are presented.

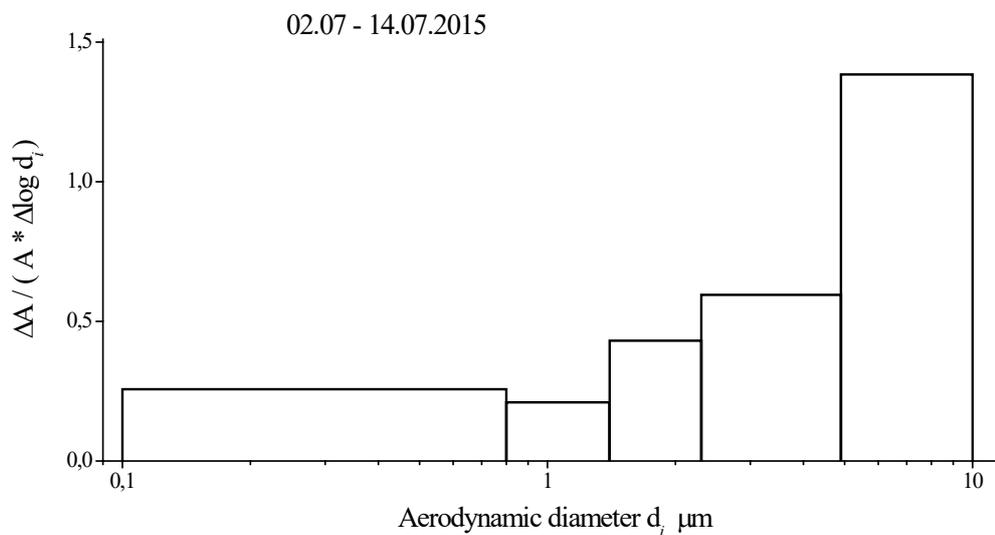


Fig. 3.20 Activity size distribution in the period 2 – 14 July 2015.

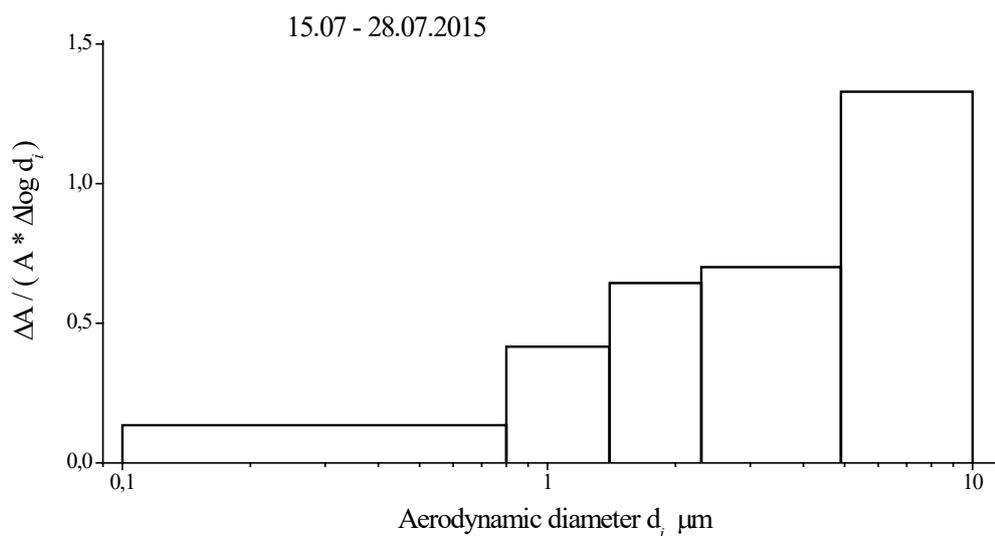


Fig. 3.21 Activity size distribution in the period 15 – 28 July 2015.

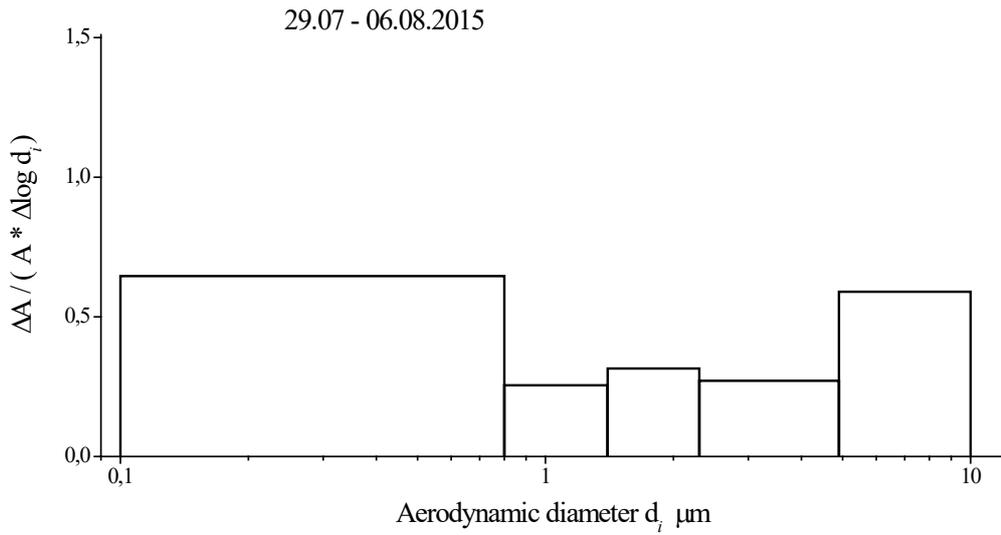


Fig. 3.22 Activity size distribution in the period 29 July – 6 August 2015.

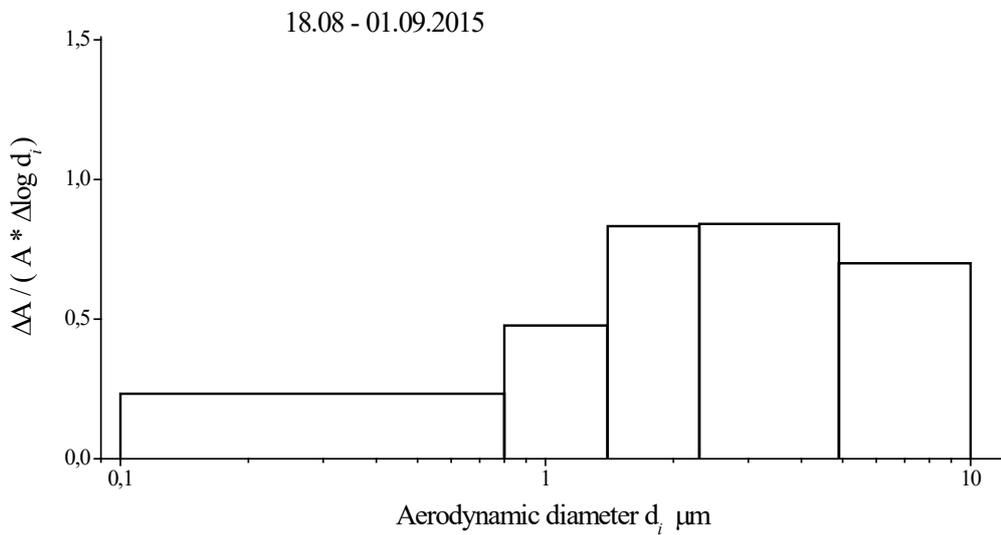


Fig. 3.23 Activity size distribution in the period 18 August – 1 September 2015.

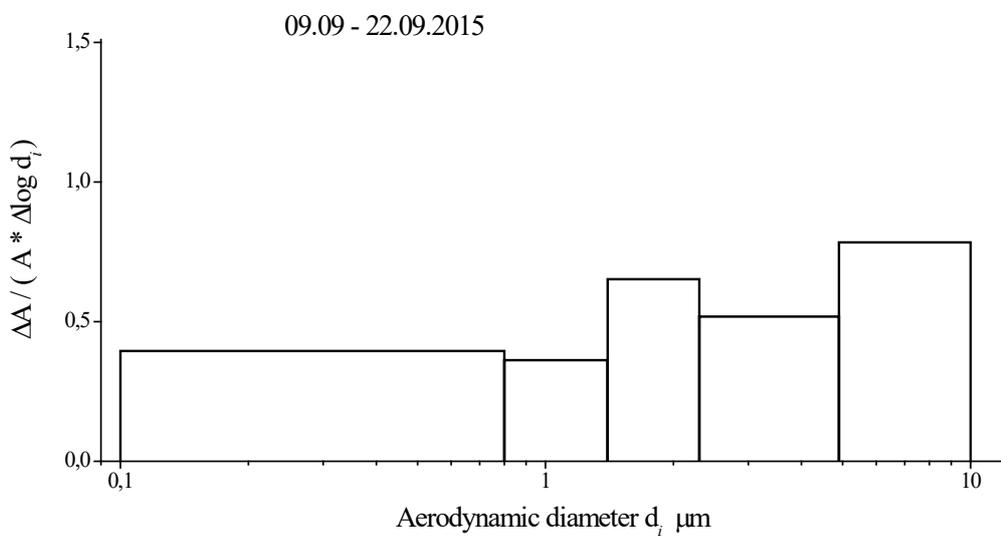


Fig. 3.24 Activity size distribution in the period 9 – 22 September 2015.

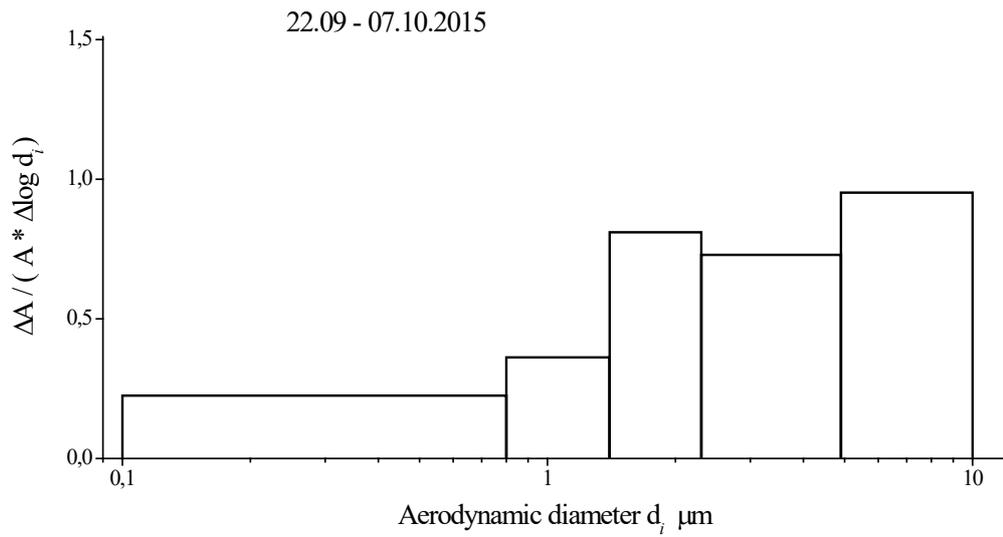


Fig. 3.25 Activity size distribution in the period 22 September – 7 October 2015.

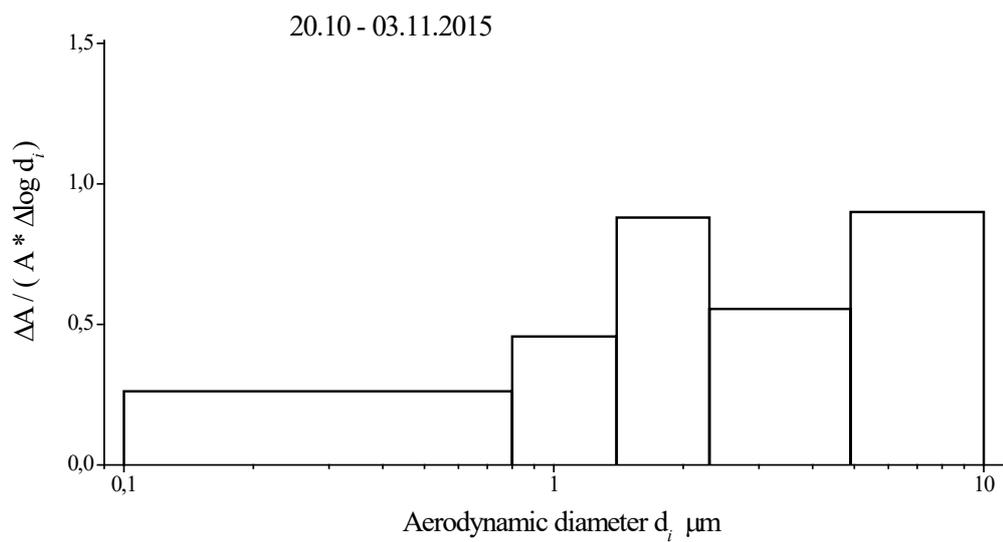


Fig. 3.26 Activity size distribution in the period 10 October – 3 November 2015.

Table 3.25 Calculations of the activity distributions of ^{137}Cs particles given as $\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$ and $\log d_i$ for the impactor stages of the Andersen PM10 sampler.

d_i μm	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	02.07 - 14.07.2015		14.07 - 28.07.2015	
			$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$
0.1	-1.00	0.903	0.232	0.257	0.122	0.135
0.8	-0.097	0.243	0.051	0.210	0.101	0.416
1.4	0.146	0.216	0.093	0.431	0.139	0.644
2.3	0.362	0.328	0.195	0.595	0.230	0.701
4.9	0.690	0.310	0.429	1.384	0.412	1.329
10.0	1.00					
			$\Sigma = 1.000$		$\Sigma = 1.004$	

d_i μm	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	29.07 - 06.08.2015		18.08 - 01.09.2015	
			$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$
0.1	-1.00	0.903	0.583	0.646	0.210	0.233
0.8	-0.097	0.243	0.062	0.255	0.116	0.477
1.4	0.146	0.216	0.068	0.315	0.180	0.833
2.3	0.362	0.328	0.089	0.271	0.276	0.841
4.9	0.690	0.310	0.183	0.590	0.217	0.700
10.0	1.00					
			$\Sigma = 0.985$		$\Sigma = 0.999$	

d_i μm	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	09.09- 22.09.2015		22.09 - 07.10.2015	
			$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$
0.1	-1.00	0.903	0.357	0.395	0.203	0.225
0.8	-0.097	0.243	0.088	0.362	0.088	0.362
1.4	0.146	0.216	0.141	0.652	0.175	0.810
2.3	0.362	0.328	0.170	0.518	0.239	0.729
4.9	0.690	0.310	0.243	0.784	0.295	0.952
10.0	1.00					
			$\Sigma = 0.999$		$\Sigma = 1.000$	

d_i μm	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	07.10 - 20.10.2015		20.10 - 03.11.2015	
			$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A/A$	$\Delta A/(A \cdot \Delta \log d_i)$
0.1	-1.00	0.903	0.121	0.134	0.237	0.262
0.8	-0.097	0.243	0.107	0.440	0.111	0.457
1.4	0.146	0.216	0.236	1.093	0.190	0.880
2.3	0.362	0.328	0.295	0.899	0.182	0.555
4.9	0.690	0.310	0.241	0.777	0.279	0.900
10.0	1.00					
			$\Sigma = 1.000$		$\Sigma = 0.999$	

The resulting general characteristics of the activity distributions of ^{137}Cs particles are presented in Table 3.26.

Table 3.26 Characteristics of the activity distribution of ^{137}Cs particles (measurements by the Andersen sampler PM10 with impactor) assuming lognormal size distribution.

Period of the experiment in 2015	Volume activity $\times 10^{-4} \text{ Bq m}^{-3}$	Mean diameter, \bar{d}_μ	Median, d_m, μ	Standard deviation σ	Geometric standard deviation d_g
02.07-14.07	5.14	4.23	2.69	2.98	3.26
15.07-28.07	18.6	4.31	3.05	2.81	2.64
29.07-06.08	16.9	2.14	1.05	2.67	3.19
18.08-01.09	38.5	3.17	2.11	2.53	2.71
09.09-22.09	18.4	2.94	1.67	2.77	3.14
22.09-07.10	18.3	3.57	2.34	2.73	2.82
22.10-03.11	28.0	3.32	2.08	2.77	2.90

Indoor size distributions were sampled with the impactor IBP (for details of this instrument see Frank et al., 1996). The results are given in Tables 3.27 and 3.28.

Table 3.27 Activity distributions of ^{137}Cs and ^{241}Am particles by impactor IBP at the Bypass of the Shelter (indoor).

Date		Volume m ³	Nuclide	Activity ΔA of the single impactor stages, Bq					
from	to			8.5–17.0	3.7–8.5	1.2–3.7	0.5–1.2	< 0.5 μm	$\Sigma \Delta A$
16.04.15	21.04.15	304	^{137}Cs	31.5	26.4	14.6	10.9	47.3	130.7
			^{241}Am	0.58	0.37	0.21	0.13	0.68	1.97
21.04.15	28.04.15	340	^{137}Cs	22.1	17.1	14.3	9.6	37.5	100.6
			^{241}Am	0.48	0.37	0.28	0.12	0.50	1.75
28.04.15	12.05.15	370	^{137}Cs	31.4	28.1	15.8	11.2	49.7	136.2
			^{241}Am	0.58	0.42	–	–	0.77	1.77
12.05.15	19.05.15	410	^{137}Cs	24.8	19.9	15.3	10.6	34.9	105.5
			^{241}Am	0.56	0.43	–	–	0.51	1.50
23.09.15	29.09.15	407	^{137}Cs	162.4	36.7	19.2	9.89	6.02	234.2
			^{241}Am	3.25	–	–	–	–	3.25
29.09.15	07.10.15	533	^{137}Cs	37.1	19.7	21.7	15.3	52.0	145.8
			^{241}Am	0.68	0.35	0.30	0.26	0.58	2.82
27.10.15	03.11.15	476	^{137}Cs	40.6	22.9	19.3	16.0	48.2	147.0
			^{241}Am	1.02	0.57	0.32	0.29	0.96	3.16
03.11.15	10.11.15	466	^{137}Cs	197.0	64.6	38.2	15.1	7.7	322.6
			^{241}Am	7.56	1.58	0.68	0.19	0.16	10.17
10.11.15	17.11.15	470	^{137}Cs	229.0	49.4	42.6	11.9	6.3	339.2
			^{241}Am	9.27	2.11	1.06	0.053	0.13	12.62
17.11.15	24.11.15	315	^{137}Cs	65.4	20.2	17.4	10.5	4.4	117.9
			^{241}Am	1.04	0.214	0.078	0.026	0.024	1.38

*IBP = Institute of Biophysics (Russia)

Table 3.28 Volume activity distributions of ^{137}Cs particles by impactor IBP at the Bypass of the Shelter (indoor).

Date		Volume m^3	Nuclide	Volume activity ΔVa of the single impactor stages, Bq m^{-3}					
from	to			8.5–17.0	3.7–8.5	1.2–3.7	0.5–1.2	< 0.5 μm	$\Sigma \Delta \text{Va}$
16.04.15	21.04.15	304	^{137}Cs	1.04E-01	8.68E-02	4.80E-02	3.59E-02	1.56E-01	4.31E-01
			^{241}Am	1.91E-03	1.22E-03	6.91E-04	4.28E-04	2.24E-03	6.75E-03
21.04.15	28.04.15	340	^{137}Cs	6.50E-02	5.03E-02	4.21E-02	2.82E-02	1.10E-01	2.96E-01
			^{241}Am	1.41E-03	1.09E-03	8.24E-04	3.53E-04	1.47E-03	5.15E-03
28.04.15	12.05.15	370	^{137}Cs	8.49E-02	7.59E-02	4.27E-02	3.03E-02	1.34E-01	3.68E-01
			^{241}Am	1.57E-03	1.14E-03	–	–	2.08E-03	4.79E-03
12.05.15	19.05.15	410	^{137}Cs	6.05E-02	4.85E-02	3.73E-02	2.59E-02	8.51E-02	2.57E-01
			^{241}Am	1.37E-03	1.05E-03	–	–	1.24E-03	3.66E-03
23.09.15	29.09.15	407	^{137}Cs	4.00E-01	9.02E-02	4.72E-02	2.43E-02	1.48E-02	5.77E-01
			^{241}Am	1.37E-03	–	–	–	–	1.37E-03
29.09.15	07.10.15	533	^{137}Cs	6.96E-02	3.70E-02	4.07E-02	2.87E-02	9.76E-02	2.74E-01
			^{241}Am	1.28E-03	6.57E-04	5.63E-04	4.88E-04	1.09E-03	4.08E-03
27.10.15	03.11.15	476	^{137}Cs	8.53E-02	4.81E-02	4.05E-02	3.36E-02	1.01E-01	3.09E-01
			^{241}Am	2.14E-03	1.20E-03	6.72E-04	6.09E-04	2.02E-03	6.64E-03
03.11.15	10.11.15	466	^{137}Cs	4.23E-01	1.39E-01	8.20E-02	3.24E-02	1.65E-02	6.93E-01
			^{241}Am	1.62E-02	3.39E-03	1.46E-03	4.08E-04	3.43E-04	2.18E-02
10.11.15	17.11.15	470	^{137}Cs	4.87E-01	1.05E-01	9.06E-02	2.53E-02	1.34E-02	7.21E-01
			^{241}Am	1.97E-02	4.49E-03	2.26E-03	1.13E-04	2.77E-04	2.68E-02
17.11.15	24.11.15	315	^{137}Cs	2.08E-01	6.41E-02	5.52E-02	3.33E-02	1.40E-02	3.75E-01
			^{241}Am	3.30E-03	6.79E-04	2.48E-04	8.25E-05	7.62E-05	4.39E-03

The indoor activity size distributions of Cs-137 particles as sampled by the impactor IBP from April to November 2015 are shown in Figures 3.27 – 3.36. Data of the calculations of the volume activity distribution in the coordinates $\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$ and $\log d_i$ are presented in Table 3.29. The resulting general characteristics of the activity distributions of indoor ^{137}Cs particles are given in Table 3.30.

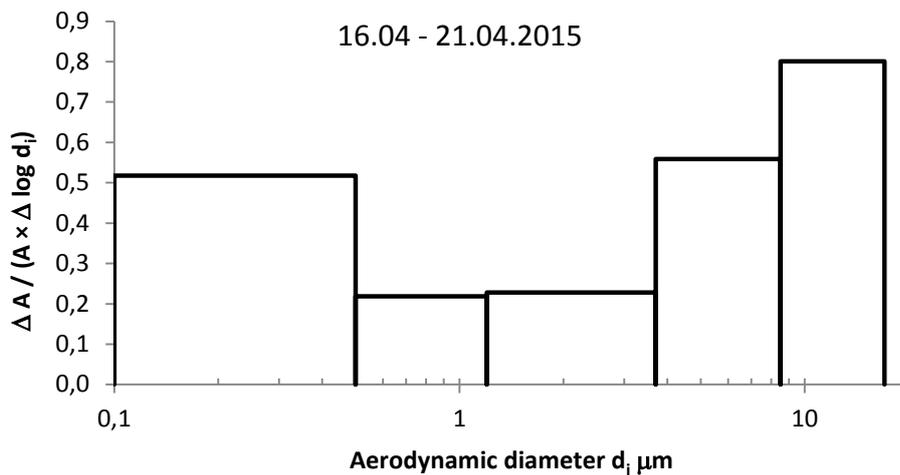


Fig. 3.27 Indoor activity size distribution in the period 16 – 21 April 2015.

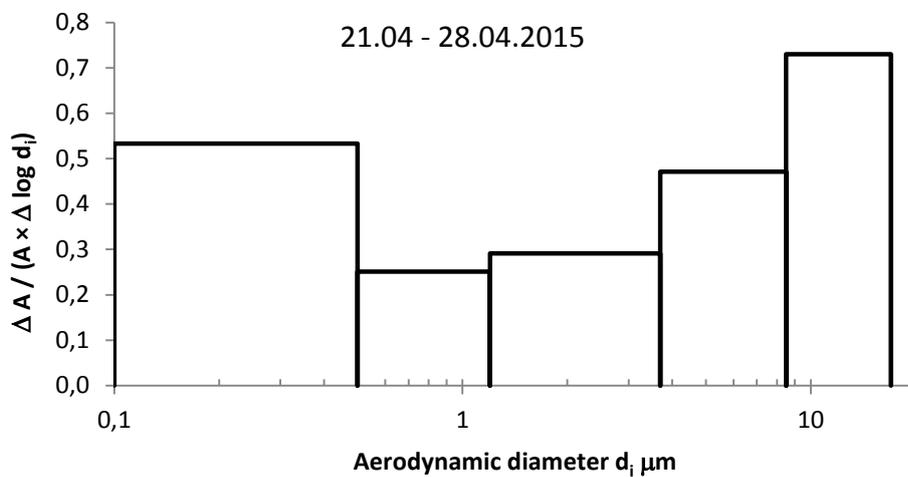


Fig. 3.28 Indoor activity size distribution in the period 21– 28 April 2015.

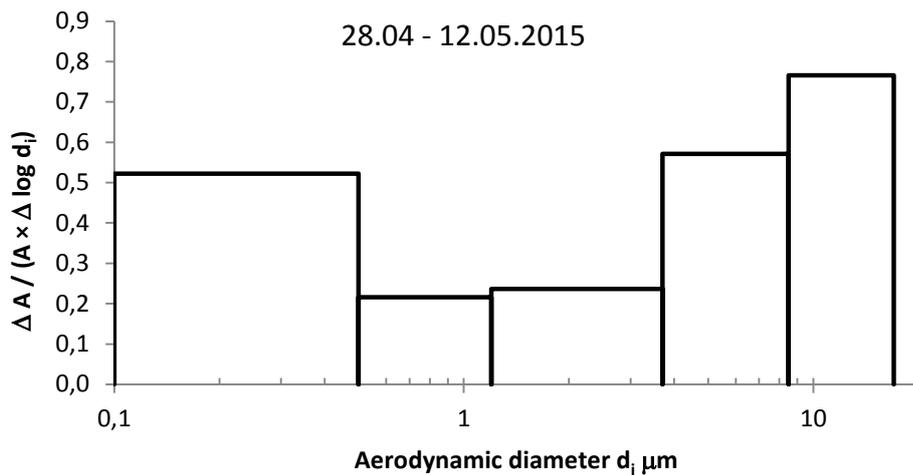


Fig. 3.29 Indoor activity size distribution in the period 28 April - 12 May 2015.

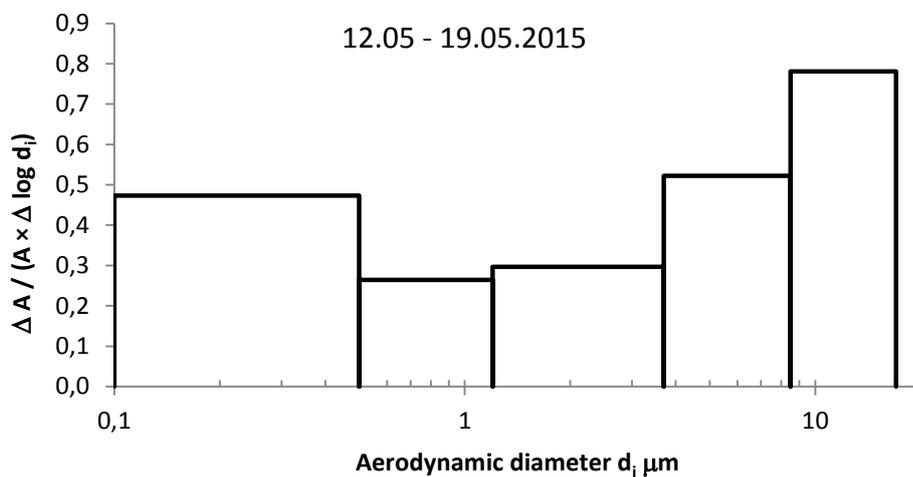


Fig. 3.30 Indoor activity size distribution in the period 12 – 19 May 2015.

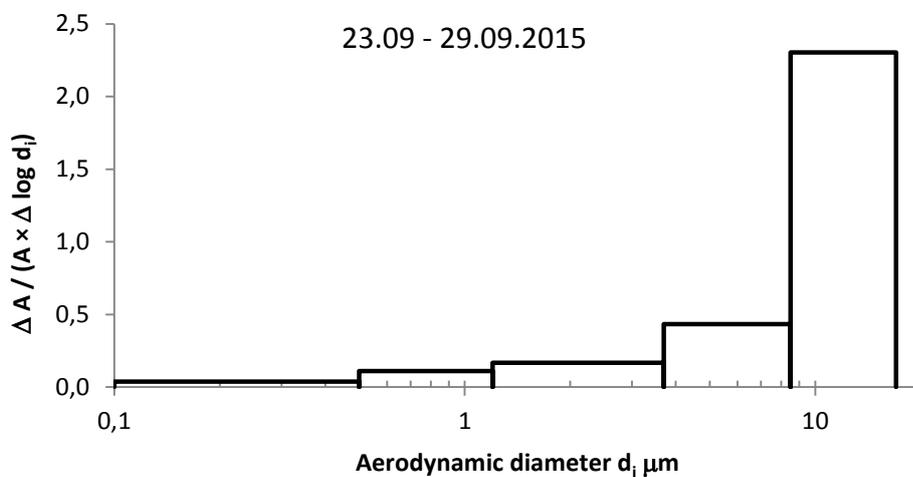


Fig. 3.31 Indoor activity size distribution in the period 23 – 29 September 2015.

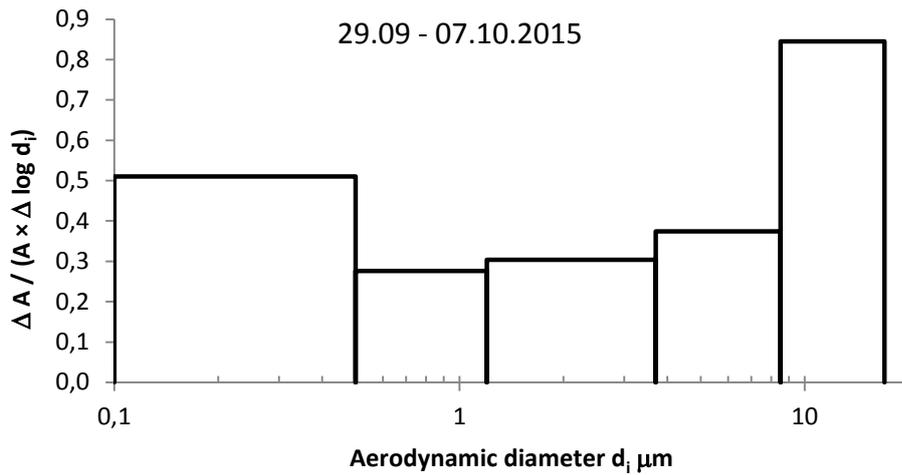


Fig. 3.32 Indoor activity size distribution in the period 29 September – 7 October 2015.

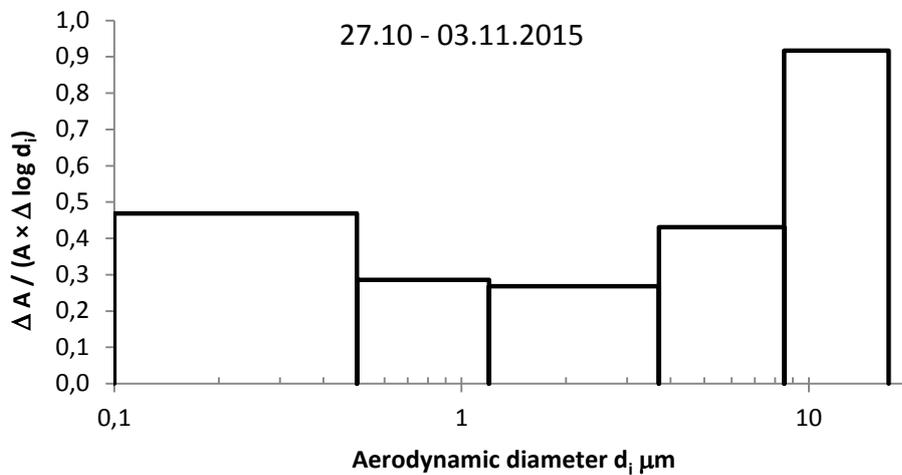


Fig. 3.33 Indoor activity size distribution in the period 27 October – 3 November 2015.

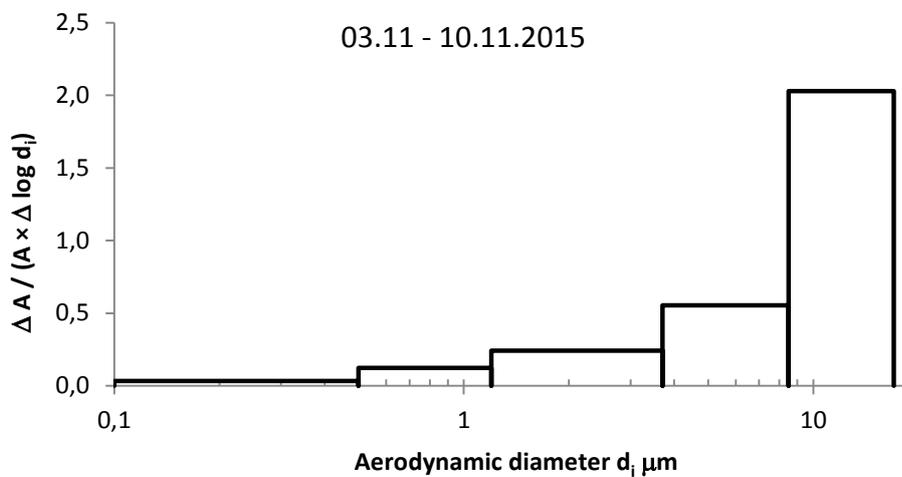


Fig. 3.34 Indoor activity size distribution in the period 3 – 10 November 2015.

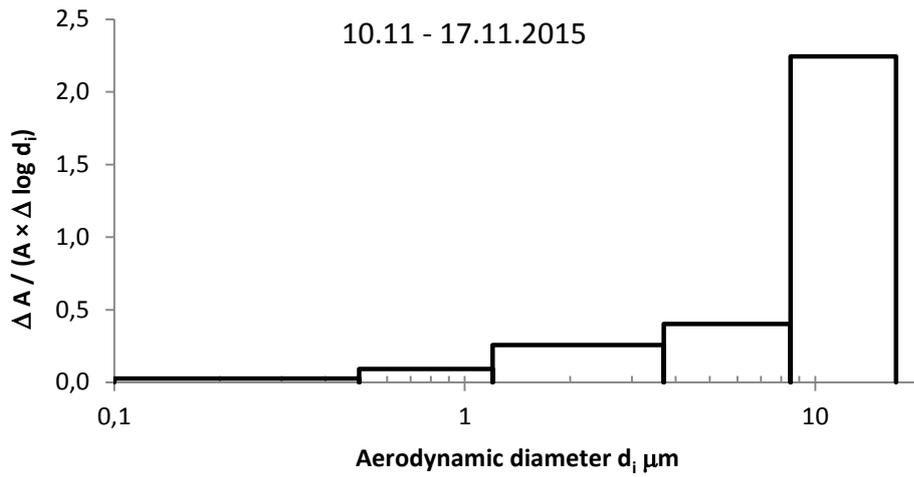


Fig. 3.35 Indoor activity size distribution in the period 10 – 17 November 2015.

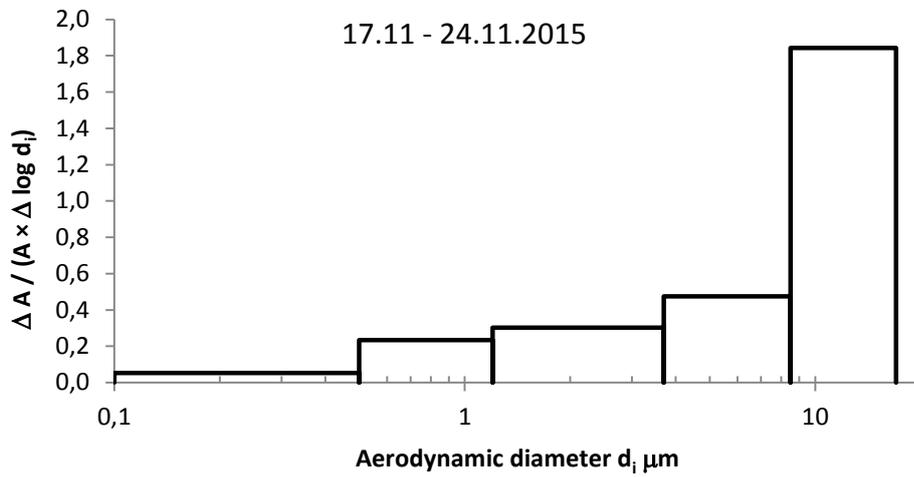


Fig. 3.36 Indoor activity size distribution in the period 17 – 24 November 2015.

Table 3.29 Calculations of the activity distributions of ^{137}Cs particles given as $\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$ and $\log d_i$ for the impactor stages of the IBP impactor.

d_i	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	16.04 - 21.04.2015		21.04 - 28.04.2015	
			$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$
μm						
0,1	-1,000					
		0,699	0,362	0,518	0,373	0,533
0,5	-0,301					
		0,380	0,083	0,219	0,095	0,251
1,2	0,079					
		0,489	0,112	0,228	0,142	0,291
3,7	0,568					
		0,361	0,202	0,559	0,170	0,471
8,5	0,929					
		0,301	0,241	0,801	0,220	0,730
17,0	1,230					
		Σ	1,000		1,000	

d_i	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	28.04 - 12.05.2015		12.05 - 19.05.2015	
			$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$
μm						
0,1	-1,000					
		0,699	0,365	0,522	0,331	0,473
0,5	-0,301					
		0,380	0,082	0,216	0,100	0,264
1,2	0,079					
		0,489	0,116	0,237	0,145	0,297
3,7	0,568					
		0,361	0,206	0,571	0,189	0,522
8,5	0,929					
		0,301	0,231	0,766	0,235	0,781
17,0	1,230					
		Σ	1,000		1,000	

d_i	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	23.09 - 29.09.2015		29.09 - 07.10.2015	
μm			$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$
0,1	-1,000					
		0,699	0,026	0,037	0,357	0,510
0,5	-0,301					
		0,380	0,042	0,111	0,105	0,276
1,2	0,079					
		0,489	0,082	0,168	0,149	0,304
3,7	0,568					
		0,361	0,157	0,434	0,135	0,374
8,5	0,929					
		0,301	0,693	2,303	0,254	0,845
17,0	1,230					
		Σ	1,000		1,000	

d_i	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	27.10 - 03.11.2015		03.11 - 10.11.2015	
μm			$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$
0,1	-1,000					
		0,699	0,328	0,469	0,024	0,034
0,5	-0,301					
		0,380	0,109	0,286	0,047	0,123
1,2	0,079					
		0,489	0,131	0,268	0,118	0,242
3,7	0,568					
		0,361	0,156	0,431	0,200	0,554
8,5	0,929					
		0,301	0,276	0,917	0,611	2,029
17,0	1,230					
		Σ	1,000		1,000	

d_i	$\log d_i$	$\Delta \log d_i$	10.11 - 17.11.2015		17.11 - 24.11.2015	
			$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$	$\Delta A / A$	$\Delta A / (A \cdot \Delta \log d_i)$
μm						
0,1	-1,000					
		0,699	0,019	0,027	0,037	0,053
0,5	-0,301					
		0,380	0,035	0,092	0,089	0,234
1,2	0,079					
		0,489	0,126	0,257	0,148	0,302
3,7	0,568					
		0,361	0,146	0,403	0,171	0,474
8,5	0,929					
		0,301	0,675	2,243	0,555	1,843
17,0	1,230					
		Σ	1,000		1,000	

Table 3.30 Characteristics of the indoor activity size distribution of ^{137}Cs particles (measurements by the IBP impactor) assuming lognormal size distribution.

Period of the experiment in 2015	Volume activity $\times 10^{-1} \text{ Bq m}^{-3}$	Mean diameter, \bar{d}_μ	Median, d_m, μ	Standard deviation σ	Geometric standard deviation d_g
16.04-21.04	4.31	4.76	1.88	4.98	4.77
21.04-28.04	2.96	4.38	1.7	4.88	4.64
28.04-12.05	3.68	4.66	1.84	4.92	4.74
12.05-19.05	2.57	4.69	1.92	4.92	4.57
23.09-29.09	5.77	10.04	8.04	4.27	2.40
29.09-07.10	2.74	4.63	1.78	5.10	4.70
27.10-03.11	3.09	4.98	1.99	5.17	4.72
03.11-10.11	6.93	9.34	7.29	4.49	2.44
10.11-17.11	7.21	9.84	7.90	4.37	2.32
17.11-24.11	3.75	8.57	6.02	4.91	2.87

b) Dekontaminationsarbeiten im wieder zu besiedelndem Gebiet von Fukushima

Bei den Feldmessungen in der Sperrzone von Fukushima im Dezember 2016 wurden neben Filterproben auch größenfraktionierte Impaktorproben genommen. Benutzt wurde dafür ein Niederdruck Impaktor LPI 30 der Fa. Hauke, Gmunden, Österreich bei einem Fluß von $1,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Berner et al., 1979). Da aus den Filtermessungen die (geringe) Radionuklidkonzentration bereits bekannt ist und sich die experimentellen Bedingungen sowohl von den Dekontaminationsarbeiten als auch von den meteorologischen Bedingungen nicht wesentlich geändert hatten, wurden die drei Sammelperioden für die Analyse der Proben zusammengelegt. Durch Messungen in einem Bohrlochdetektor über jeweils 14 Tage konnte die Aktivitätsgrößenverteilung für ^{137}Cs bestimmt werden. In Abb. 3.37 sind die Messwerte als Histogramm dargestellt. Wie bereits in Erläuterung zu den Abb. 3.20-3.26 dieses Kapitels ausgeführt, geht man beim atmosphärischen Aerosol im Allgemeinen von einer logarithmischen Normalverteilung der betrachtenden Größe in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmessers aus. Es ist deshalb Konvention, bei der Darstellung der Verteilung als Abszisse den Logarithmus des Durchmessers d aufzutragen und als Ordinate den Anteil ΔA der auf das Größenintervall fallenden Meßgröße (hier der Aktivität), normalisiert auf die Gesamtheit A multipliziert mit dem Logarithmus des Größenintervalls $\Delta \log d$. Der Vorteil einer solchen Darstellung ist die Flächentreue, was besonders bei unterschiedlichen Größenintervallen der Impaktorstufen zum Tragen kommt.

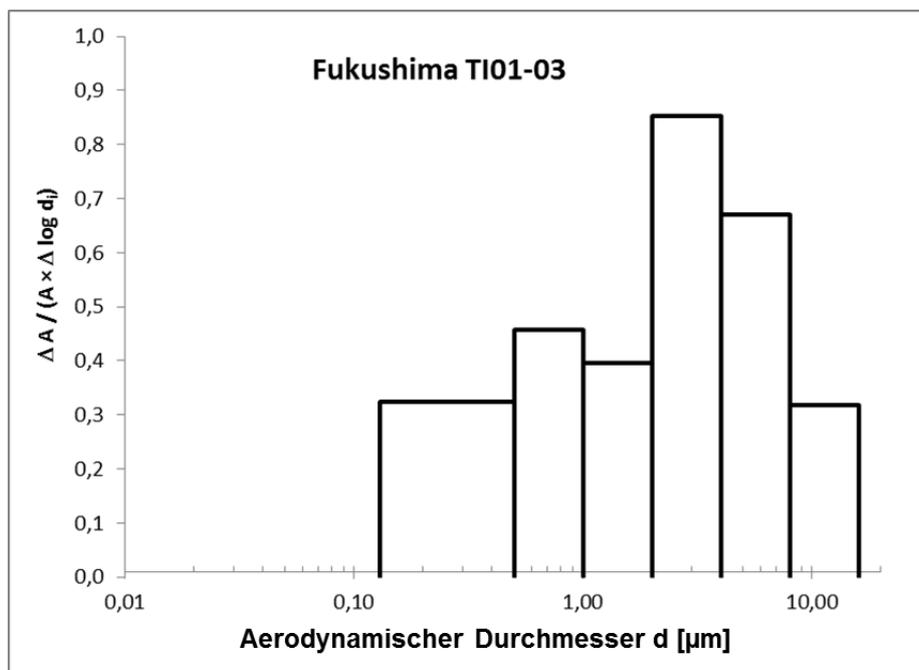


Abb. 3.37 Größenverteilung der ^{137}Cs -Aktivität im Sperrgebiet von Fukushima (Messort „T“, Dezember 2016) entsprechend der Sammelstufen des Impaktors.

Durch die Anpassung einer Lognormalverteilung an die gemessenen Datenpunkte erhält man die Werte für den Medianwert und die geometrische Standardabweichung der logarithmischen Normalverteilung (Abb. 3.38). Der Aktivitätsmedian (AMAD) liegt demnach bei $1,9 \mu\text{m}$ aerodynamischer Durchmesser und einer geometrischen Standardabweichung von 3,6.

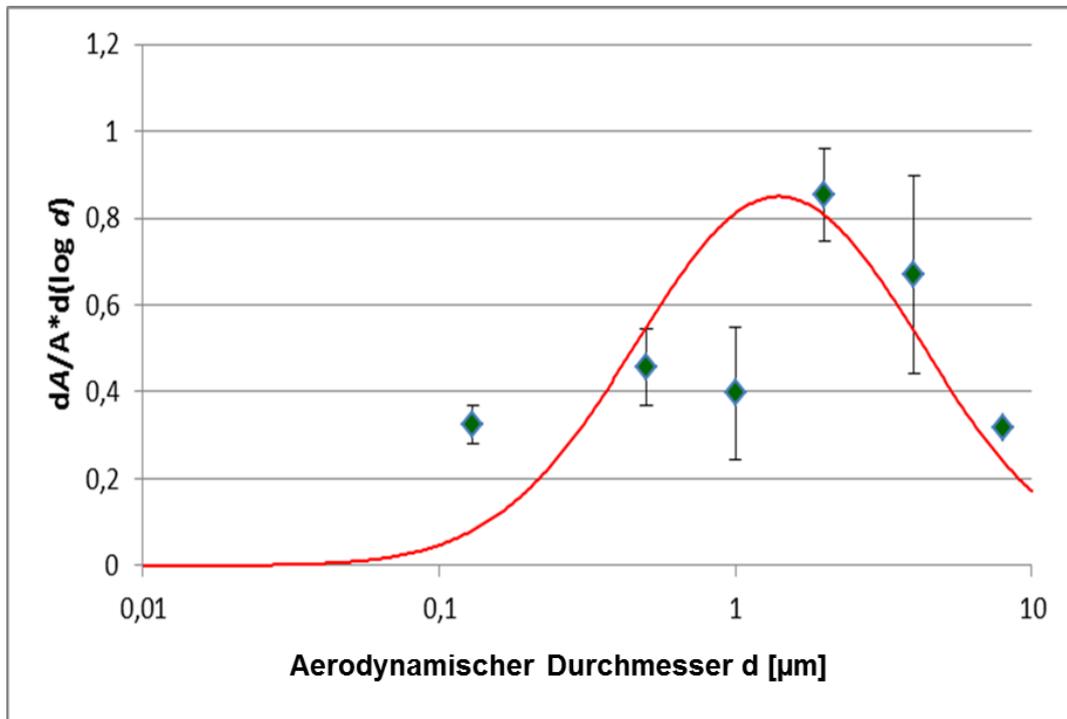


Abb. 3.38 Log-normaler Fit an die Größenverteilung der ^{137}Cs -Aktivität im Sperrgebiet von Fukushima (Meßort „T“, Dezember 2016).

Vergleicht man den Fit mit dem Histogramm, fällt auf, dass der berechnete Median gerade in der Nähe eines Zwischenminimums der Verteilung liegt. Die macht den so bestimmten Median nicht zu einem guten Repräsentanten der Verteilung. Man kann die gemessene Verteilung besser als Überlagerung von zwei Peaks interpretieren. Geht man von seiner solchen bimodalen Größenverteilung aus, so kann die einhüllende Fitfunktion als die Summe zweier Lognormalverteilungen angesehen werden (Abb. 3.39). Die Aktivitätsmedianen beider Funktionen liegen demnach bei $0,86 \mu\text{m}$ und $5,47 \mu\text{m}$ mit den geometrischen Standardabweichungen von 1,92 bzw. 1,88. Die Flächenanteile beider Lognormalverteilungen betragen 0,24 bzw. 0,76. Solch eine bimodale Verteilung kann als Überlagerung durch unterschiedliche Prozesse resuspendierten Materials verstanden werden, z.B. Windresuspension und Aufwirbelungen durch Abrißarbeiten.

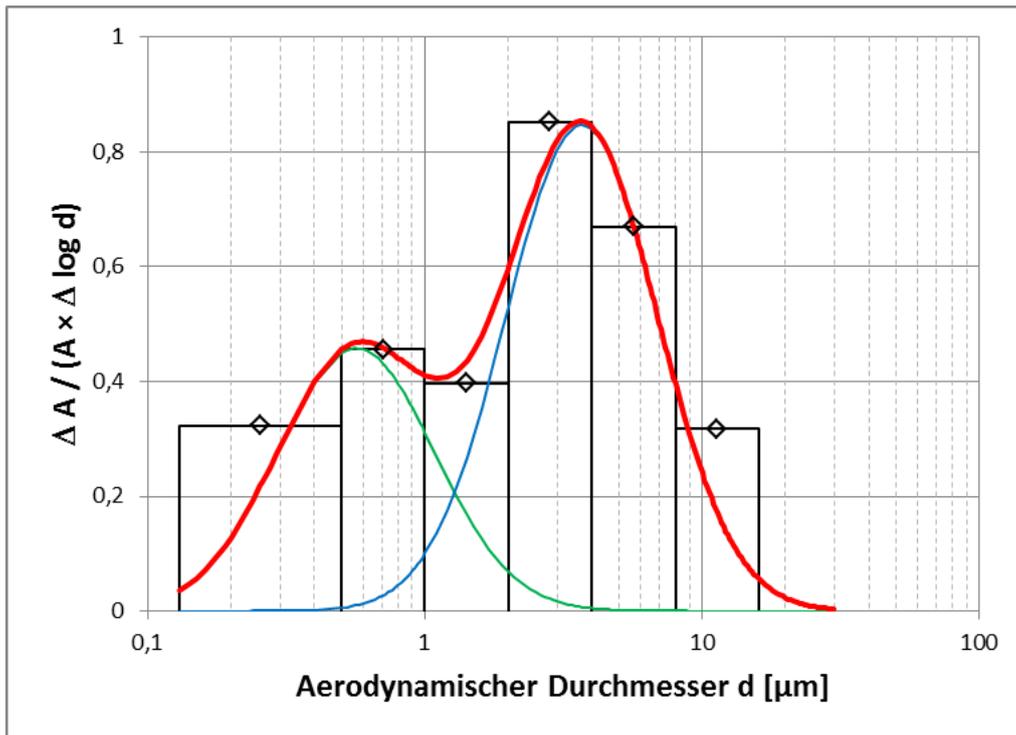


Abb. 3.39 Bimodaler Fit an die gemessene Größenverteilung der ^{137}Cs -Aktivität im Sperrgebiet von Fukushima (Meßort „T“, Dezember 2016) während Abrißarbeiten.

3.4 Auswertung von Filterproben zur retrospektiven Bestimmung der Größenverteilung

Vor der Messung von Filtern, die an Arbeitsplätzen mit Radionuklidexpositionen gesammelt wurden, musste die Methode erst wieder etabliert werden. Dazu wurde eine Reihe von Testmessungen durchgeführt, bei der als natürlicher Tracer Pb-212 (Halbwertszeit 10,6 Stunden) aus der Thorium-Zerfallsreihe verwendet wurde. Im Folgenden werden diese Testmessungen beschrieben.

Bezugnehmend auf die Publikation von Meisenberg und Tschiersch (2015) wurde die Extraktionsausbeute für Pb-212 bestimmt. Hierzu wurde über einen Zeitraum von ca. 24 Stunden im Aerosollabor des Instituts für Strahlenschutz (Helmholtz Zentrum München) mit einem Bulk-Filter Sammler Luftstaub auf einem Polypropylenfaserfilter G-3 gesammelt. Der Filter wurde danach in zwei gleich große Hälften zerteilt und diese beiden in Teile von je ca. 2x2 cm zerteilt. Für die direkte Aktivitätsbestimmung der Filterschnipsel im Gammadetektor wurden die Filterteile in eine Dose „58-20“ eingebracht. Der andere Teil der Filterschnipsel samt adsorbierte Luftstaub wurde Stück für Stück in einem Becherglas, das 100 ml destilliertes Wasser + Tensid enthält, unter Umrühren eingelegt. Als Tensid wurde Natriumdodecylbenzenesulfonate verwendet (Meisenberg und Tschiersch 2015). Das destillierte Wasser mit dem darin gelösten Staub wurde sodann in ein Fläschchen des Typs „Flasc56 ml“ eingebracht und auf einem Gammadetektor ausgemessen. Bei Verwendung einer Tensidlösung von 7,8 mmol/Liter konnte eine Extraktionsausbeute von 75,9% erzielt werden; bei Verwendung von etwa der doppelten Stoffmengenkonzentration (14,98 mmol/Liter) wurde eine Ausbeute von 78,6% erzielt. Bei diesen Versuchen wurde mit einer Extraktionszeit von 2,5 Minuten gearbeitet. Den Ergebnissen von Meisenberg und Tschiersch (2015) entsprechend wurde beim Extrahieren keine Ultraschallierung durchgeführt. Die erzielten Ausbeuten sind etwa doppelt so hoch wie jene aus der Publikation von Meisenberg und Tschiersch (2015) nach gleicher Extraktionszeit. Da eine Verdoppelung der Stoffmengenkonzentration zu keiner nennenswerten Erhöhung der Ausbeute geführt hat, wurden die durchzuführenden Versuche mit den Filterproben aus Tschernobyl mit einer Stoffmengenkonzentration von 7,8 mmol/Liter ausgeführt.

Mit einem Kaskadenimpaktor LPI 30 von Hauke wurde die Größenverteilung von Pb-212 in Luftstaub untersucht. Als zusätzliche Quelle für Pb-212 wurden sechs Glühstrümpfe im Labor ausgelegt (in früheren Versuchen konnte in den beiden Impaktorstufen mit den höchsten Abschneidedurchmessern keine Aktivität nachgewiesen werden; daher wurden wie in Meisenberg und Tschiersch (2015) Glühstrümpfe verwendet). Die an den Impaktor angeschlossene

Vakuumpumpe war etwa 24 Stunden in Betrieb (aus der bekannten Laufzeit der Pumpe kann mit Hilfe der volumetrischen *Flowrate* des Impaktors von 28,9 L/min das gesammelte Luftvolumen errechnet werden). Die acht Alufolien aus einer Impaktorbeladung wurden simultan auf acht verschiedenen Gammadetektoren ausgemessen. Die gemessenen Aktivitäten für Pb-212 wurden umgerechnet in eine um den Hintergrund korrigierte Aktivität. Diese wiederum wurde durch das gesammelte Luftvolumen dividiert und ergibt so die Aktivitätskonzentration c der jeweiligen Impaktorstufe. Daraus wird die Größe $dc/d(\log d)$ errechnet, wobei d die Abschneidedurchmesser der einzelnen Impaktorstufen bezeichnet. Die so gewonnenen Aktivitätskonzentrationen pro Größenintervall (i.e. $dc/d(\log d)$) wurden sodann gegen den Partikeldurchmesser im logarithmischen Maßstab geplottet (Abb. 3.40). Auf eine Normierung auf die Gesamtaktivitätskonzentration wurde hier verzichtet. Durch die Anpassung einer Lognormalverteilung an die gemessenen Datenpunkte erhält man die Werte für den Medianwert und die geometrische Standardabweichung der logarithmischen Normalverteilung.

Weiters wurde mit der in Meisenberg und Tschiersch (2015) beschriebenen indirekten Methode die Größenverteilung von Pb-212 bestimmt. Diese Bestimmung wurde parallel zu der direkten Messung mittels Kaskadenimpaktor durchgeführt. Hierfür wurde ca. 20 Stunden lang ein Faserfilter aus Polypropylen mit Luftstaub belegt. Der Filter wurde stückweise in der oben beschriebenen Tensidlösung unter umrühren eingelegt und auf diese Weise der darauf adsorbierte Luftstaub in die Lösung extrahiert. Diese wurde nach Zugabe von Polydimethylsiloxane als Entschäumer mit einem Aerosolgenerator ATM 230 der Firma TOPAS vernebelt und das so entstandene Aerosol durch einen Kaskadenimpaktor geleitet. Die acht Alufolien wurden auf den entsprechenden gleichen acht Gammadetektoren ausgemessen, die bereits für die direkte Methode verwendet wurden. Die gemessenen Aktivitäten wurden wie oben beschrieben in Aktivitätskonzentrationen pro Größenintervall umgerechnet und gegen den (logarithmischen) Partikeldurchmesser aufgetragen (Abb. 3.41).

Somit wurde die in Meisenberg und Tschiersch (2015) beschriebene indirekte Methode zur Bestimmung der Größenverteilung am Institut für Strahlenschutz erfolgreich neu etabliert.

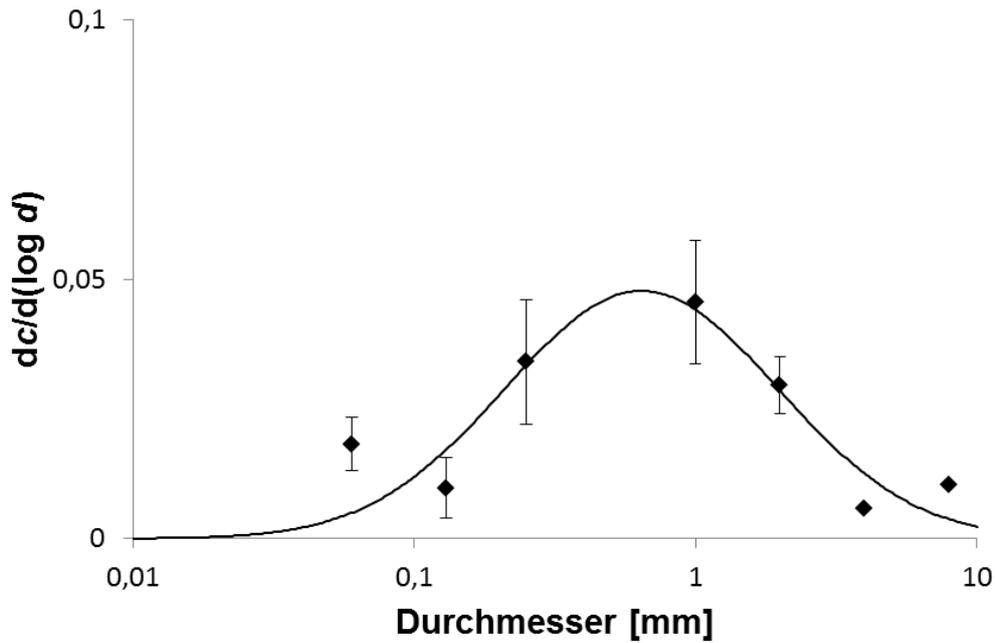


Abb. 3.40 Größenverteilung der Aktivitätskonzentration von Pb-212 aus der direkten Bestimmung mit dem Kaskadenimpaktor. Die Abbildung zeigt die gemessenen Datenpunkte und die gefittete Lognormalverteilung mit einem Medianwert für den Partikeldurchmesser von 2,31 μm und einer geometrischen Standardabweichung von 3,1. Die beiden Datenpunkte bei 4 und 8 μm stellen die Nachweisgrenzen der beiden Detektoren für Pb-212 dar.

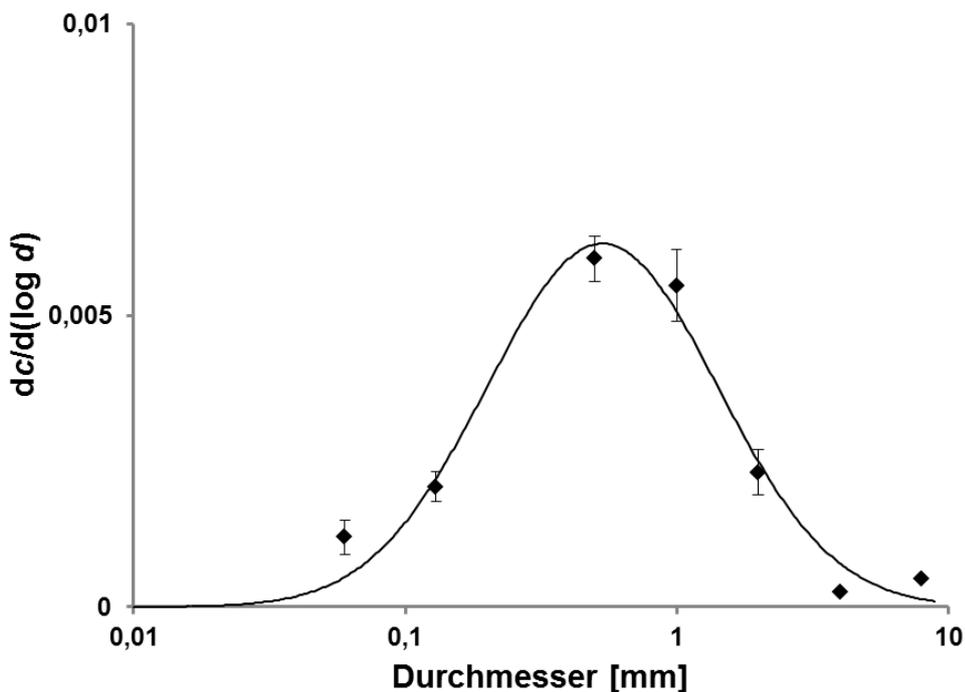


Abb. 3.41 Größenverteilung der Aktivitätskonzentration von Pb-212 aus der indirekten Bestimmung. Die Abbildung zeigt die gemessenen Datenpunkte und die gefittete Lognormalverteilung mit einem Medianwert für den Partikeldurchmesser von 1,39 μm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,6. Die beiden Datenpunkte bei 4 und 8 μm stellen die Nachweisgrenzen der Detektoren für Pb-212 dar.

a) Bauarbeiten in kontaminiertem Gebiet (Bau des neuen Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes)

Ausgehend von der oben beschriebenen Methode, die damit wieder erfolgreich etabliert werden konnte, wurden Filterproben von der Baustelle des Tschernobyl Shelters analysiert. In Abb. 3.42 ist die rekonstruierte Größenverteilung des Filters g-36 dargestellt. Dieser wurde von 18.8. bis 26.8.2015 vor Ort bestaubt.

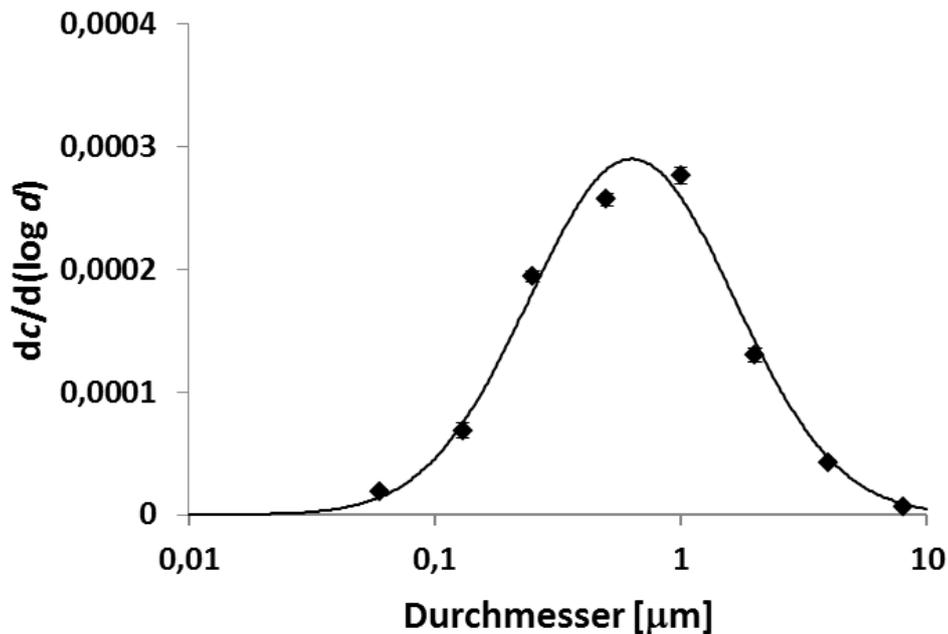


Abb. 3.42 Größenverteilung der Aktivitätskonzentration von Cs-137 des Filters g-36 aus der indirekten Bestimmung. Die Abbildung zeigt die gemessenen Datenpunkte und die gefittete Lognormalverteilung mit einem Medianwert für den Partikeldurchmesser von 1,59 µm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,6.

Anschließend wurde die Größenverteilung für die Filter g-30/31, g-38/39 und g-40/41 bestimmt, die jeweils einen Zeitraum von 2 Wochen beschreiben. Die in dem Zeitraum durchgeführten Arbeiten sind in Anhang 3.1 aufgeführt. In Tabelle 3.31 sind die Parameter Median (AMAD) und geometrische Standardabweichung (σ_g) zusammengefasst.

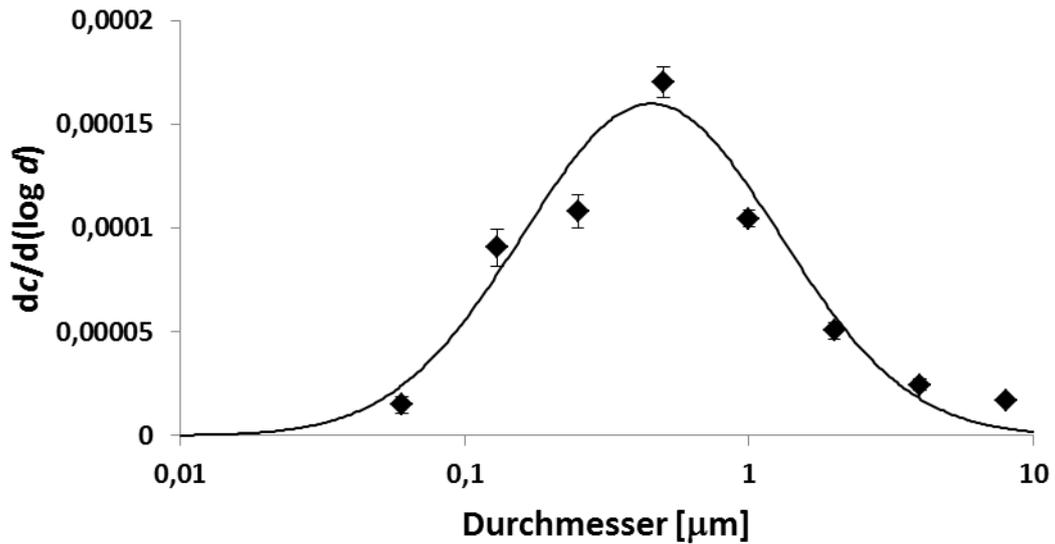


Abb. 3.43 Größenverteilung der Aktivitätskonzentration von Cs-137 der Filter g-30/31 aus der indirekten Bestimmung. Die Abbildung zeigt die gemessenen Datenpunkte und die gefittete Lognormalverteilung mit einem Medianwert für den Partikeldurchmesser von 1,34 µm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,8.

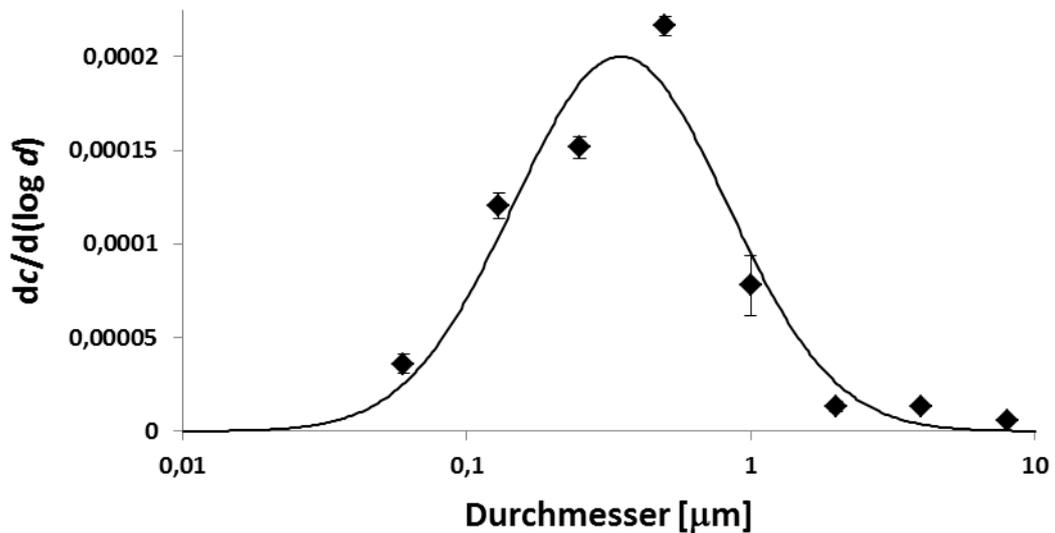


Abb. 3.44 Größenverteilung der Aktivitätskonzentration von Cs-137 der Filter g-38/39 aus der indirekten Bestimmung. Die Abbildung zeigt die gemessenen Datenpunkte und die gefittete Lognormalverteilung mit einem Medianwert für den Partikeldurchmesser von 0,736 µm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,4.

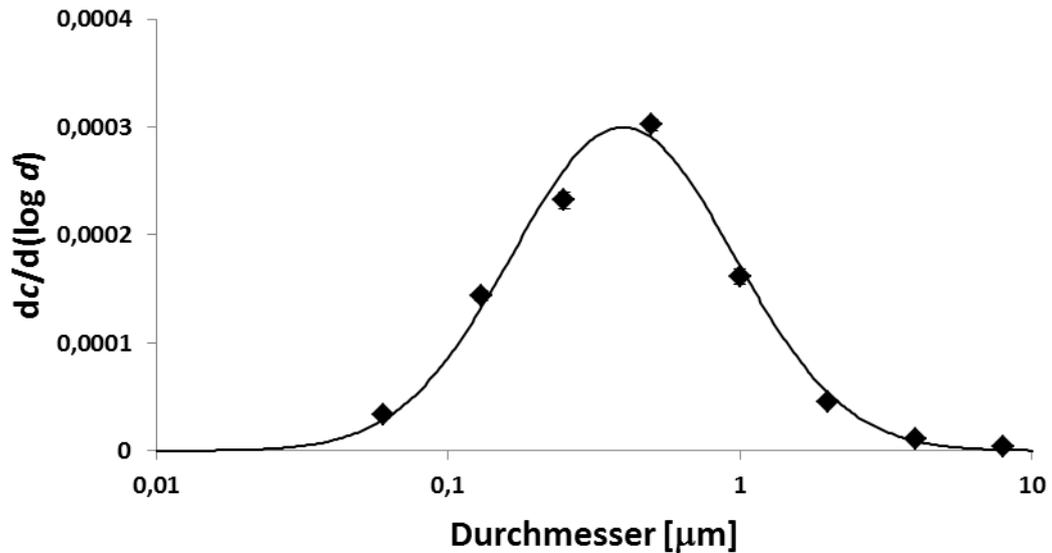


Abb. 3.45 Größenverteilung der Aktivitätskonzentration von Cs-137 der Filter g-40/41 aus der indirekten Bestimmung. Die Abbildung zeigt die gemessenen Datenpunkte und die gefittete Lognormalverteilung mit einem Medianwert für den Partikeldurchmesser von 0,852 µm und einer geometrischen Standardabweichung von 2,4.

Tabelle 3.31 Median des aerodynamischen Durchmessers der ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration (AMAD) und geometrische Standardabweichung (σ_g) für Luftstaubfilter genommen bei Bauarbeiten am neuen Tschernobyl-Shelter. Probenahmedetails finden sich im Anhang 3.1.

Filter	AMAD [µm]	σ_g
g-30/31	1,34	2,8
g-36	1,59	2,6
g-38/39	0,736	2,4
g-40/41	0,852	2,4

b) Schweißarbeiten mit thoriumdotierten Schweißelektroden

Für das Projekt wurden in der Zentralwerkstätte des Helmholtz Zentrum München Schweißarbeiten mit thoriumdotierten Schweißelektroden durchgeführt. Hierzu wurden Elektroden vom Typ WT40 verwendet. Diese besitzen einen Anteil von vier Gewichtsprozent an Thoriumoxid (ThO_2). Th-232 ist ein Alpha-Strahler mit einer sehr langen Halbwertszeit. Es zerfällt in Ra-228, ein beta-Strahler mit einer Halbwertszeit von 5,75 Jahren. Dieses wiederum zerfällt in das relativ kurzlebige Ac-228 (6,15 Stunden Halbwertszeit). Da das Th-232 mit der eingesetzten Methode der Gammaskopie mangels Gammalinien nicht nachweisbar ist und die Gammalinien von Ra-228 bei sehr kleinen Energien liegen, weist man das Th-232 über Ac-228 nach. Es wurden drei Probenahmen von jeweils einem halben Tag durchgeführt, wobei die Zeiten in denen tatsächlich geschweißt wurde zwischen 64 und 138 Minuten betragen haben. Während der Schweißvorgänge wurden sowohl mit einem Bulk-Filtersammler also auch mit dem Kaskadenimpaktor 30-32 von Hauke und einem Personen-Impaktor Luftproben gesammelt. Mit dem Kaskadenimpaktor von Hauke konnten keine bzw. keine nennenswerten Aktivitäten von Ac-228 nachgewiesen werden. Auf den Impaktorfolien des personengetragenen Impaktors konnte ebenfalls keine Aktivität nachgewiesen werden. Daher wurde für die Bestimmung der Aktivitätsgrößenverteilung ausschließlich auf die indirekte Methode zurückgegriffen. Gammaskopische Messungen des gesamten Filters aus der ersten Probenahme zeigen, dass trotz der kurzen Halbwertszeit von Ac-228 dieses Nuklid auch mehrere Wochen später noch vorhanden ist. Daraus kann geschlossen werden, dass das Ac-228 im Bulk-Filter mit einem seiner langlebigen Mutternuklide im radioaktiven Gleichgewicht steht und eine Analyse mittels indirekter Methode trotz der rel. kurzen Halbwertszeit von 6 Stunden daher sinnvoll erscheint. Es konnte jedoch mit dieser Methode keine sinnvolle Aktivitätsgrößenverteilung ermittelt werden. Als Grund hierfür kann angenommen werden, dass nach der Extrahierung die Nuklide nicht mehr im radioaktiven Gleichgewicht sind. Daher kann mittels Gammaskopie nicht mehr eruiert werden, welche Aktivitäten von Ac-228 während der Probenahme in der Zentralwerkstätte vorgelegen haben.

3.5 Zusammenfassung

An drei verschiedenen Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen zu erwartenden Expositionen wurden Aerosolproben analysiert: Tschernobyl, Bau des Reaktorschutzgebäudes; Fukushima, Dekontaminationsarbeiten; Schweißwerkstatt, Wolfram-Inertgasschweißen mit Thoriumoxid dotierten Schweißelektroden. Die Auswertung wurde getrennt nach der Probenart dargestellt: Gesamtstaub, größenfraktionierter Staub und retrospektive Größenbestimmung aus Gesamtstaubproben. Die Löslichkeit in simulierter Lungenflüssigkeit wurde an Gesamtstaubproben durchgeführt. Als Arbeitsprozesse wurden untersucht: Fundierungsarbeiten, Straßenbau, Anlieferung von Baumaterial, Kranarbeiten (Tschernobyl); Grassschneiden, Bodenabtragen, Abrißarbeiten (Fukushima); Aluminium-Schweißen (Schweißwerkstatt). Die Meßergebnisse werden in Arbeitspaket 4 zur Berechnung der Inhalationsdosis benutzt.

Anhang 3.1

Zusammenstellung der Arbeiten an der Baustelle des Tschernobyl Shelter an den ausgesuchten Probenahmeterminen.

Date / filters	Big industry place	Berna (South side machine hall)
14.07 – 28.07.2015 g-30 / g-31	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. It is a lot of movement of heavy transport (concrete, metal designs). 3. Excavations – building of time access roads. Delivery of rubble, concrete blocks. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pour out of road metal an access road, its lay-out (bulldozer) along all length of a southern wall machine hall. 2. Beginning of works on packing of ferro-concrete blocks on the basis – under packing of rails for the big crane have begun. 3. Work of the automobile crane.
18.08 – 26.08.2015 g-36	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planned installation works on HBK (ARCH). 2. Movement of heavy transport (concrete, rubble, sand, metal designs). 3. Excavations – construction continuation in foundation ditches of concrete distributive wells under power cables. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Continuation of works on packing of ferro-concrete blocks under packing of rails for the big crane. 2. On SV coal machine hall – concrete works – erection, operational development of an entry sluice on territory Берны. 3. The beginning of installation of the crane on rails, transportation of details.
09.09 – 22.09.2017 g-38 / g-39	<ol style="list-style-type: none"> 1. Assembly (planned) works on erection HBK (ARCH). 2. Auxiliary (local) works, including earthen (on small sites of soil). 3. Transport works (bring of sand, rubble, concrete, designs), their loading-unloading. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Continuation of installation of rails (packing on concrete blocks-bases under the big crane). 2. Escalating of height of the big crane by means of a truck crane.
22.09 – 07.10.2017 g-40 / g-41	<ol style="list-style-type: none"> 1. Installation works (ARCH designs inside and at end faces). 2. Small (local) excavations around HBK (ARCH). 3. Transport works (heavy transport) bring designs, their unloading. 4. Crane works – rise metal construction on the necessary height. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Escalating of height of the big crane by means of a truck crane. 2. The beginning of building of a sluice (a sluice roof) on SW to a corner machine hall (crane and installation works – installation of overlapping). 3. The termination of assemblage of the big crane. Electric works (connection, operational development) – nearby. 4. Works on concrete rail end face under the ARCH and under Berna.

4 Vergleich der Dosis mit Standardannahmen mit der Dosis unter Verwendung der ermittelten Aerosoleigenschaften

In Arbeitspaket 4 (AP 4) des Vorhabens „Verbesserung der Inhalationsdosimetrie am Arbeitsplatz“ werden für die in AP 1 näher definierten Arbeitsprozesse die Koeffizienten der effektiven Dosis für ^{137}Cs berechnet und diskutiert. Grundlage sind dabei die in AP 2 detailliert dargestellten Probenahmen mit ihrer jeweiligen Methodik und die in AP 3 durchgeführten Messungen und erzielten Ergebnisse. Die durch direkte Messungen erhaltenen expositions-spezifischen Dosiskoeffizienten werden mit den tabellierten Dosiskoeffizienten unter Standardmaßnahmen entsprechend der ICRP-Empfehlungen verglichen. Auf diese Weise kann für die verschiedenen getesteten Arbeitsbereiche ermittelt werden, inwieweit die Standardannahmen zu einer Unter- oder Überschätzung der realistischen Dosis führen. Es wird geprüft, welche Folgerungen für den praktischen Strahlenschutz der Beschäftigten gezogen werden können.

Für die Berechnungen der Dosiskoeffizienten wird die Software „IMBA Professional“ eingesetzt und als Input werden expositions-spezifische und Standard-Parameter verwendet. Zum besseren Verständnis werden zuerst in einem theoretischen Teil die Methodik beschrieben, auf denen die Berechnungen beruhen und die Standard-Parameter erläutert.

4.1 Methodenbeschreibung

Zur Berechnung der Dosiskoeffizienten wird das einheitliche verallgemeinerte Schema verwendet, das von dem MIRDO-Komitee (Medical Internal Radiation Dose Committee) zusammen mit der ICRP (International Commission on Radiological Protection) veröffentlicht wurde (Bolch, Eckerman et al. 2009). Dies wird im folgenden zusammenfassend dargestellt.

Gelangt ein Radionuklid in den menschlichen Körper, so lagert es sich in bestimmten Organen des Körpers vermehrt ab als in den restlichen Regionen. Diese sogenannten Quellorgane, die radionuklidspezifisch sind, werden als Quellen der Aktivität angesehen. Bezeichnet man die Quellorgane mit r_S so lässt sich die Energiedosis $D(r_T, T_D)$ im Zielorgan r_T durch folgende Beziehungen bestimmen:

$$D(r_T, T_D) = \sum_{r_S} \tilde{A}(r_S, T_D) S(r_T \leftarrow r_S) \quad (4.1)$$

Dabei ist \tilde{A} die zeitintegrierte (kumulierte) Aktivität im Quellorgan r_S , was der Anzahl der Umwandlungen in diesem Organ entspricht, über eine Integrationsdauer T_D , die für einen Arbeiter als Referenzmenschen üblicherweise als 50 Jahre angenommen wird (ICRP 1989). $S(r_T \leftarrow r_S)$ bezeichnet den sogenannten S-Faktor, eine für ein Radionuklid charakteristische Größe, die die mittlere Energiedosis im Zielorgan r_T pro zeitintegrierte Aktivität im Quellorgan darstellt.

Mit der Organdosis $H(r_T, T_D)$:

$$H(r_T, T_D) = \sum_R w_R D_R(r_T, T_D) \quad (4.2)$$

wird schließlich die Effektivdosis E definiert (ICRP 2007):

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H(r_T, T_D)^{Male} + H(r_T, T_D)^{Female}}{2} \right] \quad (4.3)$$

Dabei sind:

w_R	Strahlungs-Wichtungsfaktor
w_T	Gewebe-Wichtungsfaktor für Organ T , mit der Bedingung, dass $\sum_T w_T = 1$ ist.
$H(r_T, T_D)^{Male}$	Organdosis eines Referenzmannes
$H(r_T, T_D)^{Female}$	Organdosis einer Referenzfrau

Spricht man über die Dosiskoeffizienten so sind die berechneten Dosen pro verabreichte Aktivität A_0 zu nehmen.

Die S-Faktoren für verschiedene Energien und Strahlungsarten sind entweder tabelliert in der Literatur zu finden oder können mit Hilfe diverser Tools berechnet bzw. ausgegeben werden.

Um die zeitintegrierte Aktivität \tilde{A} bestimmen zu können ist die Kenntnis der Aktivitätszufuhr, deren Deposition in Organen oder Gewebe, des Transports im menschlichen Körper und die Absorption ins Blut notwendig.

Das Depositionsmodell von der ICRP, das in der Abb. 4.1 dargestellt ist, beschreibt das Verhalten von Aerosolen in den Atemwegen und ist erforderlich, um die Anteile der Radioaktivität in der

Atemluft abzuschätzen, die in jedem anatomischen Bereich einer exponierten Person abgelagert werden.

Das Depositionsmodell wird durch folgende Parameter charakterisiert: Der mittlere aerodynamische Aktivitätsdurchmesser der Partikel (AMAD), die geometrische Standardabweichung σ_g in der Partikelgröße, die Partikeldichte und der Partikel-Formfaktor. Die Standardwerte für die Partikeldichte und den Formfaktor sind von der ICRP als $3gcm^{-3}$ bzw. 1,5 angegeben (ICRP 1994).

Mit Hilfe dieser Parameter und den Transferkoeffizienten, die einzelne Kompartimente des biokinetischen Modells miteinander verbinden, können die erforderlichen Anteile der Radioaktivität in den einzelnen Körperregionen bestimmt werden.

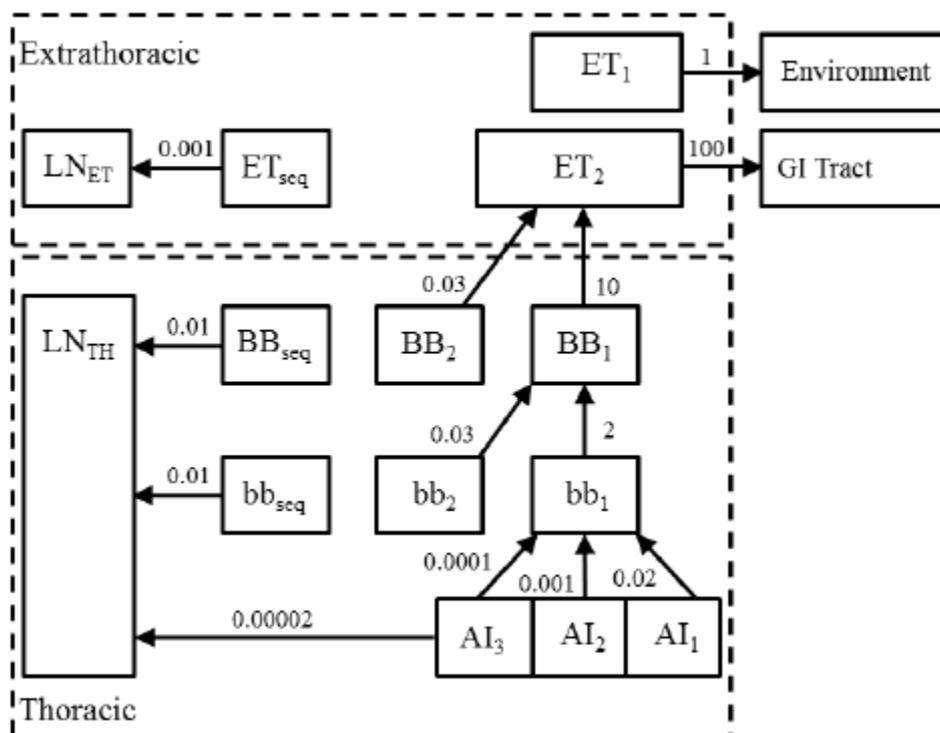


Abb. 4.1 Kompartimentmodell für das Partikeltransport im Respirationstrakt (ICRP 1994)

Der Referenzwert für die mittlere Atmungsrate bei der Aufnahme von Luft am Arbeitsplatz wird von der ICRP als $1,2 m^3h^{-1}$ angegeben (ICRP 1994). Mit diesem Wert und der mittleren Aktivitätskonzentration in der Luft C_A von $7,58E-04 Bqm^{-3}$, kann die nominale Aufnahmerate I_0 in die Atemwege nach folgender Relation berechnet werden:

$$I_0 = 1,2 \times C_A Bqh^{-1} \quad (4.1)$$

Die tatsächliche Aufnahme der Aktivität in die Atemwege ist durch die sogenannte Inhalierbarkeit bestimmt, die von der Aerosolgröße abhängt. Die Werte der fraktionellen Ablagerung der Aktivität in jede dosimetrische Region des Respirationstraktes, in Abhängigkeit von der nominalen Aufnahme und Aerosolgröße, können den Tabellen in der Literatur entnommen werden (ICRP 1994).

Die Aufnahme von Partikeln ins Blut wird durch das Absorptionsmodell durch folgende Relation beschrieben:

$$f = f_r e^{-s_r t} + (1 - f_r) e^{-s_s t} \quad (4.2)$$

Dabei ist f_r der Anteil des Stoffes, der sich mit der Rate s_r , relativ schnell löst. Der verbliebene Anteil $(1 - f_r)$ löst sich dagegen langsamer, mit der Rate s_s . Mit der Beziehung 4.5 ist die Löslichkeit von ^{137}Cs , wie sie im AP 3 beschrieben wurde, parametrisiert.

Bezüglich dieser Anteile und Raten können verschiedene Absorptionstypen definiert werden. Die Materialien vom Typ F, M und S sind im Körper abgelagerte Stoffe, die schnell, moderat oder langsam aus den Atemwegen ins Blut absorbiert werden.

Basieren auf verschiedenen Studien, wird hier angenommen, dass ^{137}Cs sich eher moderat als schnell absorbieren lässt (Cuddihy, Finch et al. 1989, Mirell and Bland 1989, Kutkov and Komaritskaya 1996, Kutkov 1998, Kutkov 2000).

In dieser Arbeit wurden die Berechnungen jedoch sowohl für den Absorptionstyp F als auch M gemacht, um die berechneten Werte mit den Referenzwerten von der ICRP vergleichen zu können. Der Durchgang der inhalierten Stoffe durch den Gastrointestinal Trakt wird durch das entsprechende mathematische Modell der ICRP beschrieben (ICRP 1989). In dieser Arbeit wurden die Standardparameter dieses Modells verwendet. Der Anteil f_1 des Materials, der aus dem Gastrointestinaltrakt direkt ins Blut absorbiert wird, wurde für das Absorptionstyp F und M entsprechend zu $f_1 = 1$ bzw. $f_1 = 0,1$ gesetzt (ICRP 1995).

Aus den oben beschriebenen Parametern, die in dieser Arbeit gewonnen wurden, ist der Koeffizient der effektiven Dosis mit Hilfe der Software „IMBA Professional“ berechnet worden (Birchall, Puncher et al. 2003).

4.2 Dosiskoeffizienten aus spezifischen Aerosolparametern

In den folgenden Tabellen 4.1-4.4 sind, wie oben beschrieben, die berechneten Koeffizienten der effektiven Dosis und die bei der Berechnung verwendeten Modellparametern für ^{137}Cs für die Filter aus Tschernobyl dargestellt. Dabei wurden, soweit experimentell bestimmt, die expositions-spezifischen Aerosolparameter benutzt.

Die experimentellen Werte für AMAD und geometrische Standardabweichung (Tabellen 4.1 – 4.2) sind dem Bericht von AP 3, Kapitel III entnommen: sie entsprechen den dort ermittelten Werten aus den Abbildungen 3.42 – 3.45 (retrospektive Größenbestimmung). Die Werte für AMAD und geometrische Standardabweichung der Tabelle 4.3 und 4.4 beruhen auf den Größenverteilungen an der Baustelle von Tschernobyl aus AP 3, Kapitel II, Table 3.26 (outdoor) und Table 3.30 (indoor). Bei fehlenden AMAD-Werten und Werten für die geometrische Standardabweichung für die Filter g-32 und g-38 in Tabelle 4.1, wurden für die Berechnung die Standardwerte nach ICRP verwendet. Für den Standardarbeiter gibt die ICRP dazu $5\ \mu\text{m}$ für den AMAD und 2,5 für die geometrische Standardabweichung vor.

In den Tabellen 4.1 und 4.2 entsprechen die Löslichkeitsparameter f_r , s_r und s_s aus der Gleichung 4.5 den zuvor berechneten und im Bericht von AP 3, Kapitel I beschriebenen Werten a_1 , λ_1 und λ_2 (AP 3, I, Tabellen 3.11, 3.14, 3.17 und 3.21). Der Koeffizient der effektiven Dosis wurde sowohl für $f_1=1$ als auch für $f_1=0,1$ berechnet, da diese Werte bei Stoffen des Absorptionstyps F bzw. M verwendet werden.

Für die fehlenden experimentellen Löslichkeitsparameter der beiden Impaktormessungen mit Andersen PM10 und IBP (Tabelle 4.3 und 4.4) wurden bei der Berechnung die Standardwerte der ICRP eingesetzt. Dies sind für die Stoffe des F-Typs $f_r = 1$, $s_r = 100$, $s_s = 0$ und für den M-Typ $f_r = 0,1$, $s_r = 100$ und $s_s = 0,005$ (ICRP 2015).

Tabelle 4.1 Die Koeffizienten der effektiven Dosis und die verwendeten Modellparameter von ^{137}Cs für die Filter g-32, g-36 und g-38 aus Tschernobyl.

Datum	Filtername	AMAD [μm]	Geom. STD	f_r	s_r	s_s	f_1	Eff. dose coeff. [nSvBq $^{-1}$]
28.07-04.08.15	g-32 Garger	ICRP Defaults		0,083	0,035	1,79E-10	1	29,0
	g-32_1			0,081	0,084	4,49E-05	1	26,9
	g-32_2			0,170	0,088	1,00E-04	1	23,1
	g-32 Garger	ICRP Defaults		0,083	0,035	1,79E-10	0,1	23,7
	g-32_1			0,081	0,084	4,49E-05	0,1	21,6
g-32_2	0,170			0,088	1,00E-04	0,1	18,1	
28.07-04.08.15	g-36 Garger	1,59	2,61	0,123	0,041	5,26E-05	1	38,2
	g-36_1	1,59	2,61	0,120	0,089	6,09E-05	1	37,6
	g-36_2	1,59	2,61	0,119	0,080	7,28E-05	1	36,9
	g-36 Garger	1,59	2,61	0,123	0,041	5,26E-05	0,1	34,0
	g-36_1	1,59	2,61	0,120	0,089	6,09E-05	0,1	33,4
g-36_2	1,59	2,61	0,119	0,080	7,28E-05	0,1	32,7	
09.09-15.09.15	g-38 Garger	ICRP Defaults		0,400	0,095	3,79E-04	1	15,7
	g-38_1			0,428	0,126	2,00E-04	1	16,8
	g-38_2			0,353	0,123	2,00E-04	1	18,0
	g-38 Garger	ICRP Defaults		0,400	0,095	3,79E-04	0,1	10,8
	g-38_1			0,428	0,126	2,00E-04	0,1	11,8
g-38_2	0,353			0,123	2,00E-04	0,1	13,0	

Tabelle 4.2 Die Koeffizienten der effektiven Dosis und die verwendeten Modellparameter von ¹³⁷Cs für die Filter g-30/31, g-38/39 und g-40/41 aus Tschernobyl.

Datum	Filtername	AMAD [µm]	Geom. STD	f _r	s _r	s _s	f ₁	Eff. dose coeff. [nSvBq ⁻¹]
14.07-28.07.15	g-30/31	1,34	2,83	0,170	0,093	1,00E-04	1	33,9
09.09-22.09.15	g-38/39	0,74	2,37	0,317	0,107	3,00E-04	1	23,5
22.09-07.10.15	g-40/41	0,85	2,39	0,243	0,093	2,00E-04	1	28,3
14.07-28.07.15	g-30/31	1,34	2,83	0,170	0,093	1,00E-04	0,1	30,0
09.09-22.09.15	g-38/39	0,74	2,37	0,317	0,107	3,00E-04	0,1	20,8
22.09-07.10.15	g-40/41	0,85	2,39	0,243	0,093	2,00E-04	0,1	25,3

Tabelle 4.3 Die Koeffizienten der effektiven Dosis und die verwendeten Modellparameter von ¹³⁷Cs für den Andersen Impaktor PM10 eingesetzt an der Baustelle des neuen Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes.

Datum	AMAD [µm]	Geom. STD	f _r	s _r	s _s	f ₁	Eff. dose coeff. [nSvBq ⁻¹]
02.07-14.07.15	2,69	3,26	ICRP Defaults (Type F)				6,08
15.07-28.07.15	3,05	2,64					6,55
29.07-06.08.15	1,05	3,19					4,98
18.08-01.09.15	2,11	2,71					6,33
09.09-22.09.15	1,67	3,14					5,62
22.09-07.10.15	2,34	2,82					6,19
22.10-03.11.15	2,08	2,90					5,99
			ICRP Defaults (Type M)				
02.07-14.07.15	2,69	3,26					8,56
15.07-28.07.15	3,05	2,64					8,93
29.07-06.08.15	1,05	3,19					9,61
18.08-01.09.15	2,11	2,71					9,47
09.09-22.09.15	1,67	3,14					9,28
22.09-07.10.15	2,34	2,82					9,20
22.10-03.11.15	2,08	2,90	9,26				

Tabelle 4.4 Die Koeffizienten der effektiven Dosis und die verwendeten Modellparameter von ¹³⁷Cs für den IBP-Impaktor betrieben an einem Bypass im Inneren des Tschernobyl Reaktorschutzgebäudes.

Datum	AMAD [µm]	Geom. STD	f _r	s _r	s _s	f ₁	Eff. dose coeff. [nSvBq ⁻¹]
16.04-21.04.15	1,88	4,80	ICRP Defaults (Type F)				5,43
21.04-28.04.15	1,70	4,68					5,40
28.04-12.05.15	1,84	4,76					5,44
15.05-19.05.15	1,92	4,60					5,47
23.09-29.09.15	8,04	2,40					6,30
29.09-07.10.15	1,78	4,72					5,42
27.10-03.11.15	2,50	4,72					5,47
03.11-10.11.15	7,29	2,45					6,42
10.11-17.11.15	7,90	2,32					6,37
17.11-24.11.15	6,02	2,88					6,35
16.04-21.04.15	1,88	4,80	ICRP Defaults (Type M)				8,78
21.04-28.04.15	1,70	4,68					8,98
28.04-12.05.15	1,84	4,76					8,83
15.05-19.05.15	1,92	4,60					8,75
23.09-29.09.15	8,04	2,40					5,30
29.09-07.10.15	1,78	4,72					8,89
27.10-03.11.15	2,50	4,72					8,67
03.11-10.11.15	7,29	2,45					5,78
10.11-17.11.15	7,90	2,32					5,35
17.11-24.11.15	6,02	2,88					6,53

Die Tabelle 4.5 stellt die berechneten Koeffizienten der effektiven Dosis und die bei der Berechnung verwendeten Modellparametern für ¹³⁷Cs für die Messung in der Sperrzone von Fukushima am Probenahmeort „T“ dar. Hier wurde ein Berner Impaktor zur Größenklassifizierung, benutzt. Bei der Berechnung der Koeffizienten der effektiven Dosis gehen wir von der bimodalen Größenverteilung der Aktivität aus, wie sie im AP 3, Kapitel II b) beschrieben wurde. Die Werte für AMAD und die geometrische Standardabweichung entsprechen den im AP 3 ermittelten Werten. Dabei wurden bei der Berechnung der Dosiskoeffizienten die anteiligen Flächen der beiden Lognormalverteilungen berücksichtigt (AP 3/II b, Abb. 3.39). Wegen der zu geringen Aktivität auf Filter und Impaktorfolien konnten die Parameter der Löslichkeit nicht gemessen werden. Auch hier

wurden die ICRP-Standardwerte für die Absorptionstypen F und M eingesetzt (siehe auch Tschiersch et al., 2017).

Tabelle 4.5 Die Koeffizienten der effektiven Dosis und die verwendeten Modellparameter von ^{137}Cs für die Messungen am Probenahmeort „T“ in der Fukushima Sperrzone.

Datum	Filtername	AMAD [μm]	Geom. STD	f_r	s_r	s_s	f_1	Eff. dose coeff. [nSvBq $^{-1}$]
15.12-19.12.16	TI01-TI03	0,86	1,92	ICRP Defaults (Type F)				4,19
		5,47	1,88					7,11
						Σ	6,42	
15.12-19.12.16	TI01-TI03	0,86	1,92	ICRP Defaults (Type M)				8,61
		5,47	1,88					6,66
						Σ	7,13	

Wie im AP 3 beschrieben, waren die Mengen an ^{137}Cs auf den Fukushima-Filtern und auf den Filtern bei Schweißarbeiten zu gering, so dass hier keine Löslichkeitswerte ermittelt werden konnten. Auch die Bestimmung der Größenverteilung der Aktivität war wegen der im AP 3 beschriebenen Problemen nicht erfolgreich. Aus diesem Grund konnten sowohl für die Fukushima-Filter als auch für die Schweißarbeiten mit thoriumdotierten Schweißelektroden keine expositions-spezifischen Dosiskoeffizienten berechnet werden.

Die Tabellen 4.6 und 4.7 stellen die Dosisraten für die Arbeiter an verschiedenen Arbeitsplätzen, berechnet für ^{137}Cs und ^{228}Ac nach Absorptionstyp F und M. Die Aktivitätsraten wurden aus den Aktivitätskonzentrationen (siehe AP 3) und der Atmungsrate von $1,2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ berechnet. Die berechnete Dosis pro Std. liegt im Bereich von $0,00375 \text{ nSv h}^{-1}$ bis $5,51 \text{ nSv h}^{-1}$.

Tabelle 4.6 Dosisraten von ^{137}Cs und ^{228}Ac , berechnet für den Absorptionstyp F

Filter	Art der Tätigkeit	Aktivitätsrate [Bqh ⁻¹]	Koeffizient der eff. Dosis [nSvBq ⁻¹]	Dosisrate [nSvh ⁻¹]
Tschernobyl				
g-32 Garger	Anlieferung von Baumaterial	2,84E-02	29,0	8,21E-01
g-32_1	Anlieferung von Baumaterial	2,84E-02	26,9	7,62E-01
g-32_2	Anlieferung von Baumaterial	2,84E-02	23,1	6,55E-01
g-36 Garger	Fundierungsarbeiten	2,84E-02	38,2	1,08E+00
g-36_1	Fundierungsarbeiten	2,84E-02	37,6	1,07E+00
g-36_2	Fundierungsarbeiten	2,84E-02	36,9	1,05E+00
g-38 Garger	Straßenbau	3,31E-02	15,7	5,21E-01
g-38_1	Straßenbau	3,31E-02	16,8	5,56E-01
g-38_2	Straßenbau	3,31E-02	18,0	5,97E-01
g-30/31	Anlieferung von Baumaterial	4,25E-02	33,9	1,44E+00
g-38/39	Straßenbau	5,17E-02	23,5	1,21E+00
g-40/41	Anlieferung; Kranarbeiten	6,61E-02	28,3	1,87E+00
02.07-14.07.15	Anlieferung von Baumaterial	6,17E-04	6,08	3,75E-03
15.07-28.07.15	Straßenbau	2,23E-03	6,55	1,46E-02
29.07-06.08.15	Anlieferung von Baumaterial	2,03E-03	4,98	1,01E-02
18.08-01.09.15	Fundierungsarbeiten	4,62E-03	6,33	2,93E-02
09.09-22.09.15	Straßenbau	2,21E-03	5,62	1,24E-02
22.09-07.10.15	Anlieferung von Baumaterial	2,20E-03	6,19	1,36E-02
22.10-03.11.15	Kranarbeiten	3,36E-03	5,99	2,01E-02
16.04-21.04.15	Anlieferung von Baumaterial	5,17E-01	5,43	2,81E+00
21.04-28.04.15	Anlieferung von Baumaterial	3,55E-01	5,40	1,92E+00
28.04-12.05.15	Fundierungsarbeiten	4,42E-01	5,44	2,40E+00
15.05-19.05.15	Fundierungsarbeiten	3,08E-01	5,47	1,69E+00
23.09-29.09.15	Kranarbeiten	6,92E-01	6,30	4,36E+00
29.09-07.10.15	Kranarbeiten	3,29E-01	5,42	1,78E+00
27.10-03.11.15	Kranarbeiten	3,71E-01	5,47	2,03E+00
03.11-10.11.15	Kranarbeiten	8,32E-01	6,42	5,34E+00
10.11-17.11.15	Kranarbeiten	8,65E-01	6,37	5,51E+00
17.11-24.11.15	Kranarbeiten	4,50E-01	6,35	2,86E+00
Fukushima				
15.12.2016	Abrißarbeiten	9,10E-04	6,42	5,84E-03

Tabelle 4.7 Dosisraten von ^{137}Cs und ^{228}Ac , berechnet für den Absorptionstyp M

Filter	Art der Tätigkeit	Aktivitätsrate [Bqh ⁻¹]	Koeffizient der eff. Dosis [nSvBq ⁻¹]	Dosisrate [nSvh ⁻¹]
Tschernobyl				
g-32 Garger	Anlieferung von Baumaterial	2,84E-02	23,7	6,73E-01
g-32_1	Anlieferung von Baumaterial	2,84E-02	21,6	6,13E-01
g-32_2	Anlieferung von Baumaterial	2,84E-02	18,1	5,12E-01
g-36 Garger	Fundierungsarbeiten	2,84E-02	34,0	9,64E-01
g-36_1	Fundierungsarbeiten	2,84E-02	33,4	9,46E-01
g-36_2	Fundierungsarbeiten	2,84E-02	32,7	9,29E-01
g-38 Garger	Straßenbau	3,31E-02	10,8	3,57E-01
g-38_1	Straßenbau	3,31E-02	11,8	3,91E-01
g-38_2	Straßenbau	3,31E-02	13,0	4,31E-01
g-30/31	Anlieferung von Baumaterial	4,25E-02	30,0	1,27E+00
g-38/39	Straßenbau	5,17E-02	20,8	1,08E+00
g-40/41	Anlieferung; Kranarbeiten	6,61E-02	25,3	1,67E+00
02.07-14.07.15	Anlieferung von Baumaterial	6,17E-04	8,56	5,28E-03
15.07-28.07.15	Straßenbau	2,23E-03	8,93	1,99E-02
29.07-06.08.15	Anlieferung von Baumaterial	2,03E-03	9,61	1,95E-02
18.08-01.09.15	Fundierungsarbeiten	4,62E-03	9,47	4,38E-02
09.09-22.09.15	Straßenbau	2,21E-03	9,28	2,05E-02
22.09-07.10.15	Anlieferung von Baumaterial	2,20E-03	9,20	2,02E-02
22.10-03.11.15	Kranarbeiten	3,36E-03	9,26	3,11E-02
16.04-21.04.15	Anlieferung von Baumaterial	5,17E-01	8,78	4,54E+00
21.04-28.04.15	Anlieferung von Baumaterial	3,55E-01	8,98	3,19E+00
28.04-12.05.15	Fundierungsarbeiten	4,42E-01	8,83	3,90E+00
15.05-19.05.15	Fundierungsarbeiten	3,08E-01	8,75	2,70E+00
23.09-29.09.15	Kranarbeiten	6,92E-01	5,30	3,67E+00
29.09-07.10.15	Kranarbeiten	3,29E-01	8,89	2,92E+00
27.10-03.11.15	Kranarbeiten	3,71E-01	8,67	3,21E+00
03.11-10.11.15	Kranarbeiten	8,32E-01	5,78	4,80E+00
10.11-17.11.15	Kranarbeiten	8,65E-01	5,35	4,63E+00
17.11-24.11.15	Kranarbeiten	4,50E-01	6,53	2,94E+00
Fukushima				
15.12.2016	Abrißarbeiten	9,10E-04	7,13	6,48E-03

4.3 Vergleich mit ICRP-Referenz Dosiskoeffizienten

In Tabelle 4.8 sind die die Referenzwerte für die Koeffizienten der effektiven Dosis für ^{137}Cs für verschiedene Absorptionstypen, wie sie in diversen ICRP-Publikationen angegeben sind zusammengestellt. Die Werte sind bezogen auf die Referenzpartikelgrößen (AMAD) des Aerosols von $1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$.

Tabelle 4.8 Referenzwerte der ICRP für die Koeffizienten der effektiven Dosis für ^{137}Cs Expositionen bei den Löslichkeitsklassen F; M und S und bei AMAD-Werten von 1 und $5\ \mu\text{m}$.

	Type F $1\ \mu\text{m}$ [nSvBq $^{-1}$]	Type M $1\ \mu\text{m}$ [nSvBq $^{-1}$]	Type S $1\ \mu\text{m}$ [nSvBq $^{-1}$]		Type F $5\ \mu\text{m}$ [nSvBq $^{-1}$]
ICRP56	8,60				
ICRP68	4,80				6,70
ICRP71	4,60	9,70	39,0		
ICRP72	4,60	9,70	39,0		6,70
ICRP119	4,60	9,70	39,0		

Die Dosiskoeffizienten, die für die Tschernobyl-Filter bei Bauarbeiten am neuen Reaktorschutzgebäude in den Tabellen 4.1 und 4.2 berechnet wurden, sind im Vergleich zu den Referenzwerten des ICRP Absorptionstyps F der Tabelle 4.8 wesentlich größer. Die berechneten expositions-spezifischen Dosiskoeffizienten liegen in einem Bereich von $10,8\ \text{nSvBq}^{-1}$ bis $38,2\ \text{nSvBq}^{-1}$, resultierend aus den gemessenen Löslichkeitsparametern, AMAD-Werten und geometrischen Standardabweichungen. Diese expositions-spezifischen Dosiskoeffizienten lassen eher auf einen Referenzwert vom Absorptionstyp M oder S schließen.

Die Dosiskoeffizienten, die für die Messungen an der Tschernobyl Baustelle aus den weiteren Messdaten (Tabelle 4.3) berechnet wurden, liegen für den Absorptionstyp F im Bereich von $4,98\ \text{nSvBq}^{-1}$ bis $6,55\ \text{nSvBq}^{-1}$ und für den Absorptionstyp M im Bereich von $8,56\ \text{nSvBq}^{-1}$ bis

9,61 nSvBq⁻¹ . Diese Werte unterscheiden sich nicht wesentlich von den Referenzwerten der Tabelle 4.8.

Für die Messungen im Innenraum des Tschernobyl Shelters (Tabelle 4.4) liegen die Dosiskoeffizienten für den Absorptionstyp F im Bereich von 5,40 nSvBq⁻¹ bis 6,42 nSvBq⁻¹. Für den Absorptionstyp M liegen die Werte im Bereich von 5,30 nSvBq⁻¹ bis 8,98 nSvBq⁻¹. Auch hier sind die spezifischen Werte vergleichbar den Referenzwerten der Tabelle 4.8.

Die Dosiskoeffizienten, die auf den spezifischen Messung bei Dekontaminationsarbeiten in der Fukushima Sperrzone beruhen, sind mit 6,42 nSvBq⁻¹ (Typ F) und 7,13 nSvBq⁻¹ von der gleichen Größenordnung wie die Referenzwerte der ICRP. Allerdings muss man bei dem Vergleich berücksichtigen, dass für die Löslichkeitsparameter ebenfalls Standardwerte nach ICRP benutzt wurden.

4.4 Schlussfolgerungen

Der Vergleich der berechneten Dosiskoeffizienten (Tabelle 4.1 und 4.2) mit den Referenzwerten der ICRP vom Typ F und M (Tabelle 4.5) zeigt große Unterschiede zwischen den auf Messdaten beruhenden Dosiskoeffizienten und den Referenzwerten auf. Die angegebenen Referenzwerte der ICRP unterschätzen stark die Dosiskoeffizienten für die Bauarbeiter im kontaminierten Gebiet von Tschernobyl. Ursache hierfür sind im Wesentlichen die experimentell bestimmten Löslichkeiten von ¹³⁷Cs in simulierter Lungenflüssigkeit. Die ermittelten Parameter lassen sich nicht eindeutig einem bestimmten Absorptionstyp F, M oder S zuordnen. Es scheint hier ein Mischtyp vorzuliegen mit einem starken Beitrag des Absorptionstyps S. Auch wenn ¹³⁷C in der Literatur hauptsächlich als ein Absorptionstyp F oder M behandelt wird (Cuddihy, Finch et al. 1989, Mirell and Blahd 1989, Kutkov and Komaritskaya 1996, Kutkov 1998, Kutkov 2000), kann dies aus den Berechnungen in diesem Projekt nicht gefolgert werden. Somit wird auch der Vergleich mit dem Referenzwert der ICRP für den Absorptionstyp S möglich, allerdings liegt dieser Referenzwert am oberen Ende des hier gemessenen Bereichs.

Verglichen mit dem Referenzwert der ICRP für AMAD (5 μ m), variieren die berechneten AMAD-Werte in dieser Arbeit im Bereich von 0,74 μ m bis 8,04 μ m. Der Einfluss der AMAD-Werte auf die Dosiskoeffizienten ist aus den Berechnungen für die Impaktoren PM10 und IBP in Tschernobyl

(Tabelle 4.3 und 4.4) gut ersichtlich. Größere AMAD-Werte haben größere Dosiskoeffizienten zur Folge. Wegen der verwendeten ICRP-Werte für die Löslichkeitsparameter, zeigt der Vergleich der berechneten Dosiskoeffizienten mit den Referenzwerten der ICRP hier gute Übereinstimmung.

Für die wieder zu besiedelten Gebiete von Fukushima wurden aus den Messungen mit dem Impaktor AMAD-Werte der Aktivitätsverteilung ermittelt (Tabelle 4.5), die den Standardwerten der ICRP ($1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$) nah liegen. Die daraus berechneten Dosiskoeffizienten sind im Vergleich zu den ICRP-Werten etwas kleiner. Für die Dekontaminationsarbeiten in Fukushima sind somit die Referenzwerte der ICRP etwas zu konservativ. Allerdings wäre es auch hier entscheidend, experimentelle Löslichkeitsparameter zu erhalten.

4.5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Software „IMBA Professional“ wurden aus den Messungen in Tschernobyl und Fukushima die Dosiskoeffizienten berechnet. Als Input wurden dabei Parameter verwendet, die zuvor aus den Löslichkeitsexperimenten sowie aus den Berechnungen der Größenverteilungen der Aktivität ermittelt wurden. Die berechneten Koeffizienten der effektiven Dosis für das Radionuklid ^{137}Cs liegen im Bereich von $4,98\ \text{nSvBq}^{-1}$ bis $38,2\ \text{nSvBq}^{-1}$ und sind vergleichbar mit den Referenzwerten der ICRP für die Partikel der Größe $1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$ und verschiedene Absorptionstypen. Die experimentellen Löslichkeitsparameter deuten für ^{137}Cs auf einen signifikanten Beitrag des Absorptionstyp S hin, was einen höheren Dosiskoeffizienten nach sich ziehen würde. Hier sind noch weitere Messungen an Luftstaubproben zur Löslichkeit in Lungenflüssigkeit angeraten.

5 Literaturverzeichnis

- A. Berner, C.H. Lürzer, L. Pohl, O. Preining, P. Wagner (1979). The size distribution of the urban aerosol in Vienna. *Sci. Total. Environ.* 13, 245-261.
- BfS/BMU (2015):– Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2013: Unterrichtung durch die Bundesregierung. Teil III: Berufliche Strahlenexposition. urn:nbn:de:0221-2015072412951
- Birchall, A., M. Puncher, A. C. James, J. W. Marsh, N. S. Jarvis, M. S. Peace, K. Davis and D. J. King (2003). "IMBA-EXERTTM: Internal dosimetry made simple." *Radiat. Prot. Dosim.* **105**: 421-424.
- Bogatov CA, Borovoi AA, Dubasov YuV, Lomonosov VV(1990) Shape and characteristics of particles of the fuel emission during the accident at the Chernobyl NPP (in Russian). *At Energy* 69: 36–40
- Bogatov SA (2000) Inventory assessment and determination of properties of the dust contamination in the under-roof space of the Shelter (in Russian). National Academy of Sciences of Ukraine, Interdisciplinary Scientific and Technical Centre “Shelter“, Preprint 00–2, Chernobyl, p. 16
- Bolch, W. E., K. F. Eckerman, G. Sgouros and S. R. Thomas (2009). "MIRD Pamphlet No. 21: A generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry - standardization of nomenclature." *J. Nucl. Med.* **50**: 477-484.
- Borovoj AA (1990) Into and out of Sarcophagus (in Russian). *Nature* 11: 83–90
- Borovoj AA (2000) Emissions of the nuclear fuel and fission products of the 4-th block of ChNPP during the accident (review) (in Russian). INTS “Ukrytie” NAN Ukraine, Chernobyl
- Borovoj AA, Gagarinskiy AYu (2001) Release of radionuclides from the destroyed block of the Chernobyl NPP (in Russian). *At Energy* 90: 137–145.
- Cuddihy, R. G., G. L. Finch, G. J. Newton, F. F. Hahn, J. A. Mewhinney, S. J. Rothenberg and D. A. Powers (1989). "Characteristics of radioactive particles released from the Chernobyl nuclear reactor." *Environ. Sci. Technol.* **23**: 89–95.
- M.-D. Dorrian, M. R. Bailey (1995): Particle size distributions of radioactive aerosols measured in workplaces. *Radiat. Prot. Dosimetry* 60, 119–133.
- Frank, G., Kashparov, V., Protsak, V., Tschiersch, J.: Comparison measurements of a Russian standard aerosol impactor with several western standard aerosol instruments. *J. Aerosol Sci.* 27, 477-486 (1996).

G. Frasch, L. Kammerer, R. Karofsky, E. Mordek, A. Schlosser, J. Spiesl (2015): Die berufliche Strahlenexposition in Deutschland 2013 - 2014 : Bericht des Strahlenschutz-registers. BfS-SG-23/15, urn:nbn:de:0221-2015100213555, 76 Seiten.

Garger, E.K., Kashpur, V., Belov, G., Demchuk, V., Tschiersch, J., Wagenpfeil, F., Paretzke, H.G., Besnus, F., Holländer, W., Martinez-Serrano, J., Vintersved, I.: Measurement of resuspended aerosol in the Chernobyl area. Part I: Discussion of instrumentation and uncertainty of measurement. *Radiation and Environmental Biophysics* 36, 139-148 (1997)

Garger EK, Kashpur VA, Gurgula BI, Paretzke HG, Tschiersch J (1994) Statistical characteristics of the activity.concentration in the surface layer of the atmosphere in the 30 km zone of Chernobyl. *J. Aerosol Sci.* 25: 767–777

Garger EK, Kashpur VA, Korneev AA, Kurochkin AA (2001) Investigation results of the radioactive releases from the object ‘‘Shelter’’ (in Russian). In: Proceedings of the problems of Chernobyl, SSE Chernobyl NPP, NASc of Ukraine, vol 10, pp. 60–71.

E.K. Garger, V.A. Kashpur, W.B. Li, J. Tschiersch (2006): Radioactive aerosols released from the Chernobyl Shelter into the immediate environment. *Radiat. Environ. Biophys.* 45, 105-114.

E.K. Garger, O. Meisenberg, O. Odintsov, V. Shynkarenko, J. Tschiersch (2013): Solubility of hot fuel particles from Chernobyl – influencing parameters for individual radiation dose calculations. *Talanta* 115, 40-46

Garger EK, Sazhenyuk AD, Odintzov AA, Paretzke HG, Roth P, Tschiersch J (2004) Solubility of airborne radioactive fuel particles from the Chernobyl reactor and implication to dose. *Radiat Environ Biophys* 43: 43–49.

R. Gellermann (2012): Nur durch Zufall Strahlenschutz? Fehlende Verdachtsprüfung auf Radioaktivität bei Altlasten. In: Fachverband für Strahlenschutz (Hrsg.), *Strahlenschutzpraxis* 2/2012, S. 4–5.

ICRP (1989). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1: Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 56. Oxford, UK, Pergamon Press.

ICRP (1994). Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Oxford, UK, Pergamon Press.

ICRP (1995). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4: Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Oxford, UK, Pergamon Press.

ICRP (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. I. C. o. R. Protection. Oxford, UK, Elsevier.

ICRP (2015). Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. *Ann. ICRP* 44(2). ICRP Publication 130.

Kutkov, V. A. (1998). "Application of human respiratory tract models for reconstruction of the size of aerosol particles through the investigation of radionuclides behaviour in the human body." Radiat. Prot. Dosim. **79**: 265–268.

Kutkov, V. A. (2000). "Results of in vivo monitoring of the witnesses of the Chernobyl accident." Radiat. Prot. Dosim. **89**: 193-197.

Kutkov, V. A. and O. I. Komaritskaya (1996). In vitro solubility of Chernobyl nuclear fuel aerosol with respect to collective behaviour of its radionuclides. Proc. IRPA 9, Vienna. **2**: 445-447.

Kurchatov Institute (1990) Influence of the Object "Ukrytie" on the environment (emission of radioactive aerosols) (in Russian). Report of the Complex Expedition of the Kurchatov Institute of Atomic Energy, Moscow

O. Meisenberg, W. Schultz, P. Feistenauer, J. Tschiersch, E.K. Garger, O.O. Odintsov, V.K. Shynkarenko (2012): Verbesserung der Inhalationsdosimetrie bei Exposition mit radioaktiv kontaminierten Aerosolen. Abschlussbericht 3608S04544.

Meisenberg, O.; Tschiersch, J. (2015): Test of methods for retrospective activity size distribution determination from filter samples. Radiation Measurements 76, 29-35

Mirell, S. G. and W. H. Bland (1989). "Biological retention of fission products from the Chernobyl plume." Health Phys. **57**: 649–652.

I. Schäfer, G. Seitz (2005): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben St.Sch.-Nr.4280 „Ermittlung der Zufuhr von natürlichen Radionukliden der Uranzerfallsreihe (230Th, 226Ra, 210Pb, 210Po) bei Personen aus der Bevölkerung, in belasteten Gebieten und Wohnungen und an NORM-Arbeitsplätzen durch Ausscheidungsanalyse“. Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (Hrsg.), 144 Seiten.

SSK (1997): Strahlenexposition an Arbeitsplätzen durch natürliche Radionuklide. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Strahlenschutzkommission (Hrsg.), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 48 Seiten.

T. Sternad, U. Kratzel, H. Hellmann (2000): Abschlussbericht zum Untersuchungsvorhaben Innere Strahlenexposition beim berufsbedingten Umgang mit thoriumhaltigen Materialien. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), 107 Seiten.

Technical Reports Part 2, 3 "Procedure of study of a solubility of aerosol particles in lung simulation in vitro" (2009) Kiev.

Tschiersch, J., Yoshimura, K., Spielmann, V., Iijima, K., Shinonaga, T. Miyahara, K. (2017): Contribution of internal dose to the exposure in the Fukushima exclusion zone. ICRP-ERPW2017, Paris, 10-12 October 2017.

UNSCEAR 2008: Sources and effects of ionizing radiation. Report Vol.1, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. United Nations Publication, New York 2010, 245 pages.